



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK



Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

TEKNOLOGI AI untuk **ROBOT BAWAH AIR**





Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

TEKNOLOGI AI

untuk

ROBOT BAWAH AIR



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :
YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK
Jl. Majapahit No. 605 Semarang
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-634-7227-56-0 (PDF)



9

786347

227560

TEKNOLOGI AI untuk ROBOT BAWAH AIR

Penulis :

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

ISBN : 978-634-7227-56-0

Editor :

Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom., M.Kom.

Penyunting :

Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech

Desain Sampul dan Tata Letak :

Irdha Yuniarto, S.Ds., M.Kom

Penebit :

Yayasan Prima Agus Teknik Bekerja sama dengan
Universitas Sains & Teknologi Komputer (Universitas STEKOM)

Anggota IKAPI No: 279 / ALB / JTE / 2023

Redaksi :

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. 08122925000

Fax. 024-6710144

Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

Distributor Tunggal :**Universitas STEKOM**

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. 08122925000

Fax. 024-6710144

Email : info@stekom.ac.id

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara
apapun tanpa ijin dari penulis

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga buku berjudul ***“Teknologi AI untuk Robot Bawah Air”*** ini dapat terselesaikan dengan baik. Buku ini hadir sebagai salah satu wujud kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) dan teknologi robotika bawah air yang semakin berkembang pesat.

Robot bawah air memiliki peranan penting dalam berbagai sektor seperti eksplorasi laut, pemantauan lingkungan, hingga industri migas dan kelautan. Integrasi teknologi AI pada robot bawah air membuka peluang baru untuk meningkatkan efisiensi, ketepatan, serta kemampuan otonomi dalam menjalankan tugas di lingkungan yang penuh tantangan ini. Dalam buku ini, pembaca akan diajak memahami prinsip dasar AI, penerapan teknik pembelajaran mesin, serta desain sistem robotik yang mampu beroperasi secara mandiri di bawah permukaan laut.

Pada buku ini menguraikan beberapa tantangan yang dihadapi oleh para peneliti dan operator saat menjalankan proyek sains kelautan atau lepas pantai, seperti minyak, gas, dan tenaga angin. Bab 1 mengeksplorasi potensi dan tantangan teknologi AI dalam ranah teknologi bawah air, di mana otonomi merupakan faktor krusial untuk menangani aspek-aspek penting penerapan sistem maritim di masa depan.

Bab 2 memberikan wawasan tentang dunia sains bawah air dan memperkenalkan keindahan sekaligus kerapuhan dunia bawah laut, serta menguraikan kemungkinan-kemungkinan sains kelautan di masa depan dengan menggunakan sistem bawah air cerdas. Kondisi aktual dan tantangan dalam penggunaan teknologi sensor berbasis TI mutakhir di wilayah perairan dangkal dirangkum, begitu pula kekurangan dan kendala utama ketika teknologi sensor modern menghadapi kondisi sulit di wilayah pesisir di perairan beriklim sedang dan kutub. Bagian penting dari rekrutmen, produksi, dan keanekaragaman hayati laut terkait dengan wilayah perairan dangkal hingga kedalaman 50 m di sepanjang zona pesisir dunia, tempat cahaya menembus hingga ke dasar laut, menghasilkan komunitas benthik yang sangat beragam dan menjadi dasar bagi kehidupan laut.

Bab 3 memberikan pandangan lain tentang lingkungan bawah laut dengan menjelaskan persyaratan yang dibutuhkan untuk mengeksploitasi sumber daya yang melimpah di domain ini, dengan fokus pada kebutuhan untuk dapat bertindak minimal invasif agar dapat melakukan eksploitasi tanpa intervensi besar-besaran. Industri terus mencari teknologi baru untuk menjadikan bisnis mereka lebih ramah lingkungan, sekaligus menguntungkan dan lebih aman. Tantangan teknologi lingkungan dibahas, dan rencana jangka panjang strategis multidisiplin terpadu untuk meningkatkan kematangan teknologi dan penerapan umumnya diusulkan.

Pada bagian selanjutnya, kami mencoba menunjukkan bagaimana Teknologi AI modern dapat digunakan di berbagai tingkatan dari perangkat keras hingga perangkat lunak—untuk meningkatkan kemampuan dan area aplikasi robot bawah air, menghasilkan visi kendaraan

bawah air otonom jangka panjang, yang mampu (berinteraksi) sebagai penghuni bawah laut. Dengan demikian, air akan memiliki pengaruh besar terhadap metode AI terapan yang sudah ada di ranah terestrial, yang juga mengakibatkan berbagai tantangan ilmiah dan teknis di sisi ini. Bab 4–6 akan membahas isu-isu utama di tingkat metodologis dan teknologis, dimulai dengan tantangan fisik yang dihadapi robot. Di awal bagian ini, kami akan mengkaji lebih dalam lambung kendaraan, karena merupakan bagian yang paling terpapar air dan kondisi lingkungan, serta potensi optimasinya.

Dengan memperkenalkan perubahan desain, toleransi tekanan serta stabilitas mekanis dapat dicapai, efisiensi hidrodinamik dapat ditingkatkan, dan perlindungan terhadap korosi dan pengotoran dapat ditingkatkan. Struktur dan desain lambung juga merupakan faktor penting dalam memungkinkan modularitas dan konfigurasi sistem bawah air, yang menghasilkan peningkatan kegunaan karena fleksibilitas dan kemampuan beradaptasi terhadap situasi baru (dan bahkan mungkin yang belum diketahui). Selain menyoroti keunggulan pendekatan sistem modular, Bab 5 menyajikan seperangkat aturan desain untuk antarmuka modular.

Agar dapat bereaksi secara tepat terhadap semua jenis situasi, sistem propulsi harus memungkinkan kendaraan robotik bergerak dalam keenam derajat kebebasan. Gagasan untuk memanfaatkan manfaat sistem yang dapat dikonfigurasi ulang datang dengan tantangan yang lebih besar, misalnya, terkait dimensi aktuasi untuk mewujudkan kinerja robot bawah air yang baik. Oleh karena itu, tidak hanya desain dan kontrol motor yang dibahas dalam Bab 6 tetapi juga optimasi propulsi melalui pembelajaran mesin, identifikasi adaptif, dan kontrol. Akan ditunjukkan bahwa kemampuan diagnostik mandiri, yang saat ini sering hilang pada kendaraan bawah air, dapat dicapai melalui pendekatan sistem terintegrasi. Dengan memasang kepadatan sensor yang lebih besar dalam sistem, komunikasi untuk mengendalikan entitas menjadi semakin penting.

Namun, tidak hanya komunikasi internal yang menjadi faktor relevan bagi penghuni bawah laut yang diindentasi, tetapi juga komunikasi dari operator ke kendaraan bawah air otonom atau komunikasi antara beberapa sistem yang bekerja bersama dalam suatu kelompok, misalnya, untuk manipulasi objek bersama. Harus dikatakan bahwa karena sifat fisik air medium, koneksi komunikasi yang stabil dengan bandwidth tinggi saat ini masih tak tertandingi. Mengatasi situasi ini, metode komunikasi semantik diperkenalkan di Bab 7 yang memungkinkan pengurangan jumlah data yang ditransfer. Selain itu, metode AI seperti pembelajaran mesin digunakan untuk meningkatkan efisiensi komunikasi.

Interaksi dengan lingkungan sekitar sangat penting bagi wahana bawah air, baik untuk pengambilan sampel lingkungan guna mengumpulkan dan mencatat karakteristik lingkungan maupun untuk inspeksi dan pemeliharaan struktur bawah air. Untuk melakukan manipulasi bawah air yang presisi dan terampil, perangkat manipulasi harus dipasang pada sistem. Terlepas dari tekanan lingkungan, peralatan sensorik manipulator dan/atau efektor ujung harus dilengkapi sedemikian rupa sehingga pengukuran gaya yang terukur secara presisi dapat dilakukan untuk melakukan tugas-tugas yang sensitif terhadap gaya. Bab terakhir dalam bagian

ini membahas topik ini dari dua sisi, yaitu konsep mekatronika dan strategi pengendalian manipulator.

Setelah kita berfokus pada sifat fisik robot bawah air otonom yang menentukan ketahanan dan kemampuan sistem ini untuk tetap berada di bawah air dalam jangka waktu yang lebih lama, kini kita akan membahas kemampuan persepsi yang berkaitan erat dengan fungsionalitas yang dibutuhkan untuk berinteraksi dengan lingkungan (kemampuan intervensi). Intervensi tersebut mencakup kemampuan untuk bereaksi secara dinamis, tidak hanya menyiratkan aktuasi tetapi juga penginderaan internal terhadap efeknya.

Bahkan, berdasarkan perspektif desain perangkat keras pada bagian sebelumnya, dua bab pertama dari bagian ini berfokus pada kemampuan kontrol perangkat keras ini menggunakan pendekatan kontrol seluruh tubuh yang dinamis. Dengan demikian, robot mampu mengaktifkan aktuator secara terorkestrasi, memungkinkan perilaku yang kompleks dan holistik. Sementara Bab 9 menyajikan perluasan skema kontrol seluruh tubuh yang ada untuk menjadi dinamis menggunakan pembelajaran mesin, Bab 10 lebih berfokus pada realisasi kemampuan cengkeraman dinamis. Kedua kemampuan ini membutuhkan spesialisasi tinggi dalam domain bawah air, karena pergerakan sistem itu sendiri mengarahkan gaya dan arus di dalam air yang harus dipertimbangkan secara langsung agar dapat melakukan perilaku yang diinginkan. Lebih lanjut, jika sistem melakukan aksi dengan gripper, dinamika seluruh robot yang mengambang bebas di air akan berubah, yang sekali lagi harus diintegrasikan untuk pergerakan selanjutnya. Hal yang sama berlaku jika modul sensor atau aktuator ditambahkan atau dilepaskan dari sistem.

Dalam dua bab berikutnya, tantangan penginderaan spesifik yang harus dihadapi dalam domain bawah air akan dibahas. Bab 11 mengambil pandangan ini, dengan mengkaji kemampuan navigasi visual dengan dan tanpa peta. Para penulis menunjukkan bahwa eksplorasi lingkungan bawah laut menghadirkan ketidakpastian yang tinggi bagi teknik-teknik yang mapan dalam domain terestrial, memberikan beberapa petunjuk tentang cara menanganinya sehingga metode yang lebih maju dapat muncul. Untuk penginderaan lingkungan, beberapa modalitas dapat digunakan, yang juga saling melengkapi. Bahkan lebih penting lagi bagi konsep-konsep baru robot bawah air untuk memperkenalkan unit sensor multi-moda seperti residensi bawah laut karena sistem harus aman dari kegagalan dan rangkaian sensor harus siap menghadapi berbagai kondisi lingkungan. Sensor multimoda juga dapat digunakan untuk memvalidasi pengukuran di setiap komponen sensor, sehingga robot dapat mengidentifikasi malfungsi dan bereaksi.

Terakhir, representasi robot dan lingkungannya diperlukan, di mana sebagian besar tindakan yang akan dieksekusi dan tujuan yang akan dicapai dapat disimulasikan sebelum dieksekusi di dunia nyata. Bab penutup terutama berfokus pada bagian ini. Simulasi ini mengintegrasikan bab-bab sebelumnya dalam arti bahwa input sensor, penginderaan, dan intervensi di lingkungan dapat disimulasikan sebelum dieksekusi. Untuk meningkatkan dan menyempurnakan desain dan perilaku sistem, serta untuk tujuan pelatihan dan pengembangan, simulasi semacam itu tidak wajib dijalankan di dalam sistem. Namun, untuk menciptakan perilaku yang stabil dan dinamis selama misi yang sedang berlangsung, simulasi

harus dijalankan secara internal pada sistem saat berada di lapangan tanpa atau dengan kemungkinan yang sangat kecil untuk berkomunikasi.

Pada bab-bab sebelumnya, kami telah membahas persyaratan sistem fundamental serta sifat intervensi untuk mengembangkan generasi baru sistem wahana bawah air yang mampu bernavigasi secara otonom jangka panjang. Karena perairan terbuka menghadirkan tantangan besar akibat komunikasi yang buruk, lingkungan yang terbatas dan berbahaya, sistem ini harus dirancang sebagai sistem modular dengan tingkat mobilitas dan adaptasi yang tinggi. Bagian ini berfokus pada integrasi sistem cerdas baru yang dirumuskan dalam bab-bab sebelumnya ke dalam skenario nyata seperti eksplorasi gua atau inspeksi dan pemeliharaan fasilitas bawah air.

Bab 14 berfokus pada topik navigasi robot bawah air otonom di area sempit, yang menghadirkan isu khusus di bidang robotika bawah air. Bab ini menguraikan tantangan yang memerlukan pendekatan khusus untuk pra-lokalisasi mandiri dan perhitungan peta lingkungan. Cara menjawab pertanyaan-pertanyaan ini dan menemukan solusinya dijelaskan di bagian ini. Karena sistem bawah air harus beroperasi dengan kemungkinan komunikasi yang terbatas, metode harus dikembangkan untuk memastikan ketepatan operasinya dalam setiap keadaan, termasuk dalam situasi yang tidak terduga. Terkait isu-isu ini, Bab 15 mengulas kemungkinan pemodelan dan verifikasi sistem, baik perangkat keras maupun perangkat lunak, pada sistem robotik bawah air, dan selanjutnya merefleksikan cara merancang algoritma sertifikasi.

Terakhir, bab terakhir membahas jenis antarmuka baru di mana tim robot dan peneliti manusia melakukan perencanaan dan koordinasi tugas kooperatif antara operator manusia dan tim robot. Khususnya di area di mana manusia hanya dapat bertindak secara kondisional atau bahkan dibatasi sama sekali, kombinasi manusia dan robot memberikan keuntungan yang sangat besar. Pada kesempatan ini, kapabilitas tinggi untuk aktivitas dinamis dan kompleks yang dilakukan oleh sistem robotik dipadukan dengan kemampuan manusia untuk menangani ambiguitas atau data yang salah. Para penulis menyajikan sistem manajemen misi strategis interaktif untuk eksplorasi bawah air yang memungkinkan sistem robotik menganalisis situasi dan tantangan mereka secara cepat dan intuitif di bawah kendali eksternal manusia.

Atas dasar ini, sistem cerdas yang ada diperluas secara kualitatif dalam interaksinya dengan manusia, sehingga peningkatan dan perluasan pekerjaan mereka dimungkinkan dalam skenario bawah air. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, ide, serta masukan demi tersusunnya buku ini. Kritik dan saran yang membangun senantiasa kami harapkan untuk perbaikan di masa mendatang.

Selamat Membaca Dan Semoga Bermanfaat.

Semarang, Oktober 2025

Penulis

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	vi
BAB 1 SURVEI TANTANGAN DAN POTENSI TEKNOLOGI AI	1
1.1 Kasus Ai Dan Robotika	2
1.2 Lingkungan Bawah Air Akan Membantu Meningkatkan Ai Dan Robotika	8
1.3 Penutup	12
BAB 2 SENSOR CERDAS UNTUK ILMU KELAUTAN ABAD MENDATANG	14
2.1 Pendahuluan.....	14
2.2 Pentingnya Online Selama Waktu Yang Relevan	16
2.3 Perkembangan Teknologi Observatorium Bawah Air Kabel	17
2.4 Pengalaman Dalam Teknologi Observatorium Bawah Air Berkelanjutan	17
2.5 Kemajuan Dalam Ilmu Lingkungan Oleh Observatorium Kabel	20
2.6 Sains Bertemu Realitas Operasional In Situ.....	23
2.7 Persyaratan Dan Visi Teknologi Sensor In-Situ Ilmiah	25
2.8 Ai Untuk Peningkatan Teknologi Spesifik	26
2.9 Teknologi Ilmu Kelautan Menggunakan Kecerdasan Buatan	28
2.10 Ringkasan.....	29
BAB 3 TANTANGAN OPERASI PERAIRAN DALAM PERSPEKTIF INDUSTRI	30
3.1 Pendahuluan.....	30
3.2 Lapisan Pra-Garam	31
3.3 Platform Bawah Laut	34
3.4 Sistem Otonom Sistem Bawah Air	35
3.5 Penambangan Dasar Laut.....	37
3.6 Pendekatan Penelitian Dan Pengembangan Terpadu	38
3.7 Kesimpulan	39
BAB 4 MATERIAL CANGGIH LAMBUNG MODULAR MULTIGUNA.	40
4.1 Pendahuluan.....	40
4.2 Fungsi Pelindung Pengendalian Biofouling	41
4.3 Efisiensi Hidrodinamik	43
4.4 Penginderaan Terintegrasi	44
BAB 5 SISTEM MODULAR REKONFIGURASI WAHANA BAWAH AIR.	46
5.1 Pendahuluan.....	46
5.2 Casing Dan Interkonektivitas	46
5.3 Infrastruktur Kontrol.....	48
5.4 Antarmuka Koneksi.....	49
5.5 Desain Kontrol	50
5.6 Verifikasi Kontainer Untuk Perangkat Keras Ulang-Program.....	51
BAB 6 PROPULSI CERDAS	56

6.1	Keadaan Terkini Dan Masalah Yang Diketahui.....	56
6.2	Persyaratan Untuk Propulsi Cerdas	59
6.3	Pendekatan Desain Sistem Terpadu	60
6.4	Desain Mesin Listrik.....	61
6.5	Pendekatan Manufaktur Baru	62
6.6	Penginderaan Terintegrasi	63
6.7	Optimasi Pembelajaran Mesin	64
BAB 7	KOMUNIKASI KENDARAAN BAWAH AIR OTONOM	67
7.1	Pendahuluan.....	67
7.2	Teknologi Komunikasi Bawah Air	68
7.3	Jaringan Komunikasi Bawah Air.....	70
7.4	Komunikasi Semantik	72
BAB 8	MANIPULATOR MODULAR OTONOM BAWAH AIR	76
8.1	Pendahuluan.....	76
8.2	Keadaan Terkini	77
8.3	Desain Sistem Modular	78
8.4	Pemodelan Dan Kontrol	80
BAB 9	PEMBELAJARAN MESIN UNTUK KONTROL MANIPULASI BAWAH AIR	83
9.1	Pendahuluan.....	83
9.2	MI Untuk Adaptasi Dan Rekonfigurasi Kontrol Seluruh Tubuh.....	85
9.3	Kontrol Seluruh Tubuh Untuk Sistem Heterogen Underactuated	87
9.4	Evaluasi	88
BAB 10	KONTROL ADAPTIF UNTUK SISTEM GENGAMAN BAWAH AIR	92
10.1	Sistem Gripper	92
10.2	Sensor Sentuh.....	94
10.3	Solusi Untuk Kontrol Optimal Nonlinier	94
10.4	Prinsip-Prinsip Komputasi Terdistribusi	95
10.5	Eksplorasi Taktil	95
10.6	Kontrol Adaptif Dalam Manipulasi Bawah Air	96
10.7	Pemrosesan Sensor Terdistribusi Data Masif	97
BAB 11	TANTANGAN DALAM NAVIGASI VISUAL BAWAH AIR DAN SLAM	99
11.1	Pendahuluan.....	99
11.2	Lokalisasi Bawah Air	100
11.3	Tantangan Dan Keadaan Terkini Dalam Visi Bawah Air	100
11.4	Fenomena Slam Umum Dan Kaitannya Dengan Domain Bawah Air.....	102
BAB 12	PEMETAAN & NAVIGASI BAWAH AIR MULTIMODA.....	107
12.1	Pendahuluan.....	107
12.2	Arah Pengembangan Sistem Bawah Laut Otonom.....	108
12.3	Kondisi Lingkungan Untuk Kendaraan Residensi Bawah Laut	108
12.4	Teknologi Sensor.....	109
12.5	Pendekatan Pengembangan Yang Dibayangkan.....	111

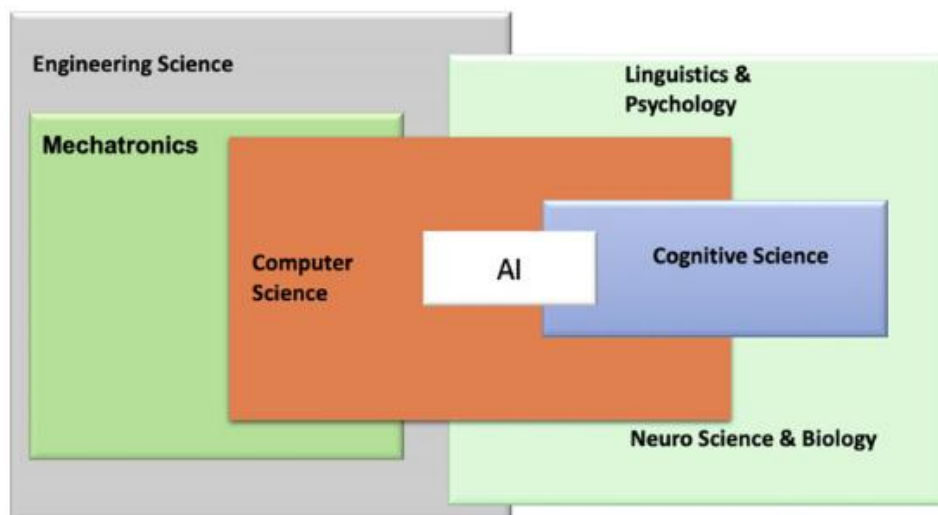
BAB 13 KERANGKA KERJA SIMULASI UNTUK INTERVENSI BAWAH AIR	113
13.1 Riset Ilmu Komputer Untuk CFD.....	113
13.2 Simulasi Untuk Intervensi Bawah Air	116
BAB 14 NAVIGASI AUV BARU DI RUANG TERBATAS.....	120
14.1 Pendahuluan.....	120
14.2 Lokalisasi Dan Pemetaan Simultan (SLAM)	121
14.3 Sensor Perhitungan Mati	122
14.4 Sensor Berorientasi Depan	123
14.5 Informasi Yang Diperoleh Dari Tubuh Robot	124
14.6 Pemetaan Arus Air	127
14.7 Eksplorasi Otonom	128
BAB 15 VERIFIKASI UNTUK SISTEM BAWAH AIR OTONOM.....	129
15.1 Pendahuluan.....	129
15.2 Memodelkan Sistem.....	129
15.3 Verifikasi Perangkat Keras.....	132
15.4 Verifikasi Program.....	133
15.5 Merancang Algoritma	134
15.6 Algoritma Dengan Jaminan Kasus Terburuk Yang Kuat	134
15.7 Algoritma Sertifikasi	135
15.8 Studi Kasus Verifikasi Algoritma Robotika	136
15.8 Tantangan Yang Dihadapi	137
15.9 Kesimpulan	138
BAB 16 SISTEM MANAJEMEN MISI KOLABORATIF MANUSIA-ROBOT.....	140
16.1 Pendahuluan.....	140
16.2 Penalaran Pengetahuan Untuk Misi Bawah Air Jangka Panjang	142
16.3 Antarmuka Vr-Otak Intuitif Yang Dioptimalkan	144
16.4 Kesimpulan	147
DAFTAR PUSTAKA	149

BAB 1

SURVEI TANTANGAN DAN POTENSI TEKNOLOGI AI

Kecerdasan Buatan (AI) akhir-akhir ini telah menerima banyak perhatian atas berbagai pencapaiannya di bidang-bidang seperti pengenalan wajah, pemahaman dan produksi bahasa alami, serta di bidang medis seperti klasifikasi tumor, prediksi gagal jantung, dan bahkan diagnosis depresi, misalnya dalam Chockley dan Emanuel (J Am Coll Radiol 13(12):1415–1420, 2016,). Bidang penerapan Teknologi AI saat ini berkembang pesat ke bidang farmasi, keuangan, dan tentu saja keamanan dalam segala bentuk dan rupanya. Kesamaan dari semua bidang yang disebutkan di atas adalah fakta bahwa kita dapat menerapkan jenis Teknologi AI tertentu yang didasarkan pada analisis statistik dari sejumlah besar data. Inilah yang disebut teknik pembelajaran mesin berbasis data yang kinerjanya meningkat secara eksponensial seiring dengan jumlah data yang tersedia untuk analisis statistik.

Mudah untuk melupakan bahwa Kecerdasan Buatan sebenarnya adalah bidang yang jauh lebih luas yang berasal dari awal abad terakhir ketika para ilmuwan dari spektrum disiplin ilmu yang jauh lebih luas berfokus pada pertanyaan tentang pemodelan perilaku cerdas. Salah satu pemain kunci di bidang ini adalah Alan Turing sendiri, yang tertarik pada pertanyaan ini karena karyanya di bidang teori komputasi yang menghasilkan mesin Turing sebagai mekanisme/teori universal untuk fungsi yang dapat dihitung secara efisien.



Gambar 1.1. Kecerdasan Buatan adalah antarmuka antara Teknik dan Ilmu Kognitif yang mencoba menerapkan fungsi-fungsi cerdas dalam sistem teknis.

Sangatlah penting bahwa ia mulai memikirkan serangkaian fungsi yang tidak termasuk dalam kelas yang disebutkan di atas dan dari sana, hanya perlu langkah kecil untuk membahas kecerdasan dan mekanisme apa yang mungkin mendasarinya. Gambar 1.1 menggambarkan asal-usul Kecerdasan Buatan yang berada di tengah spektrum disiplin ilmu yang berkisar dari Teknik dan Mekatronika melalui Ilmu Komputer hingga Ilmu Kognitif, Ilmu Saraf, dan bahkan



Linguistik dan Psikologi. Oleh karena itu, Kecerdasan Buatan merupakan bidang yang sangat menarik untuk aplikasi, terutama yang membutuhkan tingkat otonomi yang tinggi seperti domain bawah air.

1.1 KASUS AI DAN ROBOTIKA

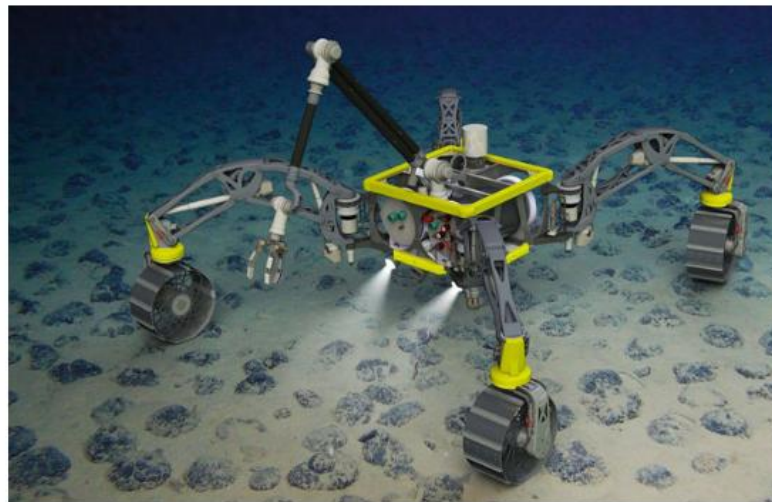
Dalam ranah teknologi bawah laut, otonomi merupakan faktor krusial untuk dapat menangani aspek-aspek penting penerapan sistem maritim di masa depan. Lautan, terutama dasar lautan, merupakan wilayah yang sebagian besar masih belum diketahui umat manusia. Sebagaimana telah ditunjukkan berkali-kali sebelumnya, pengetahuan kita tentang dasar lautan jauh lebih sedikit daripada pengetahuan kita tentang permukaan Mars. Di sisi lain, sangat jelas bahwa umat manusia membutuhkan sumber daya yang disediakan oleh lautan. Sumber daya ini sangat luas dan berkisar dari produksi energi hingga produksi mineral tanah jarang dan produksi makanan untuk populasi yang diperkirakan akan mencapai 9 miliar jiwa hanya dalam 20 tahun ke depan. Namun, jika kita menerima kenyataan bahwa sumber daya ini dibutuhkan, kita juga harus menerima kenyataan bahwa kita harus memanfaatkan sumber daya alam ini dengan cara yang menjamin keberadaannya juga untuk generasi mendatang. Oleh karena itu, diperlukan teknologi yang memungkinkan eksploitasi lautan secara berkelanjutan sebagai sumber daya vital bagi umat manusia (Gambar 1.1).

Kecerdasan Buatan dan teknologi robotika merupakan aset yang telah kita kuasai secara luas dan dapat digunakan untuk mencapai eksploitasi sumber daya maritim yang berkelanjutan. Namun, teknologi ini harus diperluas dan dikembangkan lebih lanjut agar benar-benar dapat diterapkan dalam ranah aplikasi bawah air. Perluasan dan pengembangan ini akan menimbulkan beberapa pertanyaan penelitian serius terkait teknologi dan metode AI dan Robotika saat ini. Namun, solusi atas pertanyaan-pertanyaan tersebut di sisi lain tidak hanya akan memperluas AI dan robotika, tetapi juga akan memungkinkan kita untuk merumuskan arah penelitian baru dan dengan demikian menjawab beberapa pertanyaan mendesak tentang perspektif Kecerdasan Buatan itu sendiri (Gambar 1.2 dan 1.3).



Gambar 1.2 Hiu Sampah. Sebuah studi tentang robot otonom untuk mengumpulkan sampah terapung di pelabuhan dan lingkungan maritim terbatas lainnya.

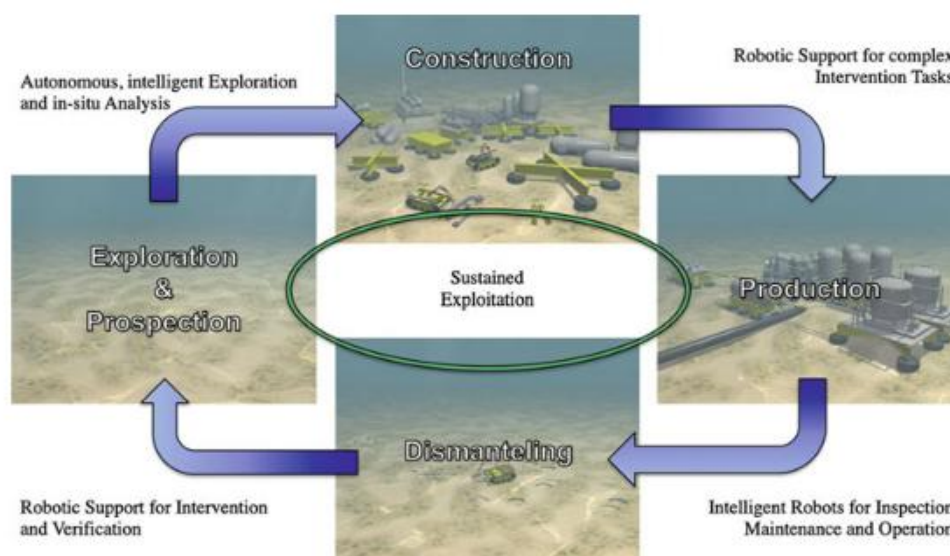




Gambar 1.3 Sebuah studi desain sistem manipulasi bergerak bawah air Sherpa-UW yang dirancang dan dibangun di Pusat Inovasi Robotika DFKI di Bremen.



Gambar 1.4 Kendaraan otonom bawah air Flatfish yang dirancang dan dibangun dalam proyek kerja sama dengan DFKI Bremen dan SENAI-Salvador, Brasil.



Gambar 1.5 Siklus Hidup Eksploitasi Berkelanjutan di Lokasi Produksi Bawah Air



Jika kita melihat siklus hidup, misalnya, lokasi produksi bawah air (lihat Gambar 1.5), kita dapat menguraikan kebutuhan akan dukungan teknologi cerdas di setiap fase siklus. Selama fase eksplorasi dan prospeksi dalam proyek produksi lepas pantai pada umumnya, sistem robotik cerdas dan khususnya otonom dapat mengumpulkan data berkualitas lebih tinggi untuk mengidentifikasi lokasi yang sesuai dengan konsumsi energi yang lebih rendah. Sistem otonom membutuhkan dukungan permukaan yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan kendaraan yang dioperasikan dari jarak jauh (ROV) bertenaga kabel pada umumnya, sehingga ukuran kapal permukaan dan jumlah awak dapat dikurangi secara signifikan, yang menghasilkan biaya eksplorasi yang lebih rendah. perlu dicatat bahwa pengurangan biaya eksplorasi juga berarti pengurangan jejak ekologis. Pada saat yang sama kualitas data dapat ditingkatkan karena robot cerdas mampu mengambil lebih banyak sampel dalam jumlah waktu yang sama seperti yang dapat dilakukan dengan ROV, yang merupakan hasil dari jalur cerdas dan perencanaan misi yang berasal dari Teknologi AI di bidang perencanaan formal dan kontrol eksekusi.

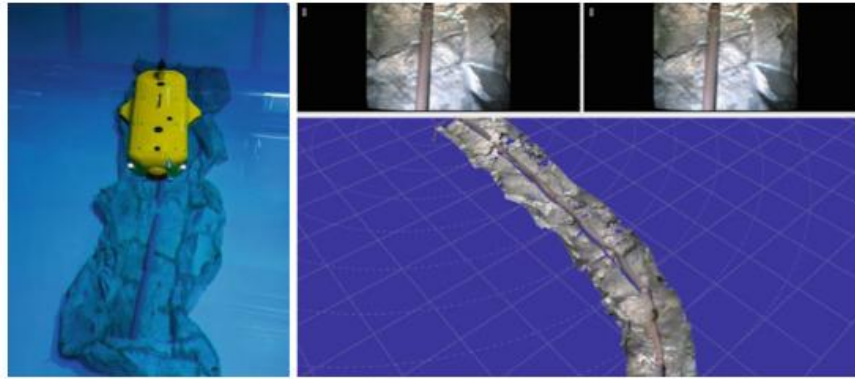
Dengan kemampuan sistem robotik masa depan dalam hal pengambilan sampel di lokasi dan analisis waktu nyata di lokasi, kami akan dapat mengoptimalkan misi eksplorasi dan prospeksi lebih jauh karena kami dapat memprediksi kesesuaian lokasi dengan lebih baik dan lebih cepat. Kemampuan ini berasal dari kemungkinan penerapan perangkat komputasi berkinerja tinggi yang memungkinkan penggunaan teknologi jaringan saraf dalam berbasis data. Pada saat yang sama, sistem akan dapat menerapkan metode analisis data untuk mengkuifikasi parameter lingkungan, seperti keanekaragaman hayati dan nilai ekologis lokasi, yang merupakan parameter yang belum tentu masuk dalam persamaan dalam pendekatan saat ini untuk menggunakan lokasi tertentu untuk produksi. Jika parameter ini diperoleh saat ini, maka biasanya harus diperoleh dalam misi terpisah yang datang beberapa minggu atau bulan kemudian dengan kapal permukaan tambahan dan peralatan bawah air, yang lagi-lagi meningkatkan jejak ekologis. Teknologi robotik cerdas dapat melakukan ini dalam satu sapuan dan dengan presisi yang jauh lebih tinggi, seringkali bahkan secara kualitatif lebih baik daripada yang dapat dilakukan oleh operator manusia karena kelelahan dan inspeksi visual yang rentan terhadap kesalahan oleh manusia.

Selama fase produksi proyek semacam itu, yang berlangsung sekitar 30+ tahun, sistem robotik cerdas berbasis teknologi AI dapat meningkatkan keamanan dan keselamatan lokasi produksi secara signifikan. Sistem robotik cerdas di masa depan dapat berada di bawah laut, yang berarti mereka dikerahkan sekali dan kemudian tetap berada di lokasi selama berbulan-bulan atau bahkan bertahun-tahun.

Hal ini dimungkinkan karena lokasi tersebut menghasilkan energi atau terhubung ke sumber energi, yang memungkinkan penerapan pasokan daya bawah air dan fasilitas pertukaran data (garasi). Karena teknologi navigasi probabilistik modern memungkinkan robot untuk secara otomatis menemukan jalan mereka ke garasi, mereka dapat mengisi ulang daya kapan saja dan menggunakan koneksi fisik ke garasi untuk membangun tautan komunikasi pita lebar tinggi dengan pusat operator. Tautan komunikasi ini dapat digunakan untuk mengunggah informasi yang telah diperoleh sistem selama misinya dan untuk menerima parameter misi baru untuk



perjalanan berikutnya. Perlu dicatat bahwa pusat operator sebenarnya dapat berlokasi di mana saja di dunia karena dimungkinkan untuk menggunakan tautan komunikasi satelit dari pelampung permukaan atau dari fasilitas darat yang terhubung melalui kabel bawah air ke lokasi produksi atau ilmiah.



Gambar 1.6 Robot Flatfish selama tugas Rekonstruksi 3D (kiri) dan hasil pemindaian pipa bawah air sebagai Model 3D (kanan)

Bukan hanya jumlah data yang akan diterima operator darat akan meningkat secara signifikan, juga kualitas data dan dengan demikian kualitas pemantauan integritas akan ditingkatkan secara drastis relatif terhadap standar saat ini. Sistem akan menggunakan teknologi rekonstruksi 3D modern berdasarkan metode AI yang dikenal dari sistem terestrial, seperti struktur dari gerakan, penglihatan 3-D, dan teknik pemindaian multi-moda (laser dan ultrasound) untuk memberikan rekonstruksi 3D yang sempurna dari instalasi bawah air yang akan menunjukkan bahkan deformasi terkecil dalam struktur atau cacat pada bagian mekanis sebelum dapat menyebabkan masalah serius (Gambar 1.6).

Sekali lagi, jaringan saraf dalam akan benar-benar dapat mengidentifikasi titik-titik tersebut secara otonom sehingga operator manusia tidak perlu menonton materi video berjam-jam untuk mengidentifikasi kemungkinan titik-titik bahaya di masa mendatang. Faktanya, kita dapat memanfaatkan pembelajaran modern dan Teknik AI untuk memprediksi terjadinya kegagalan, suatu teknik yang disebut pemeliharaan prediktif yang digunakan misalnya dalam sistem kereta api saat ini untuk mengurangi biaya (jejak ekologis) dan meningkatkan keselamatan.

Selain itu, karena sistem tersebut berada di bawah laut, operator dalam instalasi di darat dapat memerintahkan robot secara daring untuk pergi ke lokasi tertentu dan memberikan citra nyata dan terekonstruksi 3D secara waktu nyata, yang sebenarnya akan memungkinkan operator untuk berjalan melalui instalasi bawah airnya, yang mungkin ribuan mil jauhnya dan ribuan kaki di bawah permukaan. Jika operator akan mengamati ancaman yang akan segera terjadi pada instalasi, ia mungkin ingin mencegah hal-hal yang lebih serius terjadi dengan tugas intervensi. Artinya bahwa katup harus ditutup atau pegangan harus diputar. Sistem robot bawah air masa depan akan dilengkapi dengan teknologi manipulator berkemampuan AI yang akan memungkinkan operator melakukan hal ini dalam pendekatan



multi-moda. Multi-modalitas dalam kasus ini mengacu pada fakta bahwa operator tidak hanya akan dapat melihat dan mendengar apa yang terjadi tetapi ia juga akan dapat merasakannya. Umpan balik haptik akan diberikan kepada operator, yang merupakan informasi penting dalam tugas manipulasi yang dikendalikan manusia seperti yang dapat disaksikan oleh siapa pun yang pernah mencoba memasang mur pada baut. Perhatikan bahwa kita dapat menjalankan sistem dalam mode otonomi yang diawasi. Dalam mode ini, sistem menjalankan banyak tugas secara otonom tetapi ini dapat ditimpa oleh operator manusia jika diperlukan (Gambar 1.7).



Gambar 1.7 Robot Bawah Air Leng. Sistem ini sebenarnya merupakan studi untuk menjelajahi kedalaman samudra luar angkasa (studi untuk Badan Antariksa Jerman), tetapi telah digunakan di sini untuk mensimulasikan skenario multi-robot. Gambar di sebelah kanan menunjukkan robot Leng sedang berlabuh ke robot Sherpa-UW dalam upaya bertukar data dalam jumlah besar, yang tidak efisien jika dilakukan melalui tautan radio di dalam air.

Pada fase ketiga siklus hidup, lokasi perlu dibongkar. Ini adalah fase ketika intervensi skala besar benar-benar dibutuhkan. Benda-benda perlu dibongkar. Benda-benda perlu diangkut dari satu tempat ke tempat lain dan benda-benda perlu diangkat ke dalam ember pengangkut untuk diambil kembali di permukaan. Di sini, kemampuan manipulasi canggih berbasis AI dari robot bawah air masa depan akan memainkan peran krusial dan penting bagi keberlanjutan eksploitasi sumber daya maritim bawah air secara keseluruhan. Pertama-tama, perlu disebutkan bahwa teknologi manipulasi bawah air saat ini sebenarnya masih sangat sederhana. Sebagian besar, manipulator hidrolik tugas berat digunakan, yang memiliki kekuatan besar tetapi hanya memiliki sedikit otak.

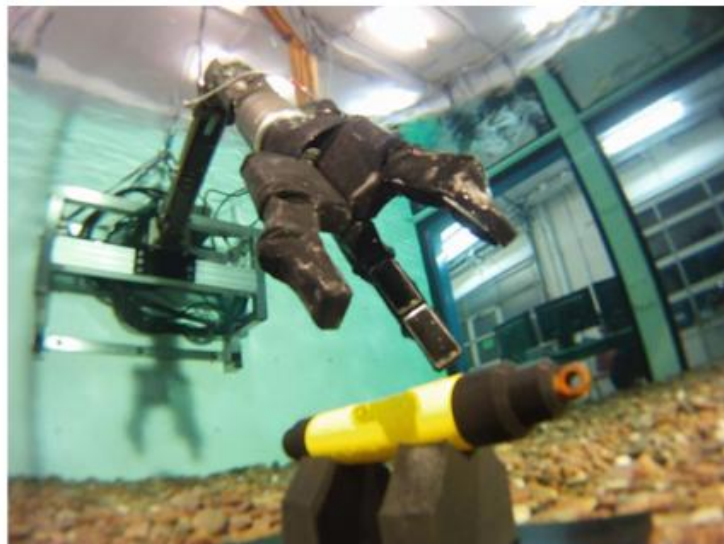
Sebenarnya, otak sepenuhnya terletak pada operator manusia yang mengoperasikan sistem secara jarak jauh melalui koneksi kabel dari kapal permukaan. Biasanya dibutuhkan pelatihan bertahun-tahun dan beberapa operator bergantian shift (karena kelelahan) hanya untuk menghubungkan steker (Gambar 1.8).

Robot bawah air modern akan dapat menggunakan metode AI canggih mereka untuk representasi lingkungan guna memperoleh representasi 3D yang sangat akurat dari struktur dan benda yang akan ditangani. Mereka akan memiliki manipulator dan gripper yang tidak hanya secara struktural mampu melakukan tugas manipulasi dan gripping yang cekatan dan rumit, tetapi juga menyediakan daya komputasi untuk menjalankan algoritma yang memungkinkan mereka meningkatkan teknik manipulasi dan gripping seiring waktu karena



mereka dapat belajar dari contoh-contoh sebelumnya melalui penggunaan teknik pembelajaran mesin. Sistem ini sebenarnya tidak perlu mengganti presisi dengan gaya geser karena mereka dapat menentukan cara terbaik untuk mencengkeram suatu objek dan bahkan mempertahankan grip yang stabil tanpa hanya meremas objek tersebut dengan menerapkan gaya yang lebih besar.

Sistem-sistem ini akan beroperasi jauh lebih mirip manusia dalam menangani tugas dengan menggeser pegangan atau menyesuaikan pusat massa objek di tangannya. Bahkan, dua atau lebih robot semacam itu akan mampu menangani objek yang sangat besar dalam satu tim karena mereka dapat menggunakan Teknologi AI dari sistem multi-agen untuk mengoordinasikan pekerjaan mereka dan bekerja sama secara cerdas dan berorientasi pada tugas. Untuk merangkum area-area peningkatan aplikasi bawah air saat ini, daftar berikut memberikan gambaran umum:



Gambar 1.8 Lengan manipulator standar industri dari Shilling Robotics, AS, diprogram ulang dan dilengkapi dengan gripper taktil dan kamera selama tugas pengenalan dan gripping objek otonom.

- Manipulasi Cerdas
 - Sistem untuk bertukar komponen di fasilitas produksi bawah air, Penutupan Konektor, Operasi Penyambungan, dll.
 - Sistem manipulasi Lengan Ganda modular
 - Sistem/proses Penanganan/Pertukaran Cerdas
- Mobilitas Cerdas
 - Operasi Minimal Invasif
 - Konsep Lokomosi: Berjalan, konfigurasi ulang
 - Platform semi-otonom untuk menangani beban berat
 - Kompensasi pergerakan (kondisi laut) di permukaan.
- Kesadaran: Persepsi cerdas
 - Komponen pembawa sensor bergerak dan perencanaan



- Kombinasi informasi sensor akustik dan visual untuk meningkatkan kemampuan navigasi
- Simulasi lingkungan bawah air yang (se)akurat (sebaik) mungkin secara fisik
- AI yang Berpusat pada Manusia
 - Perencanaan Eksplorasi Berbasis AI
 - Sistem Manajemen Berbasis AI untuk lokasi produksi multi-sistem
 - Interaksi Manusia-Robot Multi-moda.

1.2 LINGKUNGAN BAWAH AIR AKAN MEMBANTU MENINGKATKAN AI DAN ROBOTIKA

Sebagaimana telah dijelaskan di paragraf sebelumnya, jelas bahwa teknologi AI dan Robotika dapat meningkatkan kinerja sistem bawah air dalam berbagai cara dan dengan demikian membantu merancang solusi untuk berbagai aplikasi, mulai dari ilmu kelautan hingga produksi energi lepas pantai dan pertanian laut. Konsekuensi dari penerapan teknologi baru ini di lingkungan bawah air juga akan memungkinkan kita untuk mengeksplorasi sumber daya lautan secara berkelanjutan dan melestarikannya untuk generasi mendatang.

Namun, penelitian dan industri maritim jauh lebih terkait dengan perkembangan AI dan robotika daripada yang terlihat sekilas: tantangan spesifik teknologi di lingkungan bawah air menuntut penanganan berbagai tantangan krusial dalam komunitas AI dan robotika, sebagaimana akan diuraikan di bawah ini.

Pada kolom pertama, Tabel 1.1 menunjukkan daftar tugas dan tantangan yang harus dapat dipecahkan oleh sistem robotika bawah air agar dapat digunakan untuk aplikasi bawah air. Pada kolom kedua, tabel menunjukkan rintangan yang dihadirkan lingkungan bawah air bagi perancang teknologi baru. Sebagaimana ditunjukkan oleh daftar di kolom pertama, sebenarnya setiap aspek pengembangan teknologi tersentuh: Dari desain dan konstruksi struktur fisik sistem yang harus menahan tekanan yang begitu besar hingga dapat menghancurkan setiap perangkat keras yang mencoba menahannya, hingga cara mobilitasnya dalam medium padat yang memberikan gaya pada sistem yang akan sulit atau, dalam kasus terburuk, mustahil untuk ditahan.

Selain itu, cara sistem memahami lingkungan melalui penglihatan, yang merupakan sensor canggih dalam aplikasi terestrial, sangat terhambat karena lingkungan tersebut memberikan kebisingan dan hambatan dengan cara yang hampir tidak dikenal oleh sistem terestrial. Komunikasi nirkabel di bawah air sebagian besar tidak memungkinkan dan teknik navigasi tidak memiliki referensi global yang secara keseluruhan meningkatkan kebutuhan akan otonomi ke tingkat yang biasanya tidak diperlukan dalam aplikasi terestrial atau bahkan luar angkasa.

Tabel 1.1 Tantangan Teknologi AI di lingkungan bawah air

Teknologi	Tantangan
Desain dan konstruksi	Tekanan ekstrem (Inflasi, Kompensasi minyak)
Mobilitas	Daya apung, hambatan, arus
Visi (Input sensor, Pemrosesan gambar)	Sedimen, salju laut, distorsi, kegelapan

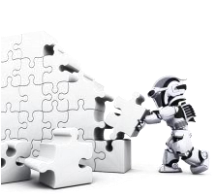


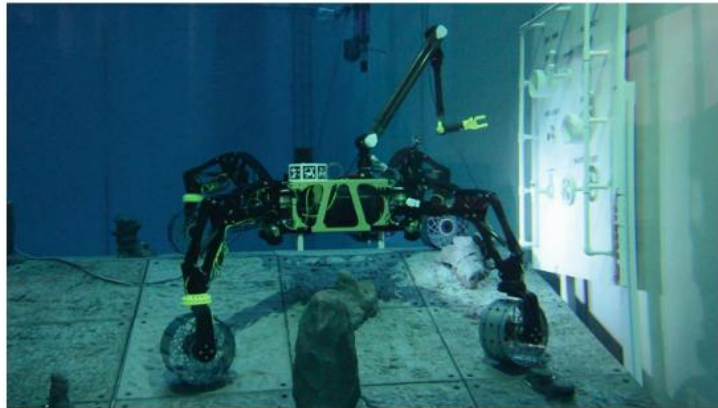
Komunikasi (nirkabel)	Bandwidth sempit hingga tidak ada
Navigasi	Tidak ada sistem navigasi global, akustik, penglihatan
Kontrol	Semi-otonom atau otonom

Untuk merangkum bidang-bidang penelitian yang perlu ditangani ketika kita ingin menerapkan AI dan Teknologi Robotik untuk melakukan pekerjaan yang bermanfaat di lingkungan bawah laut, daftar di bawah ini memberikan ringkasan area yang paling relevan:

- **Desain Sistem**
 - Desain netral tekanan, Anti-Korosi, -Fouling
 - Ruang elektronik dan penyimpanan baterai perlu menemukan cara desain baru
 - Sistem DataFlow yang redundan dan terdistribusi
- **Desain Sensor dan Analisis Data**
 - Filter fusi sensor (di luar Kalman)
 - Pembelajaran Mesin Streaming Data
 - Kartografi/lokalisasi magnetik
- **Komunikasi**
 - Georeferensi data laut dalam
 - Cara melokalisasi melalui 10 km air
 - Kompresi Semantik
- **Arsitektur Sistem**
 - Sistem otonom jangka panjang
 - Pembelajaran dan adaptasi
 - Sistem otonom kooperatif
 - Kerja sama beberapa kendaraan
- **Mobilitas dan Manipulasi Cerdas**
 - Manipulasi/intervensi otonom
- **Antarmuka Manusia-Mesin dan Perencanaan Misi.**

Jika ada satu hal yang AI dan Robotic Research akan pelajari dari penerapan keterampilannya di bawah air maka itu adalah fakta bahwa kita harus melihat robot berbasis AI dengan pandangan holistik. Sistem di mana sama pentingnya untuk memperhatikan perangkat keras sistem seperti halnya memperhatikan perangkat lunak yang mengendalikan perangkat keras. Sebenarnya, batasannya akan lebih kabur daripada dalam aplikasi terestrial mana pun. Istilah desain bersama perangkat keras perangkat lunak yang sering digunakan dalam aplikasi terestrial akan menjadi kriteria keberhasilan wajib. Di area lain mana pun, lingkungan tidak akan begitu memengaruhi cara kerja sistem seperti di dunia bawah laut. Biofouling dan korosi akan hingga 10 kali lebih cepat mengubah sifat perangkat keras daripada efek ini yang diketahui di darat. Biofouling akan menutupi sistem dengan rumput laut dan kerang dan akan sepenuhnya mengubah hidrodinamika kapal (Gambar 1.9).





Gambar 1.9 Robot Sherpa-UW saat melakukan tugas manipulasi bergerak. Sistem ini secara otomatis menavigasi ke target (instalasi Minyak & Gas Lepas Pantai) dan menggunakan sistem gripper (Sistem pada foto memiliki rating kedalaman air 6 km) untuk memanipulasi pegangan pada instalasi.

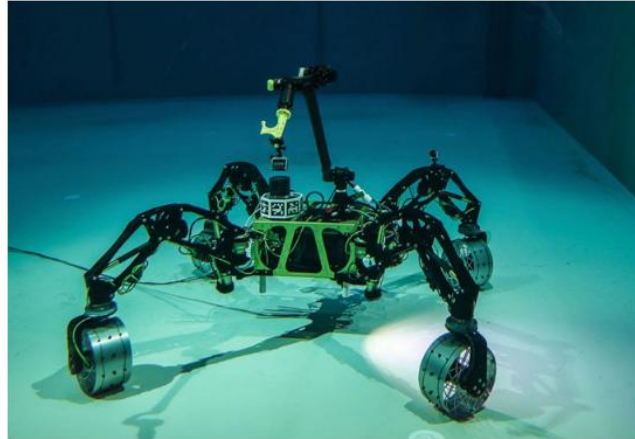
Oleh karena itu, serangkaian parameter hidrodinamik yang telah diidentifikasi dalam uji coba pra-penyebaran akan segera usang. Perangkat lunak kontrol dapat memperhitungkan hal tersebut dengan menerapkan algoritma pembelajaran, yang merupakan salah satu cara untuk mengatasi masalah tersebut. Agar algoritma adaptif atau pembelajaran mengetahui bahwa ia harus mengadopsi atau belajar, penting untuk mengetahui bahwa ada sesuatu yang berubah. Dengan demikian, pemantauan mandiri, bahkan mungkin semacam kesadaran diri terhadap sistem, akan menjadi keharusan mutlak bagi teknologi semacam itu. Navigasi probabilistik dalam domain terestrial bekerja dengan sangat baik saat ini, karena biasanya terdapat cara untuk mengkalibrasi ulang dan mengoreksi akumulasi kesalahan posisi dan pose yang seringkali bergantung pada sinyal referensi global.

Namun, karena tidak ada sistem referensi global yang tersedia di lingkungan maritim (GPS Satelit tidak akan menembus ke dalam air), sistem navigasi dan lokalisasi mandiri robot-robot ini harus mampu mengatasi dan menavigasi secara tepat tanpa dukungan tersebut. Ini hanyalah beberapa contoh dan daftarnya dapat diperluas dengan mudah. Yang memperburuk masalah adalah kita melihat daftar panjang kombinasi kemampuan: menyisihkan fitur tunggal yang tampaknya belum terpecahkan akan mustahil, jika seseorang melihat masalah dengan saksama, karena solusinya tersembunyi dalam kombinasi dan kemampuan belajar.

Parameter hidrodinamik perlu diperhitungkan untuk menerapkan navigasi probabilistik, jadi tanpa pembelajaran atau kontrol mobilitas adaptif tidak akan ada navigasi dan lokalisasi diri. Untuk belajar atau beradaptasi harus ada sistem pemantauan diri yang tidak dapat diabaikan, bahkan tidak dapat disesuaikan untuk memantau hanya beberapa parameter sistem karena semuanya berkorelasi. Strategi untuk hanya memantau sendiri hidrodinamika robot tidaklah cukup tanpa juga memantau keadaan sensor yang memantau hidrodinamika. Namun, sensor yang memantau keadaan sensor juga harus dipantau. Daripada memasang sensor baru lagi, mungkin pendekatan yang lebih baik adalah menyediakan sistem dengan bentuk pengukuran kinerja jangka panjang dan pendekatan pembelajaran yang belajar mengidentifikasi malfungsi atau penurunan kinerja sensor atau kelas sensor tertentu dengan



menganalisis semua informasi yang mungkin dihasilkan sistem, sehingga kita hampir bisa berbicara tentang beberapa bentuk awal kesadaran diri daripada hanya pemantauan diri (Gambar 1.10).

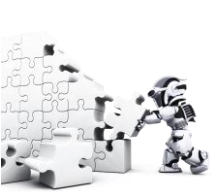


Gambar 1.10 Robot Sherpa-UW menggunakan kamera untuk melakukan inspeksi mandiri. Sistem otonom dalam tugas jangka panjang harus memiliki cara untuk mengidentifikasi (memprediksi) kegagalan atau kekurangan pada sisi perangkat keras agar dapat memperhitungkannya selama tugas navigasi dan manipulasi.

Kesadaran diri dalam sistem teknis membutuhkan model arsitektur yang secara efisien memungkinkan penerapan strategi semacam itu. Namun, model-model ini bukanlah sistem yang dapat dihidupkan/dimatikan. Sebaliknya, arsitektur ini harus mempertimbangkan bahwa robot akan bekerja selama berbulan-bulan atau bertahun-tahun di lingkungan ini, sehingga kita perlu menerapkan jenis arsitektur baru yang memiliki sarana untuk pembentukan memori dan bahkan melupakan dalam jangka waktu yang lama.

Yang akan disampaikan paragraf ini adalah bahwa tidak ada sistem robotik AI yang dapat kita terapkan dalam domain ini. Kita memiliki spektrum penuh atau tidak memiliki apa-apa. Penelitian AI dan Robotika belum pernah menghadapi tantangan seperti ini sebelumnya.

Apa yang akan dipelajari oleh Robotika dan AI adalah bahwa kita seharusnya tidak lagi menyebutnya Robotika dan AI, kita seharusnya menyebutnya Robotika saja. Robotika tanpa AI adalah refleksi kenangan masa lalu yang jauh ketika teknologi otomasi merakit mobil kita yang tidak memiliki sensor dan tidak memiliki rasa akan lingkungannya, dan ketika AI adalah permainan yang dimainkan oleh beberapa ahli teori yang mencoba mengalahkan manusia dalam permainan catur. Kita kini berada di level yang berbeda. Kita telah mengatasi perbedaan antara sistem dan perangkat lunak. Kita harus menyadari bahwa kecerdasan adalah fungsi tubuh dan pikiran, dan dunia bawah laut memberikan tanda seru besar di akhir baris.



1.3 PENUTUP

Buku ini telah mempertemukan para ilmuwan dari berbagai domain penelitian dan subbidang AI, dengan keahlian yang beragam, untuk membahas kemungkinan, tantangan, dan potensi pembelajaran dari penerapan Teknologi AI pada robot bawah air. Tujuan buku ini bukanlah untuk menyediakan solusi siap pakai untuk berbagai area dan tantangan yang dihadapi dalam bidang robotika bawah air, melainkan untuk mengidentifikasi masalah dan tantangan serta memulai proses penerapan Teknologi AI ke dalam bidang robotika bawah air. Dalam banyak bab, kemungkinan penerapan Teknologi AI sangat jelas dan dapat ditangani secara lugas. Oleh karena itu, bab-bab yang membahas navigasi, analisis data sensor, pengenalan objek, dan prediksi parameter status/sistem semuanya merupakan bagian dari penerapan Teknologi AI.

Terlihat agak lebih sulit untuk menjelaskan cara menerapkan Teknologi AI dalam bab-bab yang membahas desain sistem dan komponen tetapi juga bab misi dan skenario membutuhkan lebih dari sekadar penerapan langsung Teknologi AI yang ada. Dalam domain Desain Sistem, teknik AI dapat digunakan untuk mengoptimalkan desain atau meminimalkan energi atau berat atau parameter sistem lainnya... Namun, nilai dan manfaat sebenarnya untuk Penelitian AI berasal dari fakta bahwa sistem atau komponen itu sendiri harus dianggap sebagai bagian dari kecerdasan buatan, dengan cara desain spesifik, bahkan material spesifik yang dipilih untuk membuat komponen, akan menentukan fitur-fiturnya, kemungkinan-kemungkinannya dan akhirnya memiliki dampak besar pada apa yang akhirnya dapat dicapai melalui Teknologi AI. Jadi, pelajaran konkret yang dipetik yang menunjuk dengan jelas ke depan ke arah penelitian AI di masa depan berasal dari bab-bab ini yang memiliki masalah terbesar sejak awal... Hal yang sama berlaku untuk bab misi dan skenario. Di sini kesulitannya pertama-tama adalah harus dipahami tentang cara mengintegrasikan manusia ke dalam skenario-skenario ini. Sangat menggoda untuk membayangkan sistem yang sepenuhnya otonom dan menjalankan tugasnya secara optimal tanpa campur tangan manusia. Namun, hal ini tidak dapat terjadi di sini karena campur tangan manusia selalu dibutuhkan. Oleh karena itu, integrasi dan distribusi tugas antara manusia dan robot atau pendekatan otonomi bersama ternyata menjadi kualifikasi utama untuk AI dalam domain robot bawah air.

Jika kita melihat kasus-kasus sederhana atau lugas seperti mempelajari kendali kinematika kompleks atau mempelajari dinamika sistem, khususnya hidrodinamika, dari contoh-contoh melalui pembelajaran mesin, tampaknya mudah untuk mengabaikan umpan balik yang dibawa domain bawah air ke bidang AI secara umum. Faktanya, umpan balik tersebut jauh lebih kuat daripada yang terlihat pada pandangan pertama. Alih-alih hanya mampu menerapkan algoritma atau alat AI pada masalah yang diberikan, ternyata tantangan utamanya terletak pada integrasi solusi turunan dengan paket keseluruhan.

Artinya, mungkin mudah untuk menerapkan algoritma pembelajaran mesin (ML) untuk mengidentifikasi, misalnya, hidrodinamika robot bawah air tertentu, tetapi solusi ini tidak berguna, atau potensinya terbuang sia-sia, jika daya model yang dipelajari hanya digunakan untuk navigasi dan kontrol langsung dan tidak juga dimasukkan ke dalam perencanaan misi secara keseluruhan, dengan menggunakan model hidrodinamika sebagai penyedia parameter



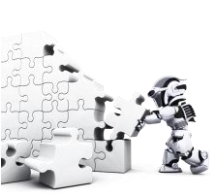
untuk, misalnya, meminimalkan konsumsi energi atau bahkan untuk mengidentifikasi titik serah terima dalam tugas otonomi manusia-robot bersama...

Sebagai catatan akhir tentang karya dalam buku ini, dapat diamati bahwa pelajaran yang telah dipetik adalah bahwa domain ini memaksa kita untuk memecahkan apa yang juga disebut sebagai masalah integrasi dalam AI. Seseorang mungkin berpendapat bahwa ini berlaku untuk semua area aplikasi AI, tetapi ini:

1. *tidak benar. Dalam sebagian besar aplikasi, mereka hanya berurusan dengan solusi untuk masalah tertentu dan tidak peduli untuk mengintegrasikan temuan mereka pada akhirnya hanya karena hal ini tidak diperlukan atau diminta...*
2. *tidak mempertimbangkan sifat sebenarnya dari domain ini, karena domain bawah air adalah lingkungan yang sangat menantang dan sebenarnya tidak kenal ampun. Oleh karena itu, setiap keputusan desain, baik dari desain perangkat keras maupun perangkat lunak, harus dievaluasi berdasarkan kinerja sistem secara keseluruhan dan potensinya untuk otonomi jangka panjang atau kemampuan untuk tetap otonom dalam jangka waktu yang lama...*

Kesimpulannya, catatan terakhir buku ini adalah bahwa domain ini memaksa kita, para peneliti AI, untuk melupakan pendekatan tradisional kita dalam memisahkan perangkat keras dari desain perangkat lunak dan menganggapnya sebagai satu langkah desain. Lebih dari itu, domain ini memaksa kita untuk mengesampingkan paradigma ilmu komputer tradisional lainnya, yaitu gagasan bahwa sistem perlu melakukan tugas tertentu, lalu beralih ke mode siaga atau dimatikan. Domain ini sebenarnya membutuhkan apa yang saya sebut 'tidak pernah mematikan sistem', yang merupakan kata lain untuk sistem otonom jangka panjang. Sistem ini akan membutuhkan kerangka kerja yang memungkinkan mereka untuk terus belajar, mengingat pengalaman mereka sehingga dapat digunakan dalam situasi selanjutnya, dan akhirnya membutuhkan sistem yang lebih menekankan pada cara mengorganisasikan pengetahuan daripada cara memperoleh pengetahuan baru.

Untuk mendukung catatan terakhir, mustahil bagi kendaraan bawah laut otonom untuk menggunakan sejuta contoh seperti apa bentuk pipa untuk mengidentifikasi pipa tersebut. Hal ini harus dicapai dalam sekali jalan dengan titik data minimum, alih-alih jutaan titik data. Oleh karena itu, algoritma pembelajaran berbasis data yang begitu populer dan banyak digunakan saat ini menjadi tidak berguna bagi AUV yang dihadapkan pada situasi baru dan belum pernah dialami sebelumnya. Ini berarti bahwa ranah bawah air memaksa kita untuk memikirkan kembali AI. Untuk menemukan pendekatan baru dan belum pernah ada sebelumnya, tujuan buku ini adalah untuk menyoroti tantangan ini dan merangsang keinginan serta kemauan beberapa orang di bidang AI untuk terlibat dalam upaya ini.



BAB 2

SENSOR CERDAS UNTUK ILMU KELAUTAN ABAD MENDATANG

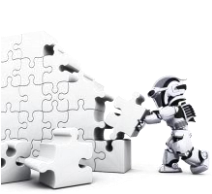
Bagian ini menjelaskan pengalaman enam tahun pengoperasian sensor laut yang terpasang permanen dan terkendali sepenuhnya dari jarak jauh serta fasilitas eksperimental di perairan pesisir Laut Utara bagian selatan dan di sistem fjord kutub "Kongsfjorden" di Svalbard dari tahun 2012 hingga 2018. Kondisi aktual dan tantangan dalam penggunaan teknologi sensor berbasis TI mutakhir di wilayah perairan dangkal dirangkum, berikut kekurangan dan kendala utama ketika teknologi sensor modern menghadapi kondisi sulit di wilayah pesisir di perairan beriklim sedang dan kutub. Saya secara khusus berfokus pada dua observatorium kabel COSYNA/MOSES yang dioperasikan bersama oleh Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz Centre for Marine- and Polar Research (AWI), dan Helmholtz-Centre-Geesthacht (HZG) di Laut Utara bagian selatan dan Samudra Arktik (dalam simpul bawah air COSYNA, hlm. 31–34; dalam Ocean Sci 13:379–410).

2.1 PENDAHULUAN

Berbicara tentang pengoperasian sensor laut secara umum, kita sering berpikir tentang sensor yang diturunkan dari kapal atau sensor yang dipasang pada wahana bawah air otonom (AUV) tanpa tambatan atau wahana kendali jarak jauh (ROV) yang dapat beroperasi di laut lepas hingga kedalaman air yang sangat dalam selama berjam-jam dan berhari-hari dengan dukungan kabel puser yang menyediakan daya dan transfer data. Namun, dengan mempertimbangkan topik-topik fokus penelitian aktual di bidang biologi dan oseanografi, khususnya yang berkaitan dengan perubahan iklim, kita mengetahui bahwa wilayah pesisir perairan dangkal sama pentingnya dengan lautan terbuka.

Meskipun wilayah ini kurang dari 10% lautan dunia, sebagian besar rekrutmen, produksi, dan keanekaragaman hayati laut berkaitan dengan wilayah perairan dangkal hingga kedalaman 50 m di sepanjang zona pesisir dunia, tempat cahaya menembus hingga ke dasar laut, menghasilkan komunitas benthik yang sangat beragam dan menjadi dasar bagi kehidupan laut. Banyak spesies laut (misalnya ikan) memiliki fase yang kurang lebih temporal di perairan pesisir, bahkan ketika sepenuhnya pelagis pada tahap kehidupan selanjutnya. Istilah "meroplankton" secara khusus menggambarkan seluruh komunitas plankton laut yang setidaknya sebagian bergantung pada habitat benthik, sebagian besar di wilayah perairan dangkal pesisir kita.

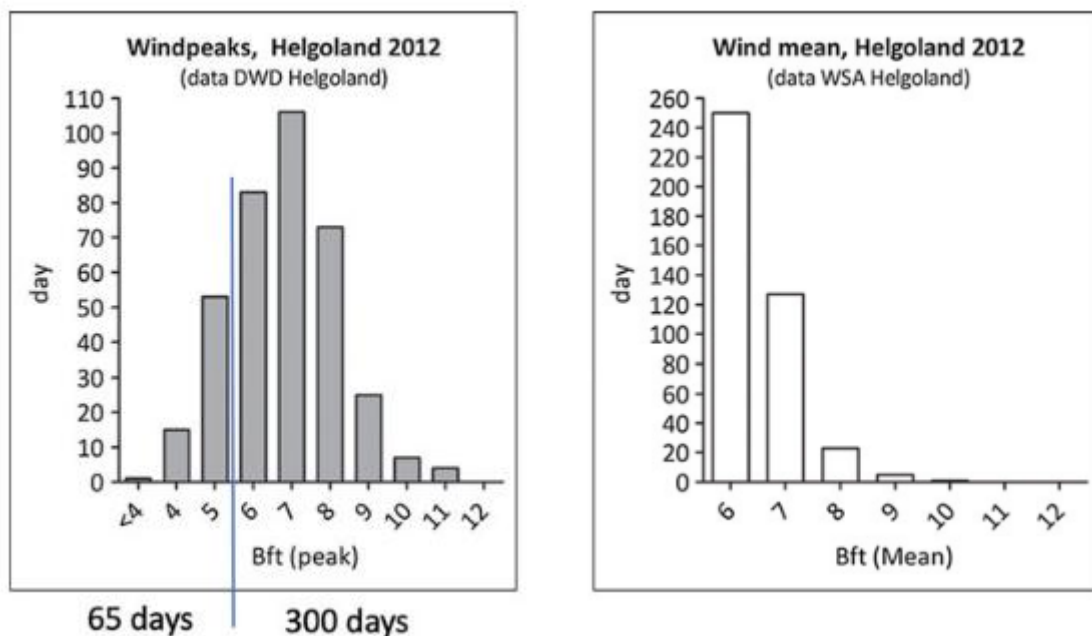
Di sisi lain, habitat pesisir semakin banyak digunakan oleh manusia. Sumber daya pesisir dieksploitasi secara besar-besaran, perairan pesisir digunakan secara intensif untuk transportasi barang, dan wilayah pesisir semakin banyak digunakan untuk produksi energi berbasis angin. Karena lebih dari 80% umat manusia tinggal kurang dari 100 km dari garis pantai, wilayah pesisir juga dimodifikasi secara antropogenik untuk melindungi wilayah berpenduduk dari ancaman gelombang badai dan banjir yang seringkali berkaitan dengan perubahan iklim. Oleh karena itu, memahami wilayah pesisir secara fungsional sangat penting,



tidak hanya bagi kehidupan laut, tetapi juga krusial bagi masa depan sosial-ekonomi yang berkelanjutan bagi umat manusia.



Gambar. 2.1 Laut Utara (kiri) dan Kongsfjord (kanan) dalam kondisi normal



Gambar. 2.2 Statistik angin dari Laut Utara 2012. Yang ditampilkan adalah jumlah hari per satuan Beaufort (bft)

Di sisi lain, mempelajari lingkungan pesisir perairan dangkal, terutama di daerah beriklim sedang dan kutub, seringkali menantang, tidak hanya terkait dengan kompleksitas ekosistemnya. Banyak dari wilayah ini dicirikan sebagai lingkungan berenergi tinggi dengan kondisi cuaca buruk, bahkan untuk periode yang lebih lama dalam setahun (Gambar 2.1). Laut Utara (misalnya) sebagai badan air pesisir paling produktif, ekologis, dan penting secara ekonomi di belahan bumi utara dicirikan oleh kecepatan angin rata-rata sekitar 10 m s^{-1} dengan puncak angin di atas 5 Beaufort (bft) dalam lebih dari 300 hari per tahun (Gambar 2.2, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie BSH).

Kondisi cuaca buruk seperti itu sangat mengurangi hari-hari yang tersedia untuk pengukuran lapangan dan penilaian oseanografi atau biologi in situ, terutama di daerah pesisir



beriklim sedang dan kutub yang sering kali mengalami cuaca terlalu buruk, suhu terlalu rendah, atau cahaya tidak tersedia, sehingga kerja lapangan yang intensif, terutama dengan kapal penelitian yang lebih kecil, menjadi sangat terbatas.

2.2 PENTINGNYA ONLINE SELAMA WAKTU YANG RELEVAN

Gambar 2.3 menunjukkan fenomena klasik tambahan saat mengambil sampel suatu ekosistem. Gambar (garis merah) menunjukkan pola temporal, misalnya, populasi plankton dalam siklus harian. Setiap hari, komunitas menunjukkan kelimpahan maksimum dan minimum, mungkin dengan maksimum pada malam hari dan minimum pada siang hari.

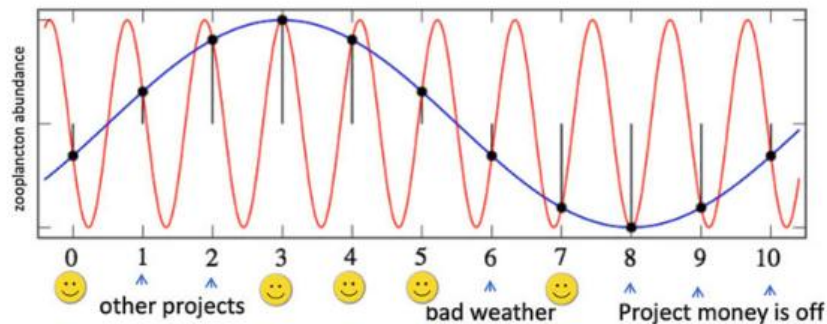
Garis biru, di sisi lain, menunjukkan apa yang terjadi jika kita mengambil sampel komunitas sekali sehari. Kita menerima pola sinusoidal yang teratur dan sempurna dalam sampel, tetapi pola sinusoidal ini tidak ada hubungannya dengan fluktuasi organisme yang sebenarnya. Kita menyebutnya alias sampling yang dijelaskan oleh apa yang disebut "teorema Nyquist" yang menyatakan bahwa kita hanya dapat mendeteksi pola temporal tertentu dalam suatu komunitas ketika kita mengambil sampel komunitas ini dengan frekuensi setidaknya dua kali lipat dari pola temporal sebenarnya yang terjadi. Di dunia nyata, situasinya bahkan lebih kritis karena kita seringkali tidak dapat menjamin frekuensi pengambilan sampel yang teratur seperti yang ditunjukkan pada garis biru. Sketsa menunjukkan bahwa pada hari pertama, pengambilan sampel berhasil. Pada hari kedua dan ketiga, kapal dipesan oleh proyek lain. Pada hari ketiga hingga kelima, kita bisa melaut, tetapi pada hari keenam, kondisi cuaca terlalu buruk.

Kemudian, pada hari kedelapan, dimungkinkan untuk mengambil sampel lain, tetapi sejak hari itu, tidak ada lagi dana yang diberikan. Secara total, hanya lima sampel yang tersedia. Berdasarkan data ini, kita bahkan tidak memiliki kesempatan untuk menemukan pola sebenarnya di balik pola alias tersebut. Itu berarti kita harus melakukan pengambilan sampel lebih sering jika kita ingin menemukannya. Secara matematis, daya skema pengambilan sampel jauh dari cukup dan tidak mendekati daya yang cukup. Di wilayah pesisir, kekurangan data ini bahkan lebih kritis dibandingkan dengan perairan laut lepas. Meskipun dalam sistem perairan biru, model yang sangat baik dan kapasitas penelitian prediktif yang menyeluruh tersedia untuk tujuan menghitung dan meramalkan hubungan fungsional antara dinamika oseanografi dan biota terkait di kolom air, bahkan dalam skala yang lebih besar, kemampuan ini jauh lebih terbatas di wilayah pesisir. Ekosistem pesisir sangat beragam dalam ruang dan waktu, dan "ekosistem" yang berbeda (daerah dasar laut yang keras, padang lamun, dll.) seringkali terletak di wilayah yang sama tetapi tetap bertindak sebagai "unit fungsional" yang terpisah.

Oleh karena itu, memahami proses pesisir dan fungsi ekosistem seringkali berarti menilai berbagai variabel lingkungan yang saling berinteraksi, tidak hanya selama satu kali pengambilan sampel, tetapi juga untuk jangka waktu yang lebih lama dan dalam kondisi lingkungan dan hidrografi yang berbeda. Oleh karena itu, pemahaman proses integratif perairan pesisir dangkal bergantung pada ketersediaan data temporal dan spasial yang relatif tinggi. Namun, ketersediaan data ini seringkali tidak tersedia karena kurangnya waktu



pelayaran untuk proyek pemantauan pesisir, kondisi cuaca buruk untuk melakukan pelayaran tersebut, dan terakhir karena kita tidak memiliki grid pengukuran berbasis ilmiah yang mencakup garis pantai dengan resolusi temporal dan spasial yang memadai.



Gambar. 2.3 Teorema pengambilan sampel Nyquist: Pengambilan sampel alias (biru) saat mengambil sampel situasi dunia nyata (merah) dengan frekuensi yang “salah”

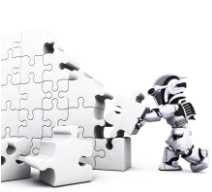
2.3 PERKEMBANGAN TEKNOLOGI OBSERVATORIUM BAWAH AIR KABEL

Mengingat kebutuhan akan cakupan data yang lebih baik dan andal di banyak garis pantai dunia, observatorium bawah air telah berkembang selama beberapa dekade terakhir. Meskipun sebagian besar observatorium ini, seperti misalnya MARS (Monterey Accelerated Research System), VENUS (Victoria Experimental Network Under the Sea), NEPTUNE (North–East Pacific Time-series Undersea Networked Experiments) atau ALOHA telah dipasang di laut dalam, beberapa di antaranya juga dirancang untuk aplikasi air dangkal seperti observatorium kabel “SmartBay” di Galway Bay—Irelandia pada kedalaman air sekitar 22 m observatorium kabel EMSO-Molène di Atlantik pada kedalaman air sekitar 18 m dan observatorium Laut Mediterania EMSO-Nice pada kedalaman air sekitar 21 m dan Observatorium OBSEA di kedalaman air 20 m

Tidak diragukan lagi bahwa observatorium bawah air kabel yang dikendalikan dari jarak jauh merupakan teknologi masa depan yang melengkapi kampanye pengambilan sampel intensif berbasis kapal, terutama di wilayah pesisir dangkal. Mendekati pantai dari perspektif laut, kompleksitas oseanografi dan biologi seringkali meningkat beberapa kali lipat sehingga sebagian besar model mengecualikan wilayah pesisir dangkal karena kurangnya kapasitas prakiraan atau bahkan prakiraan. Untuk meningkatkan kedalaman penetrasi dan kapasitas prakiraan model oseanografi dan biologi modern terhadap garis pantai, prosedur asimilasi data seringkali disertakan dalam model pesisir yang memungkinkan penyerapan data sensor waktu nyata atau mendekati waktu nyata ke dalam model. Namun, prosedur ini membutuhkan data sensor yang akurat dan presisi dari stasiun, yang beroperasi sepanjang tahun.

2.4 PENGALAMAN DALAM TEKNOLOGI OBSERVATORIUM BAWAH AIR BERKELANJUTAN

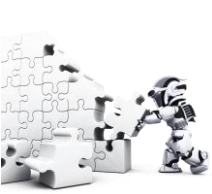
Di bagian ini, saya menjelaskan beberapa aspek, pengalaman, dan kebutuhan masa depan dalam pengembangan infrastruktur dan teknologi untuk memungkinkan pemanfaatan dan integrasi teknologi TI modern yang lebih baik dalam penelitian pesisir.



Sebelum membahas kebutuhan dan tantangan utama dalam pengembangan teknologi di bidang ilmu pesisir, hal terpenting adalah membahas implikasi lingkungan laut itu sendiri terhadap perkembangan teknologi tersebut. Pengalaman kami selama beberapa tahun terakhir dengan jelas menunjukkan bahwa banyak sensor berteknologi tinggi bekerja dengan sempurna di laboratorium dan juga dalam kondisi pengujian jangka pendek, namun gagal dalam operasi jangka panjang, terutama dalam kondisi lingkungan yang seringkali keras di wilayah pesisir. Hal ini sangat penting ketika sensor atau instalasi ilmiah lainnya akan digunakan dalam eksperimen yang dikendalikan dari jarak jauh di area yang tidak memiliki akses langsung untuk jangka waktu yang lebih lama dalam setahun, misalnya wilayah kutub atau laut dalam. Namun, sayangnya terdapat kekurangan yang signifikan dari lokasi uji in situ di perairan Jerman dan Eropa di mana teknologi bawah air maritim dapat diuji secara menyeluruh dalam jangka waktu yang lebih lama dalam kondisi yang realistis.

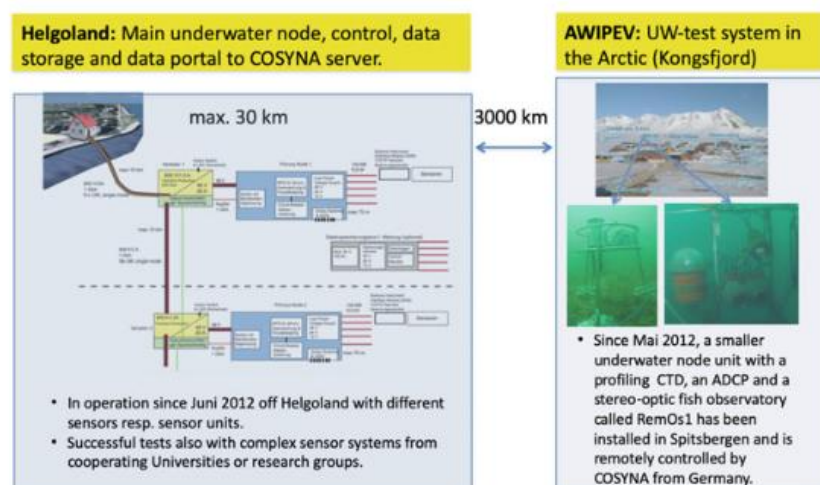
Untuk mengatasi kurangnya fasilitas pengujian untuk teknologi sensor maritim, AWI bersama dengan Helmholtz Centre Geesthacht (HZG) mendirikan lapangan eksperimen bawah air yang disebut “Margate” di utara Helgoland di Laut Utara bagian selatan (Gambar 2.4) pada tahun 2010. Lapangan percobaan bawah air ini terletak di LU 54° 11.000/BT 07° 52.00 (WGS84) sekitar 500 m di utara Helgoland pada kedalaman air 5–10 m (tergantung pasang surut) dan berukuran sekitar 300 m x 100 m. Awalnya dirancang sebagai lokasi penelitian untuk mengetahui pengaruh struktur pelindung pantai buatan terhadap komunitas ikan benthik dan makroinvertebrata. Untuk proyek ilmiah yang sedang berlangsung ini, lapangan ini berisi enam lapangan tetrapoda setinggi 2,5 m (pemecah gelombang beton setinggi empat kaki, lihat grafik) pada kedalaman air 5 dan 10 m (dengan dukungan perusahaan konstruksi HC Hagemann Hamburg, Jerman) yang berfungsi sebagai struktur uji buatan. Pada musim panas 2012, lapangan MarGate ditingkatkan secara signifikan dengan pemasangan sistem simpul bawah air Jerman pertama yang dikembangkan dalam kerangka COSYNA (Observatorium Pesisir Laut Utara dan Arktik).

Sejak 2017, lapangan ini menjadi bagian dari proyek MOSES (Solusi Observasi Modular untuk Sistem Bumi). Saat ini, sistem ini menyediakan daya dan akses jaringan bawah air yang berkelanjutan dan terkelola pada 10 port dok bawah air terpisah yang dapat dihubungkan, masing-masing menyediakan koneksi jaringan 48 V/200 W dan 100 Mbit/1 Gbit. Setiap port dapat dialamatkan dan dikelola secara individual oleh pengguna terdaftar (=pemilik sensor) dari mana pun di dunia untuk mengendalikan dan mengelola unit sensor yang kompleks sekalipun sepenuhnya dari jarak jauh (Gambar 2.5).



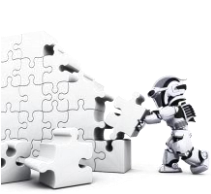


Gambar 2.4 Area percobaan MarGate di lepas pantai Helgoland (Foto Alfred Wegener Institut)



Gambar. 2.5 Tata letak umum observatorium bawah air kabel COSYNA.

Untuk memantau parameter hidrografi dari area tersebut, AWI mengoperasikan beberapa sistem sensor untuk variabel abiotik dan biotik utama (suhu, salinitas, kedalaman, pasang surut, kekeruhan, oksigen, fluoresensi Chl-a, arus 3D) secara hampir seketika (penundaan sekitar 1 jam). Selain itu, Pusat Penyelaman Ilmiah AWI menyediakan dukungan penyelam ilmiah yang sangat terlatih sepanjang tahun untuk pengaturan dan pemeliharaan sensor serta perangkat eksperimen di area tersebut. Sejak 2010, berbagai studi nasional dan internasional (termasuk tesis Sarjana dan Magister) telah dilakukan di bidang eksperimen bawah air "MarGate", mulai dari studi jangka pendek yang hanya berlangsung beberapa minggu hingga studi jangka panjang yang direncanakan dan dilaksanakan selama beberapa tahun.



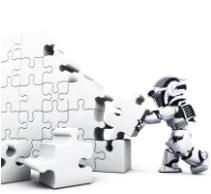
Dari tahun 2015 hingga 2018, bidang eksperimen bawah air MarGate diklasifikasikan sebagai lokasi uji coba bawah air resmi untuk proyek Uni Eropa JERICO NEXT yang memberikan dukungan finansial untuk akses internasional. Sejak 2019, lokasi uji coba bawah air MarGate maupun observatorium bawah air di Svalbard secara resmi diakui sebagai lokasi uji coba bawah air untuk proyek Uni Eropa JERICO 3, proyek lanjutan dari Jericho NEXT. Berdasarkan pengalaman lapangan uji MarGate yang dijelaskan di atas di Laut Utara bagian selatan, konsorsium AWI-HZG membangun lokasi uji bawah air kutub kedua, "observatorium bawah air AWIPEV" di sistem fyord Arktik Kongsjorden pada koordinat LU 78° 54.200/BT 11° 54.00 (WGS84) pada tahun 2012 dengan kedalaman air sekitar 12 m (Gambar 2.5 dan 2.6). Sama seperti di Laut Utara bagian selatan, lokasi ini juga dilengkapi dengan observatorium bawah air berkabel untuk pengoperasian sensor yang berkelanjutan sepanjang tahun dan aktivitas eksperimen in situ.

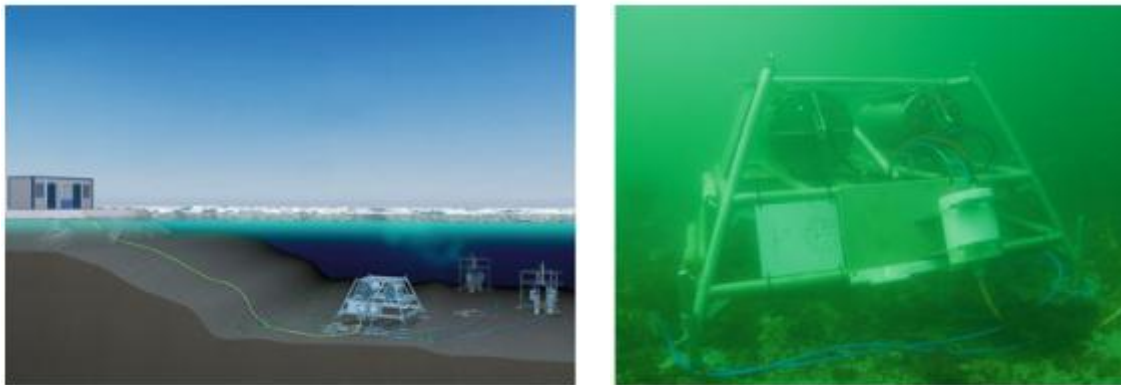
2.5 KEMAJUAN DALAM ILMU LINGKUNGAN OLEH OBSERVATORIUM KABEL

Tujuan utama peningkatan aktivitas dalam pengembangan dan pengoperasian teknologi observatorium bawah air kabel di Pusat Helmholtz AWI dan HZG adalah untuk mendapatkan akses permanen ke area penelitian fokus yang relevan dengan perubahan iklim, bahkan dalam kondisi ekstrem, misalnya angin kencang atau badai di Laut Utara bagian selatan atau selama musim dingin di Samudra Arktik. Akses permanen ini sangat penting untuk mengatasi keterbatasan waktu dalam melihat ekosistem target penelitian selama fase-fase yang relevan.

Gambar 2.7, misalnya, menunjukkan sistem sensor optik yang beroperasi penuh, yang khusus dikembangkan untuk operasi jarak jauh terhubung kabel, menyediakan akses sepanjang tahun ke ekosistem perairan dangkal Kongsfjorden di Svalbard. Sistem ini menggunakan algoritma analisis pencitraan stereoskopik untuk "mengambil sampel" organisme tingkat trofik yang lebih tinggi yang sepenuhnya dikendalikan dari jarak jauh. Unit ini tidak hanya dapat mengukur kepadatan ikan absolut dalam individu per m³, tetapi juga komposisi spesies ikan dan bahkan distribusi frekuensi panjang sepanjang tahun dalam resolusi temporal yang tinggi. Sistem ini dapat bergerak dengan kendali jarak jauh di kolom air sehingga memungkinkan pengambilan sampel yang terstratifikasi di kolom air sepanjang tahun, bahkan ketika tidak ada cahaya sama sekali selama beberapa bulan dalam setahun dan suhu turun hingga -30 °C untuk jangka waktu yang lebih lama.

Gambar 2.8 menunjukkan hasil kampanye pengambilan sampel jarak jauh dari tahun 2013 hingga 2014 di sistem Kongsfjorden di Svalbard. Pada sumbu x, Anda dapat melihat bulan-bulan yang berbeda selama periode pengambilan sampel, dan pada sumbu y, kelimpahan ikan dan komposisi spesies diplot dalam satuan tangkapan per unit upaya, yang berarti jumlah ikan per volume pengambilan sampel.

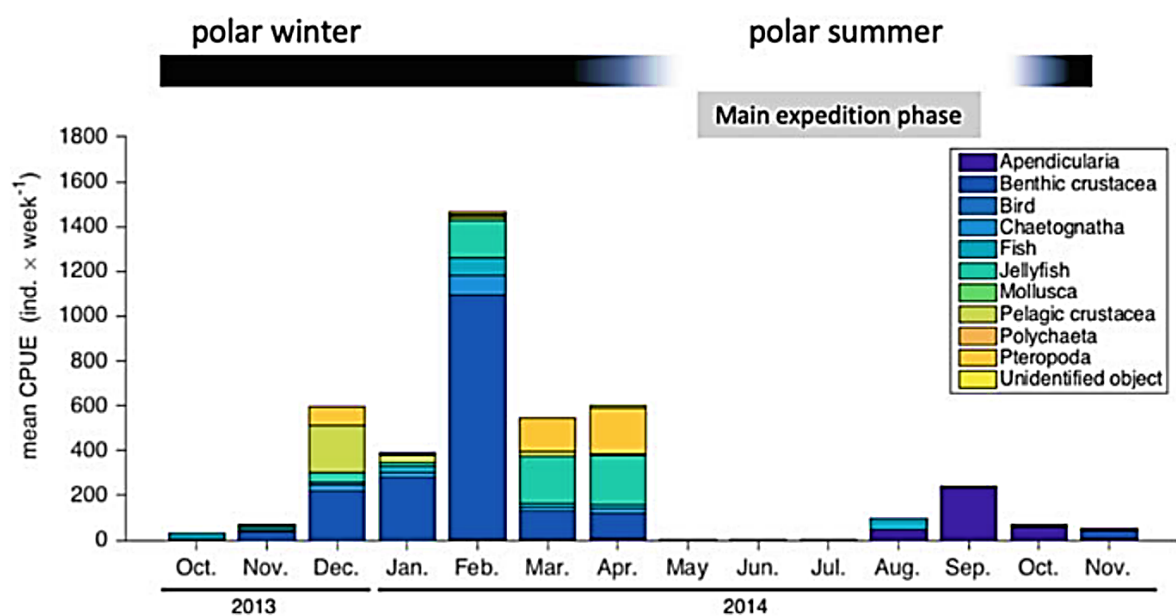




Gambar. 2.6 Sketsa (kiri) dan gambar nyata (kanan) dari pengaturan observatorium bawah air AWIPEV di Kongsfjorden, Svalbard



Gambar. 2.7 Observatorium stereoskopik bawah air RemOs1 untuk mengukur kelimpahan ikan, komposisi spesies, dan distribusi frekuensi panjang ikan



Gambar. 2.8 Kelimpahan ikan dan komposisi spesies selama kampanye pengambilan sampel tahun 2013 hingga 2014 di sistem fjord kutub Svalbard Spitsbergen.



Gambar menunjukkan pola musiman yang khas dalam sistem fjord ini dengan kelimpahan maksimum di musim dingin dan nilai terendah di musim panas. Di atas grafik, periode ekspedisi utama dalam setahun peneliti ditampilkan, yaitu selama bulan Mei dan September. Grafik tersebut dengan jelas menunjukkan bahwa selama beberapa tahun terakhir, kami berada di lokasi tepat ketika kelimpahan dan keanekaragaman spesies terendah dalam sistem. Dengan menerapkan sensor kendali jarak jauh otomatis penuh baru yang dijelaskan di atas, kami dapat mengamati sistem sepanjang tahun. Berdasarkan data ini, kami membahas strategi pengambilan sampel dan opsi untuk memperbaiki ketidaksesuaian antara pengambilan sampel ilmiah dan struktur komunitas di dunia nyata. Akhirnya, kami sampai pada kesimpulan bahwa, demi alasan keamanan, kami tidak akan pernah dapat melakukan pengambilan sampel klasik dengan kapal atau peralatan pengambilan sampel yang didukung penyelaman dalam resolusi temporal yang memadai selama kondisi ekstrem di musim dingin kutub. Oleh karena itu, kami memutuskan untuk menginvestasikan lebih banyak waktu, tenaga, dan uang dalam pengembangan sensor otomatis yang cerdas, kendali jarak jauh, dan memungkinkan kami berada di lokasi sepanjang tahun tanpa harus berada di lokasi secara fisik.

Aspek penting kedua yang dipertimbangkan selama diskusi kami tentang pengambilan sampel jarak jauh berbasis TI versus pengambilan sampel langsung klasik di lokasi adalah pertimbangan perawatan hewan. Dalam kampanye pengambilan sampel jarak jauh yang ditunjukkan di atas, kami menghitung, mengidentifikasi, dan mengukur lebih dari 5000 spesimen dari 9 kelompok organisme di kawasan kutub yang dilindungi secara lingkungan yang sepenuhnya non-invasif tanpa membahayakan satu pun hewan. Dengan menggunakan metode penilaian klasik seperti pengambilan sampel jaring insang diskret atau jaring fyke, setidaknya sebagian besar hewan tersebut akan dibunuh demi kepentingan ilmiah karena mereka tidak akan selamat dari prosedur penangkapan. Oleh karena itu, penggunaan prosedur pengambilan sampel non-invasif yang dikendalikan dari jarak jauh dan cerdas berbasis TI dan AI tidak hanya menguntungkan dalam hal efisiensi pengambilan sampel atau pengurangan sumber daya manusia yang dibutuhkan di lapangan, tetapi juga dapat berkontribusi secara signifikan terhadap pendekatan kami terhadap ilmu pengetahuan berkelanjutan non-invasif di area dan habitat yang sensitif terhadap lingkungan. Alat ukur berbasis TI atau AI tentu saja tidak akan pernah menggantikan pengambilan sampel organisme klasik karena beberapa analisis memerlukan sampel nyata.

Namun, teknologi baru dalam ilmu pengetahuan in situ akan memberi kita kesempatan untuk mengurangi pengambilan sampel invasif sejauh yang diperlukan dan melengkapi metodologi ini dengan metode non-invasif berbasis TI dan AI. Selain aplikasi yang sangat spesifik dari observatorium kabel dan teknologi sensor otomatis yang dijelaskan di atas, misalnya dalam studi populasi ikan, sistem tersebut juga memberikan kesempatan untuk menyelesaikan penilaian spesifik dengan perekaman berkelanjutan variabel hidrografi tambahan seperti suhu air, salinitas atau parameter terkait biota seperti klorofil a atau radiasi aktif fotosintesis.

Data ini, yang diambil sampelnya dalam jangka waktu yang lebih lama dan dengan resolusi temporal tinggi sepanjang tahun memberikan kemungkinan unik untuk

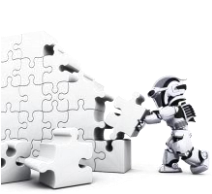
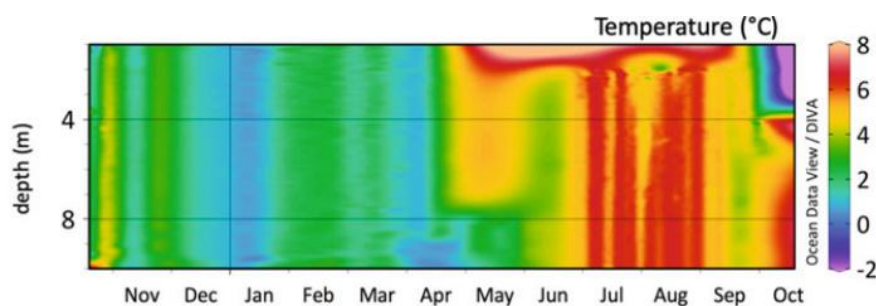


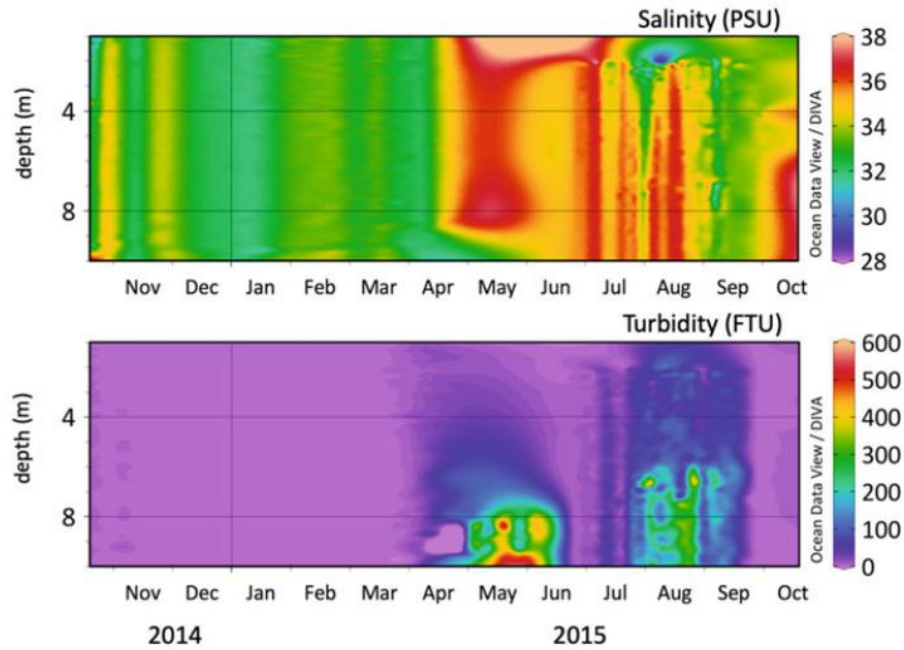
menyelesaikan juga pola dan dinamika jangka pendek dalam ekosistem yang tidak akan pernah diselesaikan dengan misalnya kampanye pengambilan sampel bulanan. Namun, peristiwa jangka pendek dan hubungan serta implikasinya terhadap tren jangka panjang semakin mendapat perhatian dalam banyak disiplin ilmu lingkungan dan diasumsikan secara signifikan memengaruhi dinamika sistem bumi dan hubungan ekosistem kita. Hal ini terutama penting di lingkungan yang sensitif seperti wilayah pesisir, kutub, atau laut dalam yang terkenal sebagai area penelitian fokus ilmu iklim, tetapi aksesnya terbatas karena kendala teknologi atau lingkungan, sehingga tidak termasuk dalam skema pengambilan sampel rutin yang diperlukan (Gambar 2.9).

2.6 SAINS BERTEMU REALITAS OPERASIONAL IN SITU

Namun, ketika berbicara tentang perkembangan teknologi kelautan di masa depan, kita juga harus menyadari bahwa kita masih memiliki banyak kekurangan dalam teknologi, terutama ketika berbicara tentang sensor untuk paparan jangka panjang. Gambar 2.10 menunjukkan salah satu sistem simpul bawah air kami di Laut Utara bagian selatan tepat setelah pemasangan pada Juli 2012 dan 8 bulan kemudian.

Sistem ini dipulihkan pada Maret 2013 setelah 9 bulan terpapar karena kegagalan total pada catu daya dan konektivitas internet. Gambar di sebelah kanan menunjukkan dampak nyata yang sangat besar pada sistem dalam bentuk biofouling. Interaksi teknologi-biologi yang masif ini dapat berdampak serius pada bagian-bagian penting sistem melalui disintegrasi komponen inti yang diinduksi secara biologis. Dalam kegagalan yang dijelaskan di atas, larva kerang kecil berukuran hanya beberapa mikrometer menembus celah konektor bawah air yang dapat dicolokkan dan menetap di sana. Setelah hanya beberapa bulan, larva tersebut membesar dan mendorong steker konektor 1000 V keluar dari soket, mengakibatkan korsleting besar-besaran pada saluran listrik. Contoh lain ditunjukkan pada Gambar 2.11. Di sana terdapat probe CD yang mengukur suhu, salinitas, kekeruhan, oksigen, dan parameter air lainnya. Setelah beberapa bulan terpapar, sensor tersebut tumbuh terlalu besar sehingga menimbulkan kemungkinan besar kesalahan sensor dan kegagalan data selama pengoperasian. Oleh karena itu, instalasi ini memerlukan perawatan dan pembersihan berkelanjutan atau/dan prosedur manajemen data dan pengendalian kualitas data yang sangat baik.





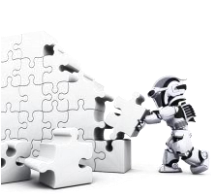
Gambar 2.9. Suhu, salinitas, dan kekeruhan di sistem fjord Arktik (Kongsfjorden, Svalbard) dari November 2014 hingga Oktober 2015 dalam resolusi temporal 1 Hz



Gambar 2.10. Elemen inti sistem simpul bawah air sesaat setelah paparan (gambar kiri) dan setelah 8 bulan di bawah air (gambar kanan)



Gambar 2.11. Unit sensor CTD setelah 8 bulan paparan di perairan dangkal produktif di Laut Utara bagian selatan



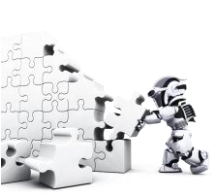
2.7 PERSYARATAN DAN VISI TEKNOLOGI SENSOR IN-SITU ILMIAH

Merangkum pengalaman dari tahun 2012 hingga 2018 dengan sensor yang terpapar jangka panjang dan dikendalikan dari jarak jauh di Laut Utara dan Arktik, persyaratan yang sangat spesifik berikut dalam pengembangan sensor dan teknologi pendukung sensor berbasis TI dan AI telah muncul selama beberapa tahun terakhir. Namun, perlu disebutkan bahwa poin-poin yang dipilih hanyalah contoh dan berkaitan erat dengan teknologi observatorium bawah air kabel yang kami gunakan, dan daftarnya mungkin berbeda di berbagai bidang penelitian kelautan. Poin-poin ini dapat berfungsi sebagai langkah awal untuk mengidentifikasi dan membahas beberapa kesenjangan utama dalam teknologi TI kelautan yang tersedia yang mungkin dapat diatasi oleh solusi AI di masa mendatang, terlepas dari kompartemen kelautan mana yang dipertimbangkan. Di bagian kedua dari bagian ini, saya berfokus pada konteks yang lebih luas sehubungan dengan persyaratan masa depan di bidang dukungan AI dalam ilmu kelautan. Topik-topik yang dibahas juga didasarkan pada pengalaman kami dalam ilmu pesisir kelautan, tetapi lebih mencerminkan visi tentang apa yang dapat dicapai AI dalam ilmu pesisir kelautan.

Diskusi visi ini didasarkan pada temuan bahwa meskipun kesenjangan teknologi kita dalam ilmu sensor kelautan cukup heterogen tergantung pada bidang keahliannya, ada semacam garis merah yang menghubungkan sebagian besar topik ini, fakta bahwa sebenarnya tidak mungkin untuk berkomunikasi secara nirkabel di bawah air dalam jarak yang lebih jauh dengan kecepatan transfer data yang lebih tinggi. Dibandingkan dengan aplikasi terestrial atau atmosfer, di mana komunikasi nirkabel merupakan teknologi tulang punggung dalam teknologi sensor jarak jauh dan transfer data, teknologi ini tidak dan tidak akan tersedia dalam waktu dekat untuk aplikasi bawah air.

Oleh karena itu, sensor atau unit eksperimental di bawah air harus dihubungkan dengan kabel agar dapat dikendalikan dari jarak jauh atau otonom. Namun, sejauh ini, "otonom" dalam ilmu kelautan terutama berarti bahwa sensor sederhana seperti rantai termistor atau profiler doppler arus akustik diekspos di area tertentu dan secara otonom mengumpulkan data untuk waktu yang lebih lama. Meskipun dalam dua dekade terakhir, peningkatan yang signifikan telah dibuat dalam tingkat otonomi sensor, dan saat ini, kendaraan bawah air otonom (AUV) bahkan dapat dibeli dari rak, otonomi masih berarti bahwa satu unit diprogram, misalnya untuk mengikuti trek tertentu atau untuk profil "otonom" dalam kolom air tertentu.

Namun, tantangan ilmiah saat ini adalah untuk memetakan 4D, misalnya batas dan gradien hidrografi laut di badan air, pusaran laut jangka pendek atau jangka panjang yang membentuk pola 3D kompleks yang berubah seiring waktu atau untuk mengikuti plankton kawanan ikan dari waktu ke waktu untuk lebih memahami hubungan fungsional antara hidrosfer dan biosfer dalam sistem laut. Hal ini terutama menantang di perairan pesisir di mana kompleksitas lanskap bawah laut sangat tinggi dan keanekaragaman komunitas juga sangat kompleks.



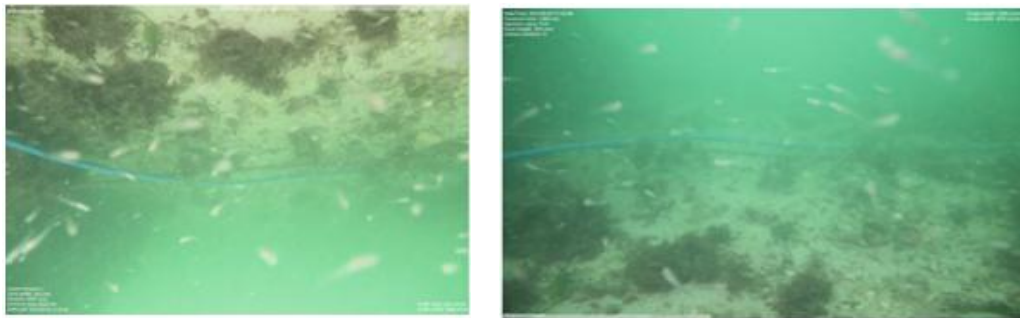
2.8 AI UNTUK PENINGKATAN TEKNOLOGI SPESIFIK

Pengalaman kami menunjukkan dengan jelas bahwa sebagian besar sensor dirancang untuk waktu paparan singkat, hanya beberapa jam atau hari, sehingga sensor-sensor ini tidak cocok untuk operasi jangka panjang. Hampir tidak ada sensor yang kami operasikan yang tidak memiliki atau tidak memiliki perlindungan yang efisien terhadap biofouling. Sayangnya, sangat jauh dari kenyataan bahwa produsen sensor akan mengembangkan mekanisme tersebut dalam waktu dekat karena, meskipun masalahnya tampak jelas, realisasi untuk mencapai keberhasilan pembersihan 100% sangatlah sulit. Satu-satunya cara sejauh ini bagi sebagian besar operator sensor jangka panjang di perairan dangkal yang produktif adalah dengan mengirimkan penyelam ke sensor untuk memeriksa terlebih dahulu berbagai sensor jika pembersihan diperlukan, dan jika perlu, membersihkan sensor secara manual dengan cermat. Di instalasi kami, yaitu di Laut Utara, prosedur ini harus dilakukan hingga seminggu sekali, terutama selama musim panas, dan oleh karena itu membutuhkan upaya yang signifikan dalam hal waktu dan tenaga. Oleh karena itu, sebagian besar operator sensor membahas perlunya perangkat pembersih sensor cerdas yang secara berkala memeriksa sensor, memutuskan apakah pembersihan diperlukan, dan jika ya, melakukan pembersihan dengan hati-hati dan tidak merusak sensor itu sendiri. Sepengetahuan saya, sebenarnya tidak ada sistem operasi otonom yang tersedia (kecuali untuk penyelam terlatih) yang mampu melakukan tugas yang kurang disukai namun penting ini di bawah air untuk menjamin data yang baik dan andal dari sensor yang terpapar dalam jangka panjang.

- (1) Masalah utama lainnya dalam pengembangan sensor di masa depan adalah sebagian besar sensor bahkan tidak memiliki prosedur komunikasi modern yang mendasar. Saat ini, bahkan peralatan TI yang paling sederhana seperti printer pun memiliki prosedur dan perangkat lunak penyambungan ulang otomatis yang sepenuhnya "cerdas" sehingga peralatan tersebut tersambung kembali secara otomatis setelah listrik mati atau koneksi terputus. Sebagian besar peralatan TI industri dan konsumen memiliki rutinitas instalasi dan kalibrasi mandiri serta berinteraksi dengan repositori nasional atau internasional untuk driver, pembaruan sistem, atau prosedur perbaikan. Sayangnya, hal ini tidak terjadi pada sebagian besar sensor laut yang seringkali tidak memiliki prosedur penyambungan plug-in yang paling sederhana. Oleh karena itu, tren masa depan dalam pengembangan sensor cerdas membutuhkan inovasi teknologi untuk pengembangan teknologi pemantauan cerdas dengan mekanisme perbaikan otomatis jika perangkat lunak bermasalah, serta fungsi peringatan yang andal jika terjadi kegagalan kontak. Ilmu kelautan sangat membutuhkan teknologi sensor cerdas canggih yang bekerja tanpa pengawasan, termasuk transfer dan pengumpulan informasi tentang metadata sensor dan tindakan sensor untuk mengurangi interaksi manusia dan kegagalan manusia dalam pengoperasian sensor laut.
- (2) Pelajaran lain yang dipetik selama beberapa tahun terakhir dalam pengoperasian sensor jangka panjang membahas prosedur manajemen data dan verifikasi data yang juga belum dirancang untuk pengoperasian sensor otomatis yang intensif waktu dan berkelanjutan dalam jangka panjang. Prosedur manajemen data dan validasi data



terkini masih didasarkan pada interaksi manusia, dan ilmuwan terlatih harus memeriksa data secara manual. Saat ini, validasi data sensor dalam penelitian kelautan masih dilakukan dengan memplot data secara manual dan mengamati grafik data setiap jam. Hal ini dimungkinkan jika eksperimen hanya berjalan dalam waktu yang lebih singkat, yaitu 2-3 hari, tetapi tidak demikian halnya jika satu atau beberapa sensor beroperasi 24 jam sehari, 365 hari setahun. Dalam teknologi kelautan dan manajemen data, kita masih jauh dari menggunakan analisis data mutakhir dengan pendekatan pembelajaran mesin atau kecerdasan buatan untuk memeriksa plausibilitas dan validasi data secara otomatis. Teknologi berbasis mesin modern dapat berkontribusi secara signifikan terhadap analisis data, termasuk analisis kesenjangan data dan inklusi data yang hilang, serta prosedur pemodelan cerdas untuk prediksi data sensor yang dapat digunakan untuk prosedur pemeriksaan plausibilitas daring, terutama dalam sistem data dan sensor yang kompleks.



Gambar 2.12 Citra kiri dan kanan dari sistem pencitraan stereoskopik bawah air untuk mengukur kelimpahan ikan, komposisi spesies ikan, dan distribusi frekuensi panjang ikan

- (3) Pelajaran terakhir yang kita pelajari selama beberapa tahun terakhir berkaitan dengan analisis data kompleks seperti pencitraan bawah air frekuensi tinggi dan resolusi tinggi. Gambar 2.12 menunjukkan contoh data citra stereoskopik dari salah satu sistem simpul kami di Svalbard.

Citra tersebut menunjukkan kawanan ikan yang difoto oleh dua kamera sistem stereoskopik. Untuk menganalisis ikan pada citra berdasarkan panjangnya, kita harus menandai, misalnya, kepala dan ekor setiap ikan pada citra kiri. Setelah itu, ikan yang sama harus diidentifikasi pada citra kanan dan ikan tersebut harus ditandai kembali pada citra ini. Untuk menganalisis satu citra, seorang ahli ekologi ikan seringkali membutuhkan waktu hampir 30 menit per citra, padahal satu citra berisi 40 atau 50 ikan. Untuk 48 pasang citra per hari, seorang ilmuwan terlatih membutuhkan waktu 24 jam sehari untuk mengevaluasi aliran data ini secara terus-menerus dan daring. Ilmu berbasis analisis citra semakin penting di hampir semua disiplin ilmu, termasuk di bidang kelautan.

Meskipun perangkat dan algoritma analisis citra telah meningkat secara signifikan selama beberapa tahun terakhir, sebagian besar perangkat dan prosedur ini dirancang untuk



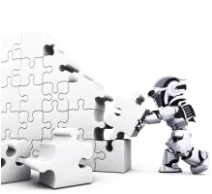
citra berkualitas tinggi di darat dan gagal total untuk citra bawah air yang seringkali kurang terang dan terkadang buram. Oleh karena itu, ilmu kelautan sangat membutuhkan perangkat dan algoritma baru yang cerdas untuk analisis citra yang cepat, andal, dan sebagian besar tanpa pengawasan agar dapat memanfaatkan potensi perangkat keras yang telah ditingkatkan secara signifikan dalam pencitraan bawah air selama beberapa tahun terakhir dengan lebih baik.

2.9 TEKNOLOGI ILMU KELAUTAN MENGGUNAKAN KECERDASAN BUATAN

Menjawab pertanyaan-pertanyaan masa depan dalam ilmu kelautan, terutama dalam konteks perubahan iklim dan prediksi peningkatan frekuensi kejadian ekstrem, misalnya di wilayah pesisir, kemungkinan besar keberhasilannya hanya akan bergantung pada peningkatan tingkat otomatisasi sensor kita. Menargetkan pertanyaan-pertanyaan di atas berarti bahwa sensor, unit sensor, dan platform pembawanya harus menjadi tidak hanya sepenuhnya otomatis tetapi juga "cerdas" pada tingkat yang jauh lebih tinggi. Ini berarti bahwa, misalnya, beberapa unit sensor kelautan bergerak yang independen dapat berkomunikasi satu sama lain selama operasi untuk membentuk supersensor yang lebih besar dan menyerupai kisi-kisi yang mencakup area tertentu secara sinkron untuk menilai pola hidrografi atau biologis secara sinoptik dari waktu ke waktu. Kawanan sensor tersebut harus siap untuk kehilangan kontak satu sama lain atau terpecah menjadi beberapa kawanan yang lebih kecil jika pola hidrografi tertentu terpecah menjadi unit-unit yang lebih kecil. Dalam hal ini, sensor, misalnya, harus mengambil keputusan sendiri berdasarkan matriks keputusan yang telah dikembangkan sebelumnya untuk seluruh kawanan sensor.

Kasus lainnya adalah kebutuhan akan sensor otonom untuk mengeksplorasi lingkungan dalam kondisi ekstrem. Kesenjangan utama dalam pengetahuan untuk lebih memahami fungsionalitas ekosistem dan respons terhadap perubahan iklim, misalnya di Laut Utara atau di wilayah kutub, adalah pengetahuan tentang dinamika ekosistem dalam kondisi ekstrem. Meskipun kita tahu bahwa di Laut Utara terdapat lebih dari 300 hari angin dengan kecepatan angin di atas 5 Beaufort, kita hampir tidak memiliki data tentang perilaku in situ sistem dan komponen biotiknya dalam kondisi badai. Namun, pengetahuan ini sangat dibutuhkan untuk mencapai pemahaman fungsional yang lebih mendalam tentang perubahan sistem yang diperkirakan terjadi dalam skenario perubahan iklim.

Teknologi sensor dan platform kelautan di masa depan harus menyediakan solusi yang juga mampu mengatasi kondisi hidrologis seperti badai hebat di perairan dangkal dan harus mampu melindungi diri jika kondisi lingkungan menjadi terlalu sulit untuk "bertahan" dalam mode pengukuran. Sistem harus, misalnya, mampu memutuskan sendiri untuk beralih ke mode hibernasi, "misalnya dengan mengubur diri di sedimen" untuk bertahan dari fase kritis badai di perairan dangkal dan untuk melanjutkan tugasnya ketika kondisi lingkungan telah cukup membaik. Sistem seperti itu juga harus memutuskan sendiri kapan masuk akal untuk kembali dari misi untuk melakukan pemulihan energi dan pengunduhan data di bawah air dan menunggu instruksi baru.



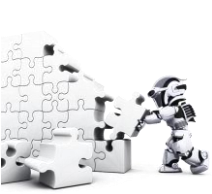
Contoh-contoh ini hanya dua kasus berdasarkan pengalaman dan diskusi kami selama beberapa tahun terakhir dan hanya menyajikan sekilas ide bagaimana teknologi sensor TI yang ditingkatkan AI dapat meningkatkan ilmu kelautan. Namun, melihat kedua contoh teknologi baru yang diusulkan ini, kita juga harus mengatakan bahwa ide-ide ini bukanlah hal baru tetapi sudah dikenal sejak lama dan sudah sepenuhnya direalisasikan di dunia nyata oleh banyak kawanan ikan dan invertebrata benthik. Perilaku berkerumun yang cerdas dan adaptif lingkungan seperti yang dijelaskan dalam contoh berkerumun ikan di atas telah dipublikasikan 20 tahun yang lalu dengan istilah "sinkrokinesis" pada ikan haring [14] dan setiap ahli biologi in situ sangat menyadari kepiting yang menggali di daerah perairan dangkal ketika badai mendekat. Dalam kedua kasus, bahkan mekanisme perilaku dan fisiologis yang mendasarinya sudah diketahui mereka "hanya" harus direalisasikan di dunia Kecerdasan buatan.

2.10 RINGKASAN

Merangkum pengalaman yang dijelaskan di atas dari pengoperasian berkelanjutan dua observatorium laut berkabel di wilayah perairan dangkal dari tahun 2012 hingga 2018 di Laut Utara dan di Samudra Arktik, menjadi jelas bahwa ilmu kelautan yang berwawasan ke depan membutuhkan teknologi sensor dan unit sensor bawah air yang jauh lebih inovatif dan cerdas di masa depan. Hal ini terutama penting dalam hal perubahan global karena dampak perubahan global sayangnya paling menonjol di area seperti sistem kutub atau beriklim sedang yang hanya sebagian dapat diakses karena kendala iklim.

Strategi penelitian terbaru dengan jelas menekankan poin bahwa pemahaman yang lebih mendalam dan fungsional tentang sistem bumi kita sangat diperlukan untuk mengatasi tantangan iklim dan antropogenik yang akan datang bagi umat manusia dan bahwa tantangan ini tidak dapat ditangani secara terpisah oleh berbagai disiplin ilmu. Tantangan-tantangan ini membutuhkan pendekatan terpadu lintas disiplin ilmu termasuk ilmu pengetahuan alam, ilmu teknik, kecerdasan buatan, dan ilmu komputasi.

Penerapan dan adaptasi teknologi cerdas mutakhir seperti sensor drone berkemampuan swarm, yang sudah tersedia dalam ilmu terestrial dan atmosfer, ke ranah kelautan akan sangat meningkatkan kapabilitas ilmu kelautan di masa depan. Namun, karena persyaratan teknologi bawah air yang sangat spesifik, transfer ini membutuhkan riset gabungan baru di bidang teknik, ilmu komputer, dan bidang-bidang lain yang berkontribusi pada kecerdasan buatan. Memungkinkan sistem operasi yang sepenuhnya otonom di bawah air untuk melakukan tugas-tugas spesifik berdasarkan keputusan mereka sendiri, tergantung pada kondisi lingkungan, akan membuka jendela peluang dalam ilmu kelautan yang secara signifikan meningkatkan kemungkinan kita untuk mengatasi tantangan besar di bumi seperti perubahan iklim dan solusi ekosistem laut terkait.



BAB 3

TANTANGAN OPERASI PERAIRAN DALAM PERSPEKTIF INDUSTRI

Masyarakat modern menuntut barang dan jasa yang membutuhkan sumber daya seperti mineral dan hidrokarbonat. Meskipun penelitian dan pengembangan sumber energi baru telah dilakukan, eksplorasi dan pengolahan sumber daya yang tersedia saat ini tetap diperlukan bagi banyak negara. Namun demikian, terdapat banyak tantangan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan bahkan membalikkannya dalam skenario komersial yang kompetitif. Dalam konteks ini, industri terus mencari teknologi baru untuk menjadikan bisnis mereka lebih ramah lingkungan sekaligus menguntungkan dan aman.

Salah satu alternatif yang dihadapi industri adalah mengeksplorasi lapangan baru untuk produksi. Selain itu, terdapat pula peluang untuk mengurangi biaya operasional lapangan produksi yang ada. Inilah tantangan yang dihadapi industri Minyak, Gas, dan Pertambangan saat ini dalam hal eksplorasi dan operasi perairan dalam. Dalam bab ini, tantangan teknologi untuk memenuhi persyaratan lingkungan bawah laut dibahas dan rencana jangka panjang strategis multidisiplin terpadu untuk meningkatkan kematangan teknologi dan penerapannya secara umum diusulkan.

3.1 PENDAHULUAN

Sejak awal mula, sumber daya alam telah dimanfaatkan oleh umat manusia untuk merancang perangkat yang mendukung kemajuan teknologi bagi evolusi manusia. Sumber daya alam pada dasarnya menyediakan segala sesuatu yang digunakan dan dikonsumsi masyarakat modern kita, mulai dari pupuk yang digunakan pada tanaman untuk menghasilkan makanan, hingga magnet dan baterai berdaya tinggi yang digunakan pada mobil terbaru dan tercanggih.

Sektor industri bertanggung jawab untuk mengeksplorasi, mengekstraksi, memproses, dan mengubah sumber daya penting ini menjadi barang. Terdapat rantai pasokan yang panjang yang mencakup industri dan penyedia jasa yang mempekerjakan jutaan pekerja terampil untuk mendukung pembangunan negara. Industri ekstraksi merupakan basis piramida dan menghadapi tantangan untuk mengeksplorasi sumber daya alam dengan dampak yang lebih rendah terhadap lingkungan kita yang sudah rapuh. Selain itu, daya saing di sektor ini dan pengaruh peraturan pemerintah semakin memperparah tantangan yang dihadapi oleh industri. Ada beberapa cara untuk memimpin pasar global dan meningkatkan daya saing.

Saat ini, pengembangan material, otomatisasi, pabrik tanpa manusia, pembelajaran mesin, kecerdasan buatan, data besar, dan internet untuk segala (IoT) merupakan beberapa tren teknologi yang sedang dicermati oleh industri dalam peta jalan mereka. Tentu saja, semua bidang ini saling tumpang tindih dan saling terkait. Pada akhirnya, semuanya digunakan untuk mengejar pengurangan biaya operasional dan untuk meningkatkan kinerja secara keseluruhan. Meskipun teknologi ini dan teknologi lainnya saat ini sudah matang, banyak industri masih berjuang untuk menjadi kompetitif, bersih, dan menguntungkan.



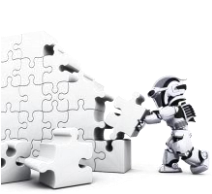
Industri Minyak dan Gas (O&G) tidak berbeda. Menambahkan pentingnya untuk memenuhi peraturan lingkungan, pengembangan teknologi baru untuk melakukan operasi yang andal sangat penting untuk mencapai semua tantangan dan persyaratan untuk industri ini. Meskipun produksi energi baru, seperti energi terbarukan, operasi laut dalam akan menjadi bagian penting dari pasokan minyak dan gas global untuk jangka waktu yang panjang. Menurut McKinsey & Company, pada tahun 2030, 36 juta barel per hari produksi minyak mentah baru dari proyek-proyek yang tidak disetujui akan dibutuhkan untuk memenuhi permintaan yang diharapkan. Setidaknya 30%, atau 9,5 juta barel, diharapkan berasal dari ladang laut dalam.

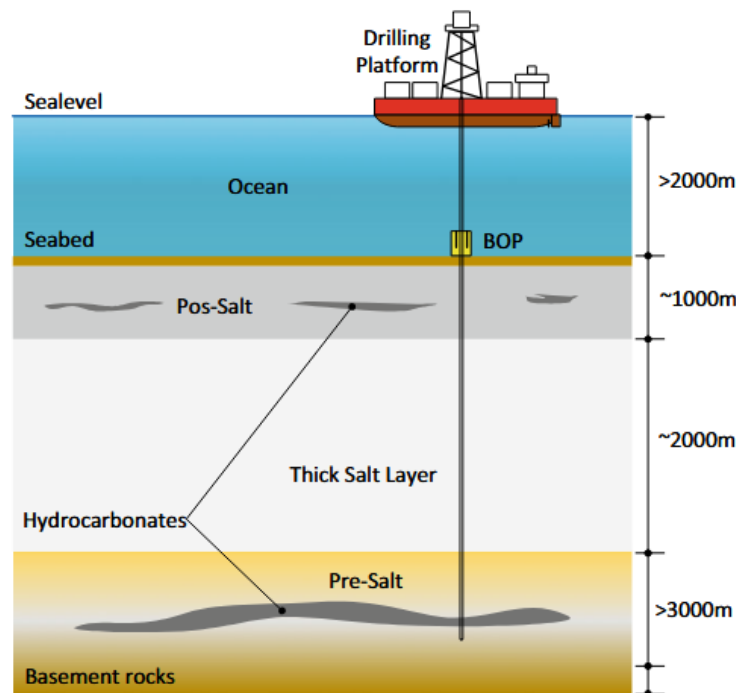
Selain perusahaan minyak dan gas, sektor produksi lainnya juga tertarik pada solusi bawah air. Penambangan laut dalam adalah salah satu contohnya. Pada Mei 2018, Otoritas Dasar Laut Internasional (ISA) mengeluarkan 29 kontrak eksplorasi, yang mencakup lebih dari satu juta kilometer persegi Laut Dalam. Teknologi penambangan laut dan pemantauan lingkungan telah berkembang pesat, dan setiap kenaikan tarif logam meningkatkan daya tarik komersial penambangan laut dalam. Area lain yang akan membutuhkan teknologi bawah air adalah pemanenan energi. Banyak teknik pemanenan energi yang ada tidak berlaku atau efisien dalam kondisi bawah air. Tantangannya cukup mirip dengan yang dihadapi industri minyak dan gas, dan akan membutuhkan teknologi serupa untuk dikembangkan. Dalam bab ini, skenario lingkungan air dalam dan tantangan pada batas-batas produksi baru dibahas. Selain itu, pendekatan R&D terpadu diusulkan untuk memenuhi persyaratan baru.

3.2 LAPISAN PRA-GARAM

Ladang minyak pra-garam (cadangan hidrokarbonat yang berada di bawah lapisan garam di laut dalam) di Brasil merupakan contoh yang mewakili skenario laut dalam untuk tantangan teknologi yang harus diatasi. Gambar 3.1 menunjukkan beberapa karakteristik lapangan pra-garam.

Lapangan Ultra-Dalam (lebih dari 2.000 m), reservoir karbonat dalam yang tersebar di area yang sangat luas (lebih dari 5.000 m), rasio gas-minyak yang tinggi, kandungan CO₂, tekanan tinggi dan suhu rendah yang terletak tepat di bawah lapisan garam tebal (lebih dari 2.000 m), terletak sekitar 300 km dari pantai dengan kondisi laut yang parah merupakan beberapa karakteristik pra-garam di Cekungan Santos di Brasil. Biasanya, reservoir ini berada di dekat wilayah vulkanik yang menjaga minyak hingga 150° C. Karakteristik ini sangat cocok untuk pemrosesan, karena menjaga minyak pada kepadatan sedang. Namun demikian, eksplorasi dan pengoperasian sumur pada formasi geologi ini juga menjadi tantangan.





Gambar 3.1 Karakteristik Pra-Garam

Karena karakteristik minyak dan reservoir serta skenario lingkungan, eksplorasi lapangan pra-garam menimbulkan tantangan teknologi di beberapa disiplin ilmu. Karakterisasi reservoir; Pemulihan minyak; Rekayasa sumur; Jaminan aliran; Teknologi bawah laut; Cara memproses dan apa yang harus dilakukan dengan CO_2 (karbon dioksida); dan logistik untuk gas ikutan adalah beberapa tantangan yang harus dihadapi. Beberapa tantangan ini akan dijelaskan lebih lanjut pada topik berikutnya.

- **Karakterisasi Reservoir:** Pada fase eksplorasi, hidrokarbonat harus diidentifikasi dan dikarakterisasi dengan baik menggunakan beragam teknologi yang saling melengkapi untuk memperoleh data, seperti seismik dan elektromagnetik, serta untuk memproses data menggunakan algoritma konstruksi pencitraan yang andal. Jika dikarakterisasi dengan baik, pengeboran eksplorasi dapat dikurangi, menghemat investasi jutaan dolar. Selain itu, lapangan dapat dieksplorasi dengan lebih baik sehingga mengurangi kandungan minyak di dalamnya. Konsekuensi lebih lanjut selain penghematan biaya adalah dampak lingkungan yang lebih rendah dengan pengeboran dan sumur yang lebih sedikit. Namun, hal ini masih memerlukan penyempurnaan dalam peralatan dan metode akuisisi (sumber dan detektor, bejana yang kurang terspesialisasi) serta algoritma yang lebih cepat yang dapat diproses dengan daya komputasi yang lebih rendah.
- **Rekayasa Sumur:** Terdapat perkembangan terkini dalam rekayasa sumur untuk eksplorasi dan operasi lapisan pra-garam. Tantangannya dimulai dari eksplorasi sumur hingga penyelesaian. Misalnya, katup pengaman yang ada saat ini yang mencegah semburan gelembung gas yang tidak terkendali dan menjaga sumur tetap tertutup adalah BOP (Blowout Preventer). Ukuran, berat, dan kompleksitas solusi berbasis



hidraulik saat ini sangat besar dan masih kurang memiliki keandalan dan ketersediaan yang lebih tinggi. Ukuran anjungan pengeboran bergantung pada ukuran BOP dan ukurannya akan bertambah seiring dengan kedalaman sumur yang lebih tinggi. Oleh karena itu, anjungan dan peralatan bantu mengikuti perkembangan ini. Casing, semen, penyegel, kolom, selongsong geser, katup pengangkat gas, sumbat, dan banyak aksesoris lainnya yang terpasang memerlukan ketahanan terhadap karbon dioksida, hidrogen sulfida, suhu, gradien suhu, korosi, dan erosi. Selain itu, teknik baru untuk mengurangi waktu pengeboran dan mengurangi jumlah sumur per lapangan juga menjadi target eksplorasi.

- *Jaminan Aliran:* Aliran minyak di pre-salt juga perlu diperhatikan. Tekanan dan suhu di dekat kepala sumur memfasilitasi pembentukan hidrat. Lebih lanjut, adhesi parafin yang umum pada dinding akan mengurangi aliran. Perbedaan tingkat kepadatan, keberadaan gas, dan parameter lainnya dapat mengurangi aliran. Penggunaan/penyisipan gas atau air yang diinjeksikan dan bahan kimia lainnya untuk menghindari parafin dan hidrat pada area sumur tertentu merupakan pendekatan untuk mengatasi pengurangan aliran. Namun demikian, kontrol tekanan/aliran yang cermat dan tepat harus dipertimbangkan, untuk menghindari tertinggalnya minyak atau dalam skenario terburuk, sumur pecah/runtuh. Pemantauan dan pengiriman data tekanan, suhu, dan aliran secara terus-menerus di dalam sumur selama operasi masih menjadi tantangan. Peralatan elektronik khusus untuk menahan lingkungan yang keras dan cara untuk berkomunikasi ke permukaan sangat penting. Selain itu, pemantauan berkelanjutan dan pengamatan volume/morfologi sumur juga memainkan peran penting dalam seismik 4D untuk operasi sumur.
- *Teknologi Bawah Laut:* Untuk teknologi terkini, sebagian besar peralatan ladang minyak berada di anjungan operasi produksi dan pembongkaran. Tenaga untuk menggerakkan peralatan yang berada di antara anjungan dan kepala sumur biasanya hidrolik. Oleh karena itu, banyak riser harus dipasang dari dasar laut menuju anjungan. Sistem pelampung dan jangkar yang kompleks digunakan, terutama mengingat kedalaman instalasinya. Peralatan bawah laut tidak mudah terhubung dengan permukaan. Pengkabelan menjadi tantangan tersendiri. Konektor bawah laut tidak terstandarisasi dan sangat mahal. Pertukaran panas (hot swap) tidak semudah yang seharusnya dengan menggunakan Kendaraan yang Dioperasikan dari Jarak Jauh (ROV). Perbedaan kecepatan arus laut, selain suhu dan salinitas, memengaruhi komunikasi menggunakan gelombang suara. Hal ini juga membatasi laju data yang dapat digunakan. Material yang digunakan dalam peralatan juga penting. Sifat independen suhu yang baik, ketahanan terhadap kelelahan dan korosi, serta pengurangan berat/volume diperlukan. Kondisi cuaca juga menjadi tantangan tersendiri.

Selain itu, masalah dukungan logistik ternyata menjadi hambatan dari aspek biaya dan operasional. Biaya pasokan komponen ke luar negeri dan aspek keselamatan pekerja di lokasi terpencil sekitar 300 km dari pantai menarik perhatian perusahaan untuk beralih ke platform jarak jauh tanpa penghuni. Permintaan produksi di lingkungan ini baru saja dimulai. Menurut



ANP—Badan Nasional Perminyakan, Gas Alam, dan Biofuel di Brasil, saat ini terdapat 12 ladang yang memproduksi di lapisan pra-garam di Brasil yang menghasilkan lebih dari separuh produksi minyak Brasil. Produksi pada Maret 2018 mencapai 2,56 juta barel per hari. Ladang pra-garam menyumbang 54,7% dari total produksi. Yang juga mengesankan adalah perkiraan volumenya melampaui 30 miliar barel minyak untuk Putaran Lisensi Pra-Garam ke-4 dan ke-5.

3.3 PLATFORM BAWAH LAUT

Dalam skenario seperti di area pra-garam, platform produksi terendam menjadi topik penting bagi banyak perusahaan. Riser panjang yang mengangkut minyak, gas, pasir air, H₂S (hidrogen sulfida), dan CO₂ sangat penting karena masalah keselamatan dan biaya. Saat ini, banyak perusahaan yang berupaya menyediakan peralatan untuk dipasang di permukaan laut. Hal ini akan mengubah operasi pemrosesan dari permukaan atas ke dasar laut, dekat kepala sumur. Tantangannya sangat besar: tekanan tinggi, ketahanan korosi, pemasangan, pengoperasian, dan pemeliharaan. Namun, setelah platform ini diterapkan, masalah keselamatan, pemeliharaan, dan biaya pengoperasian akan berkurang drastis.

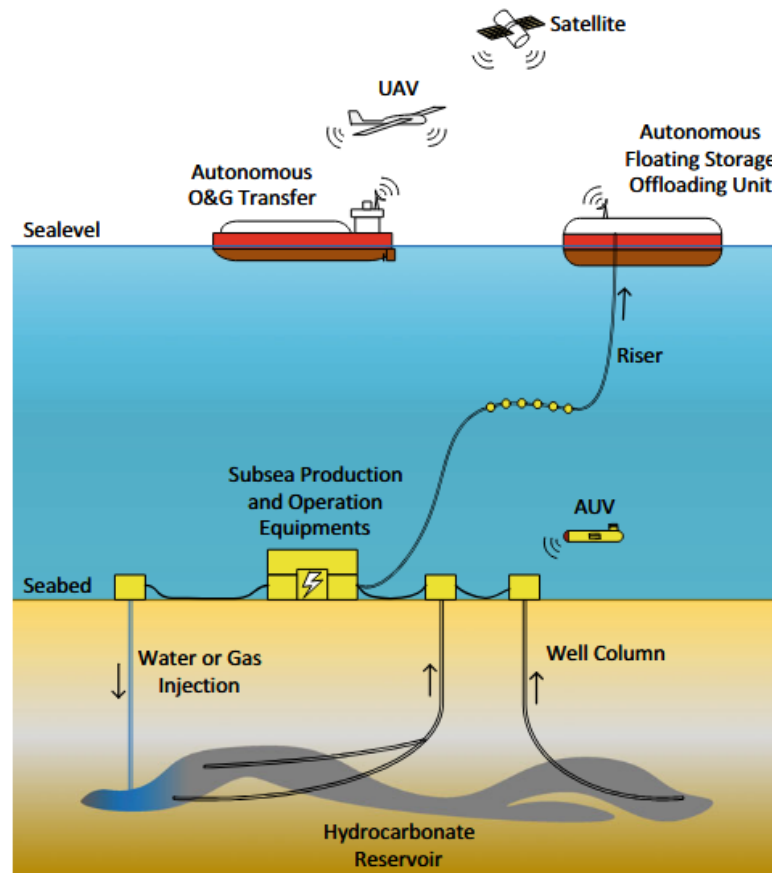
Jika semua pemisahan minyak, air, sedimen, gas alam, dan, tergantung pada lapangannya, CO₂ dan H₂S terjadi di permukaan laut, akan ada manfaat langsung bagi riser yang bertanggung jawab untuk mengarahkan minyak dari dasar laut ke unit penyimpanan sealine. Sumber daya untuk membantu mengangkat elemen yang belum terpisahkan yang dieksplorasi dari sumur ke permukaan tidak akan diperlukan. Hanya minyak dan gas yang akan diangkat ke unit penyimpanan dan pembongkaran terapung. Riser akan dikurangi dan lebih sedikit tekanannya. Riser yang hanya mengalirkan gas atau minyak ke unit penyimpanan lebih aman daripada yang terpapar pada komponen lain yang disebutkan sebelumnya.

Gas alam dapat disalurkan langsung ke platform utilitas untuk menghasilkan energi untuk pompa, kompresor, pemanas, sistem kontrol, sistem pembersihan, dan sistem keselamatan peralatan yang terendam. Pilihan lainnya adalah menghasilkan energi di dasar laut. Teknologi pemanenan energi menggunakan arus laut dan reaktor nuklir garam cair tertutup semua faktor kecil dapat digunakan untuk menyediakan energi dengan aman tanpa saluran energi daya tinggi lebih dari 3 km. Peralatan dan komponen harus dirancang untuk menuntut lebih sedikit pembersihan (penghambat kotoran) atau dirancang untuk membersihkan sendiri. Gambar 3.2 menyajikan pabrik bawah laut konseptual untuk pemahaman yang lebih baik tentang potensi keuntungan masa depan dari platform produksi yang terendam tersebut.

Selain itu, semua batasan baru dalam produksi minyak dan gas ini akan memengaruhi persyaratan regulasi. Di beberapa negara, misalnya, regulasi menyatakan bahwa FPSO (Floating Production Storage and Offloading) harus memiliki peralatan untuk memastikan pengukuran fiskal produksi minyak dan gas alam. Pengukuran volume gas dan air yang diinjeksikan kembali ke dalam sumur adalah wajib. Peralatan pengukuran yang diperlukan diaudit oleh perusahaan pihak ketiga. Dalam operasi bawah laut di masa mendatang, peralatan pengukuran akan diwajibkan untuk dapat mengakses instalasi bawah laut setidaknya dari jarak jauh. Prosedur standar baru untuk memvalidasi volume produksi dan reinjeksi akan



diperlukan, dan khususnya, peralatan tersebut harus mudah dipasang dan dihubungkan tanpa risiko terhadap operasi dan peralatan lainnya.



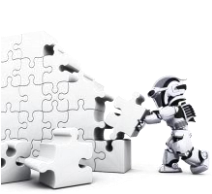
Gambar 3.2 Representasi konseptual pabrik bawah laut

Standarisasi peralatan, sambungan, pengencang, elektronik, interkoneksi, protokol komunikasi, komunikasi nirkabel, dan lainnya merupakan kunci untuk membangun industri yang kuat dengan rantai pasokan yang terstruktur. Penting untuk membuat standar-standar yang akan menetapkan referensi untuk memastikan pengembangan teknologi dan keselamatan operasi.

3.4 SISTEM OTONOM SISTEM BAWAH AIR

Pengembangan sistem bawah air otonom merupakan kompetensi kunci dalam peta jalan teknologi semua perusahaan yang beroperasi di bawah air. Perairan dalam (lebih dari 2000 m di bawah permukaan air) merupakan lingkungan yang dinamis dan agresif. Hal ini membutuhkan pengembangan robot generasi baru untuk mengatasi masalah seperti arus laut, tekanan tinggi, korosi, kurangnya visibilitas, keterbatasan komunikasi nirkabel, hidup berdampingan dengan hewan, kotoran, dan puing-puing.

Pemantauan mandiri, pemulihan mandiri, pertukaran, pengaturan cepat, modularitas, dan pengenalan objek adalah kemampuan yang harus disertakan dalam desain sistem apa pun yang digunakan untuk inspeksi, pemeliharaan, dan pengoperasian peralatan, pipa, dan riser.



Prosedur dan peralatan baru untuk menguji sistem tersebut harus dikembangkan untuk memastikan kualitas operasi dalam kondisi perairan dalam.

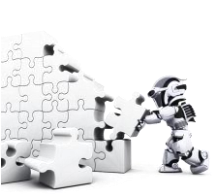
Selain itu, robot perlu berkomunikasi dengan sistem bawah air lainnya dan tim operasional. Lingkungan bawah air secara signifikan memengaruhi pendekatan transmisi yang tersedia seperti akustik, elektromagnet, induksi magnetik, dan optik. Topik penting lainnya adalah bagaimana menyediakan energi untuk operasi bawah air. Baterai sulit diisi ulang dan diganti di lingkungan bawah laut. Baterai yang beroperasi tanpa hambatan di perairan dalam harus mampu menahan tekanan tinggi untuk menghindari rumah bertekanan atmosfer yang berat dan besar.

Selain itu, kepadatan energi yang tinggi, pengisian daya yang cepat, dan masa pakai yang lebih lama sangatlah penting. Jaringan Sensor Nirkabel Bawah Air (UWSN) menjadi semakin penting akhir-akhir ini, karena beragamnya aplikasinya dalam manajemen, kontrol, dan pengawasan di beberapa bagian tertentu di laut dalam. Selain itu, desain UWSN tersebut menghadapi banyak tantangan seperti penundaan propagasi yang lebih besar, bandwidth yang rendah, dan kondisi lingkungan yang dinamis.

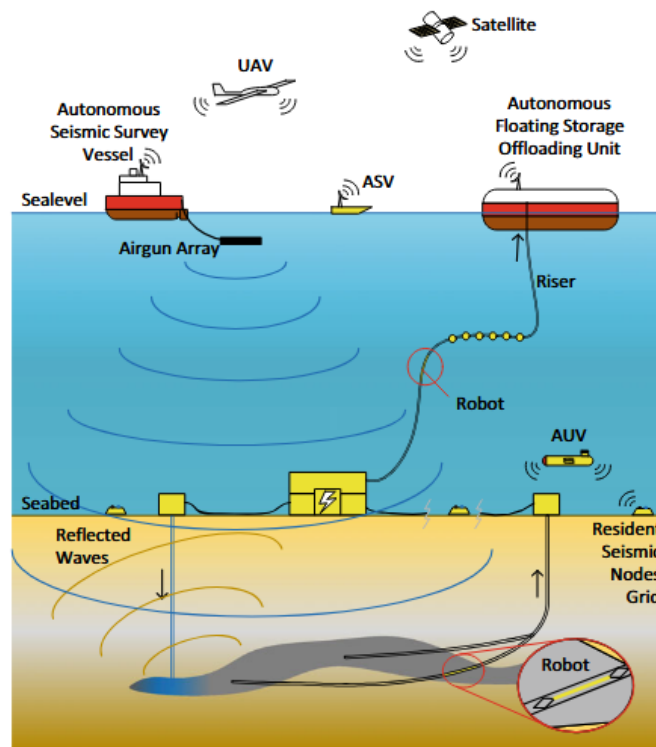
Pendekatan multidisiplin diperlukan untuk mengembangkan sistem otonom yang efisien dan andal. Material, pengembangan perangkat lunak, integrasi sistem, desain sistem, kontrol sistem, catu daya, pengembangan sensor, pembelajaran mesin, dan analitik data merupakan sekumpulan kompetensi yang dibutuhkan untuk pengembangan generasi baru sistem bawah air residen dan otonom. Skenario untuk otomatisasi ini disajikan dalam Gambar 3.3. Idennya adalah untuk memiliki kendaraan otonom seperti UAV (kendaraan udara tak berawak), ASV (kendaraan permukaan otonom), AUV (kendaraan bawah air otonom), dan robot khusus untuk melakukan pemantauan, inspeksi, dan intervensi di lapangan yang sedang dieksplorasi. UAV dapat melakukan pemantauan tumpahan minyak di atas permukaan air.

Mereka dapat mengaktifkan AUV untuk menavigasi ke area tertentu untuk mengumpulkan sampel dan mengukur lapisan ketebalan minyak dan klasifikasinya. UAV dan ASV akan terus memeriksa struktur di atas garis laut. AUV seperti Flatfish akan melakukan inspeksi peralatan di bawah air dari dekat permukaan hingga dasar laut. AUV ini juga akan berinteraksi dengan peralatan lain, bertukar bahan habis pakai atau modul yang rusak. Di dalam peralatan, saluran, riser, dan bahkan robot yang terspesialisasi dengan baik akan digunakan untuk inspeksi, pemantauan, dan intervensi.

Jaringan simpul seismik dapat dipasang untuk pemantauan dasar laut secara berkelanjutan dan mendeteksi respons sumur terhadap stimulasi buatan. Pengumpulan data dari simpul-simpul ini akan diotomatisasi menggunakan AUV dan modem optik dalam waktu dekat, sehingga menghilangkan kebutuhan akan kabel. Penggunaan ROV untuk pengumpulan data dan penggantian simpul secara berkelanjutan mahal, tidak efisien, dan berisiko tinggi bagi peralatan produksi. Pemasangan kabel antara simpul dan permukaan dianggap tidak praktis dan terlalu mahal untuk perairan dalam dan ultra-dalam. Semua tim kendaraan otonom ini akan membutuhkan komunikasi dan pengambilan keputusan di tingkat mesin untuk berbagai tugas dan situasi kritis.



Selain itu, standar baru negara-negara tersebut menetapkan periode lima tahun untuk memantau kepala sumur dan sekitarnya terhadap tekanan, suhu, serta kebocoran minyak dan gas setelah sumur dinonaktifkan dan ditinggalkan. Cara khusus untuk berkomunikasi dan mengirimkan alarm juga diperlukan untuk menyediakan pemantauan yang aman selama periode ini. Biaya investasi dan pengoperasian solusi untuk sumur-sumur yang tidak memproduksi sangat penting dan menuntut keandalan yang tinggi.



Gambar 3.3 Operasi otonom, pemantauan, inspeksi, pemeliharaan dan seismik 4D

3.5 PENAMBANGAN DASAR LAUT

Kehidupan muncul dari lautan di Planet Bumi dan merupakan aktor lingkungan utama dalam mendukung dan menyeimbangkan kehidupan planet. Laut juga menutupi lebih dari $\frac{3}{4}$ permukaan planet. Selama pembentukan kompleks benua, tekanan dari inti panas di dalam kita telah menyebabkan daratan baru terbentuk, tertutup, muncul, dan/atau tenggelam. Mekanisme ini memungkinkan mineral, minyak, dan gas ditemukan di mana saja di kerak Bumi. Sejarah manusia memulai eksplorasi dan transformasi mineral dengan mineral yang dekat dengan permukaan seperti tembaga dan emas yang lebih mudah ditemukan 8.000 tahun yang lalu. Sejak Zaman Kalkolitik dan Perunggu, umat manusia telah berevolusi, didukung oleh eksplorasi sumber daya mineral yang besar. Sejauh ini, meskipun eksplorasi industri minyak dan gas baru dimulai jauh di kemudian hari dalam kehidupan manusia, minyak dan gas sebagai fluida merupakan satu-satunya sumber daya mineral yang banyak dieksplorasi di laut. Diketahui keberadaan mineral berharga tinggi di dasar laut seperti nodul poli-logam (nikel, tembaga, kobalt, dan mangan), kerak mangan (kobalt, vanadium, molibdenum dan platinum) dan endapan sulfida (tembaga, timbal, seng, emas dan perak).



Ini ditemukan di daerah yang sangat terkonsentrasi di sekitar ventilasi hidrotermal. Pemadatan cepat lava panas memungkinkan logam untuk mengendap membuat daerah ini lebih kaya dan terkonsentrasi pada mineral-mineral ini. ROV telah digunakan untuk mengumpulkan sampel dari kedalaman hingga 6.000 m. Metode saat ini yang dipertimbangkan untuk mengekstraksi mineral adalah continuous line bucket dan hydraulic suction. Mineral dikirim ke platform di permukaan dan diproses dan diekstraksi. Residu dikirim kembali ke dasar laut. Ada kontroversi tentang tingginya biaya dan dampak lingkungan yang terkait dengan kegiatan penambangan dasar laut. Konsentrasi mineral yang tinggi mungkin akan mengurangi area yang perlu dieksplorasi. Jika dibandingkan dengan tambang darat, mungkin hanya sebagian kecil dari area yang dibutuhkan di dasar laut untuk mendapatkan jumlah mineral yang sama.

Namun demikian, ventilasi hidrotermal adalah area tempat bentuk kehidupan baru dan unik baru ditemukan dan lebih banyak lagi yang diharapkan ditemukan. Selain itu, di luar perubahan dasar laut, aktivitas penambangan akan menyebabkan gumpalan sarat yang mungkin membawa logam berat dan menyebar ke jarak yang jauh. Dampak terhadap lingkungan dapat memengaruhi mulai dari komunitas nelayan kecil hingga ekonomi negara. Keseimbangan ekonomi antara biaya penambangan dan dampak lingkungan belum tercapai. Oleh karena itu, ini berarti ada peluang tinggi untuk penelitian dan pengembangan teknologi minimal invasif, aman, dan andal untuk mengeksplorasi peluang penambangan baru.

3.6 PENDEKATAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TERPADU

Perusahaan dan lembaga penelitian yang ingin meningkatkan pangsa pasar dan menjadi lebih kompetitif, terkadang memutuskan untuk mengembangkan solusi mandiri mulai dari awal. Meskipun dalam beberapa kasus terbukti menjadi strategi yang baik, hal ini memakan waktu, membutuhkan terlalu banyak sumber daya, dan seringkali hasilnya tidak sesuai harapan. Biasanya, sektor industri mencari solusi yang tepat dan tersedia, sementara lembaga penelitian tidak memiliki kelincahan dan pengalaman untuk mencapai kematangan yang tinggi dalam solusi mereka.

Kurangnya integrasi dan strategi jangka panjang dalam pengembangan sistem bawah air otonom menjadi hambatan, dan dalam beberapa kasus, sumber daya digunakan untuk melaksanakan proyek serupa. Bagi industri, penerapan teknologi merupakan hal yang fundamental. Penelitian dasar diperlukan, tetapi fokusnya harus pada jalur yang jelas untuk meningkatkan kematangan teknologi agar dapat diimplementasikan dalam aset nyata dan mewujudkan keuntungan. Aspek ini memperkuat dua poin penting bagi lembaga dan universitas (a) Setiap inisiatif harus berfokus pada penerapan teknologi; (b) Integrasi kompetensi dan disiplin ilmu diperlukan untuk menggabungkan pengetahuan yang ada dari berbagai lembaga. Peningkatan kematangan teknologi mendahului penerapannya.

Oleh karena itu, rencana penelitian dan pengembangan jangka panjang dan terpadu sangat penting untuk mencapai tujuan penerapannya. Pengembangan Proyek Industri Bersama (JIP) merupakan praktik umum dalam industri minyak dan gas dan merupakan peluang untuk berbagi risiko, sumber daya, dan hasil untuk pengembangan baru. Integrasi



kompetensi dan disiplin ilmu, serta pengumpulan keahlian dari berbagai mitra, juga harus menjadi bagian dari rencana penelitian jangka panjang dan terpadu yang telah disebutkan sebelumnya.

3.7 KESIMPULAN

Masyarakat global perlu menjaga sumber daya alamnya. Dampak manusia terhadap lautan sangat penting bagi lingkungan, tetapi juga penting bagi pembangunan negara. Namun demikian, solusi kompromi tidak boleh dipertimbangkan untuk mengakses, mengeksplorasi, dan mengolah sumber daya alam dari planet ini. Skenario yang dibayangkan dalam bab ini bertujuan untuk memperkenalkan tantangan yang telah diamati dalam rantai industri. Sejak awal sejarah manusia, teknologi telah diciptakan dan dikembangkan untuk mengeksplorasi dan mentransformasi sumber daya alam demi kemakmuran. Namun, teknologi telah merusak planet ini sebagai efek samping. Meskipun demikian, teknologi adalah kunci untuk mengurangi dan bahkan membalikkan dampak lingkungan. Oleh karena itu, industri dan pemerintah harus berinvestasi pada teknologi baru yang dapat menjelajahi lautan dengan lebih bersih, efisien, lebih aman, lebih andal, dan tetap menguntungkan.

Sangat penting untuk memenuhi kebutuhan industri dalam eksplorasi dan eksploitasi laut dalam. Pendekatan terpadu dan multidisiplin dalam hal bidang studi dan teknologi kunci yang akan dikembangkan penting untuk berhasil mengatasi tantangan lingkungan dan mengembangkan sistem bawah laut generasi baru, dengan menggunakan teknologi kecerdasan buatan yang canggih.



BAB 4

MATERIAL CANGGIH LAMBUNG MODULAR MULTIGUNA.

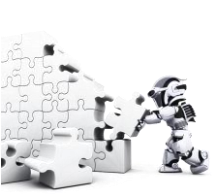
Lambung atau kulit kendaraan bawah air otonom (AUV) merupakan elemen penting yang menyediakan lapisan pelindung dan penahanan hidrodinamik yang efisien untuk berbagai komponen sistem serta area antarmuka yang luas dengan lingkungan sekitar. Persyaratan dasar ini menimbulkan serangkaian tantangan desain, seperti stabilitas mekanis yang tahan tekanan, efisiensi hidrodinamik, perlindungan korosi dan pengotoran, tetapi antarmuka ini juga menawarkan berbagai peluang, yang hingga kini belum sepenuhnya dimanfaatkan. Bab ini membahas tantangan dan peluang ini dan mengidentifikasi solusi baru yang potensial yang memungkinkan transisi dari lambung AUV menuju kulit cerdas.

4.1 PENDAHULUAN

Sejak awal mula kendaraan bawah air otonom (AUV) pada tahun 1950-an dan peningkatan penggunaannya sejak tahun 1990-an, desain dasar dan metodologi konstruksinya tidak berubah secara signifikan. Terdapat dua kelas utama AUV, yaitu kendaraan tipe melayang dan kendaraan tipe survei. Perkembangan paling signifikan dalam beberapa tahun terakhir adalah tersedianya AUV berbentuk torpedo air dangkal berbiaya rendah untuk komunitas penelitian, pengembangan AUV tipe melayang yang lebih kompak (misalnya Flatfish DFKI atau Saab Sabertooth) dan pengembangan kemampuan AUV jarak jauh, seperti kendaraan kelas Tethys MBARI, Autosub LR Pusat Oseanografi Nasional dan glider bawah air Teledyne Hybrid Slocum.

Kendaraan jarak jauh dalam konteks ini mampu melampaui jangkauan operasional lebih dari 1000 km dan daya tahan dalam hitungan minggu dan bulan. Secara paralel, ada keberhasilan luar biasa dalam pengembangan dan pengoperasian platform permukaan tak berawak yang dapat beroperasi selama berminggu-minggu dan berbulan-bulan. Dengan munculnya platform daya tahan lama ini, baik di permukaan maupun di bawah laut, dan peningkatan yang sangat dibutuhkan pada keandalan sistem, telah ada upaya baru dalam menyebarkan sistem penghuni dasar laut. Sistem-sistem tersebut dibayangkan untuk secara rutin atau didorong oleh peristiwa memeriksa infrastruktur atau fitur-fitur yang menarik dan berubah secara ilmiah.

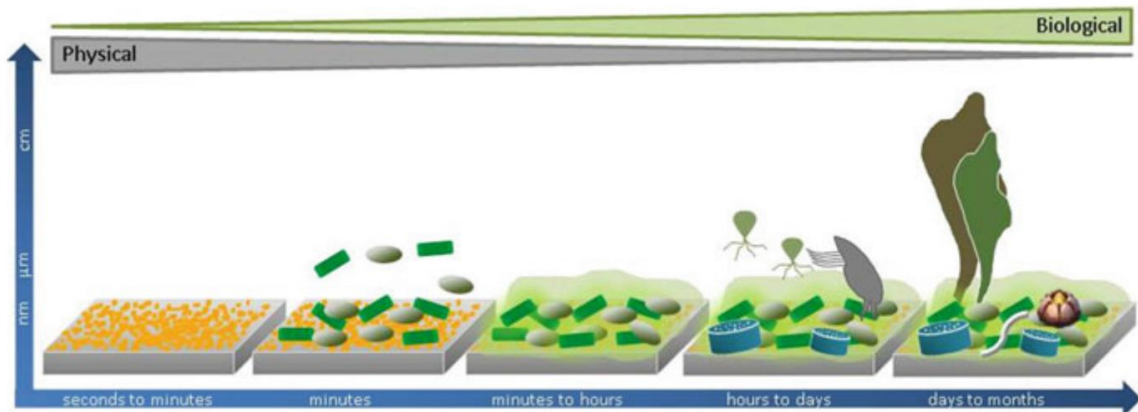
Realisasi penerapan jangka panjang ini telah memunculkan beberapa aspek yang sebelumnya tidak dipertimbangkan pada jalur kritis pengembangan ini. Aspek-aspek ini mencakup peningkatan lebih lanjut dalam ketahanan sistem terhadap dampak atau tabrakan, mencegah pengotoran dan pengurangan hambatan hidrodinamik. Secara khusus biofouling merupakan masalah penting tidak hanya berkenaan dengan kinerja hidrodinamik tetapi juga dalam hal pengotoran sensor individu yang saat ini perlu dikalibrasi dengan hati-hati sebelum dan sesudah misi untuk mengoreksi potensi kesalahan pengukuran karena masalah pengotoran.



4.2 FUNGSI PELINDUNG PENGENDALIAN BIOFOULING

Perlindungan terhadap paparan lingkungan merupakan fungsi utama lambung AUV. Permukaan luar lambung harus cukup kokoh untuk menjaga integritas sistem setelah benturan dan menyediakan lapisan luar yang ramping guna meminimalkan kerugian akibat hambatan hidrodinamik. Dalam beberapa kasus, lambung juga merupakan bagian integral dari bejana tekan yang berisi subkomponen vital, seperti daya dan komputasi. Namun, yang terpenting, lambung merupakan penghalang fisik dan antarmuka antara lingkungan laut dan kendaraan. Oleh karena itu, permukaan ini paling terdampak oleh proses mekanis, kimia, dan biologis di lautan. Dalam konteks ini, pencegahan pengotoran biologis, yaitu kolonisasi lambung oleh organisme sesil, merupakan prasyarat keberhasilan misi jangka panjang AUV. Khususnya di zona eufotik, lapisan air atas yang menerima cukup sinar matahari untuk fotosintesis, permukaannya dengan cepat dikolonisasi oleh berbagai organisme yang berbeda yang biasanya mengikuti pola suksesi yang khas. (Gambar 4.1)

Biasanya biofouling dimulai dengan adsorpsi fisik makromolekul organik dan pengendapan bakteri individu. Dalam beberapa jam, biofilm yang lebih kompleks yang juga terdiri dari alga uniseluler mulai terbentuk. Ini menyajikan tempat pengendapan bagi spora alga multiseluler serta larva organisme zoobenthos lunak dan keras. Eksplorasi permukaan dan pengendapan propagul adalah proses kompleks yang didorong oleh petunjuk yang berbeda di mana sinyal kimia memainkan peran penting. Umumnya, kolonisasi substrat keras oleh spesies yang berbeda dianggap sinergis, yaitu biofilm bakteri adalah inisiator penting untuk keberhasilan pengendapan larva invertebrata laut.



Gambar 4.1 Proses kolonisasi tipikal pada permukaan terendam

Pada misi jangka panjang, lambung AUV tanpa perlindungan terhadap biofouling mungkin sangat ditumbuhi organisme sesil yang larvanya ada di badan air masing-masing (Gambar 4.1). Ketersediaan kendaraan daya tahan lama yang disebutkan sebelumnya telah menunjukkan pentingnya mengatasi efek biofouling untuk mencegah penurunan kinerja yang parah atau bahkan kehilangan platform.

Dalam beberapa kasus, di mana sistem dioperasikan di daerah dengan produktivitas biologis tinggi, kinerja signifikan yang membatasi pertumbuhan laut telah terakumulasi selama beberapa minggu. Gambar 4.2 menunjukkan gambar bagian yang terendam dari glider



gelombang setelah 2-3 minggu operasi antara Tanjung Verde dan Kepulauan Canary. Karena kendaraan daya tahan lama ini dioptimalkan untuk propulsi hemat energi dan oleh karena itu bergerak relatif lambat melalui air, efek biofouling bahkan lebih terasa daripada di sistem laut lainnya.



Gambar 4.2 Gambar bawah menunjukkan Wave Glider® MARUM yang terkontaminasi teritip leher angsa Atlantik *Pollicipes pollicipes*.

Namun demikian, bagi industri pelayaran, biofouling juga memiliki banyak dampak buruk, misalnya peningkatan hambatan hidrodinamik yang berkaitan dengan peningkatan konsumsi bahan bakar dan emisi gas rumah kaca, gangguan kemampuan manuver, peningkatan degradasi material akibat korosi yang dipengaruhi mikroba, serta dampak ekologis, yaitu masuknya spesies non-asli. Pengaruh biofouling terhadap hambatan hidrodinamik cukup signifikan dan referensi di dalamnya], biofilm mikroba dapat menyebabkan peningkatan resistansi total sebesar 11% dan pengotoran kapur yang parah hingga 80% (untuk kecepatan kapal tertentu sebesar 15 knot, dampak pada kendaraan yang bergerak lambat akan lebih tinggi lagi).

Banyak dari dampak negatif ini juga berlaku untuk pengoperasian AUV. Oleh karena itu, pencegahan biofouling sangatlah penting. Terdapat dua kelas utama perlindungan mutakhir terhadap biofouling: (i) polimer deplesi terkendali (CDP) biosidal (terutama berbahan dasar tembaga) atau kopolimer pemoles mandiri (SPC) yang terus-menerus melepaskan senyawa toksiknya ke air di sekitarnya dan (ii) pelapis pelepas pengotoran (FRC) yang mengurangi daya rekat organisme yang menempel pada permukaan pelapis. Namun, kedua teknologi tersebut memerlukan gaya geser yang diinduksi aliran tertentu untuk kinerja penuh dan kecepatan kendaraan tanpa awak yang sangat rendah (0–2 m/s) merupakan tantangan besar dan membuat pelapis pengontrol antifouling/pengotoran konvensional menjadi tidak efektif.

Perlindungan pengotoran penting, tidak hanya untuk komponen bergerak, tetapi juga untuk struktur yang berada di dasar laut. Pada kedalaman air yang lebih dalam, lebih dari 1000 m, tekanan pengotoran lebih rendah daripada di perairan dangkal (epipelagial, umumnya 200 m di atas permukaan air). Namun, terutama di dataran dasar lunak, substrat keras jarang ditemukan dan struktur buatan merupakan tempat pengendapan yang menarik. Oleh karena itu, fungsi penting seperti komponen yang dapat bergerak (misalnya, permukaan kendali yang dapat bergerak, seperti kemudi) atau sensor hanya dapat dipertahankan jika pertumbuhan berlebih organisme pengotoran dicegah.

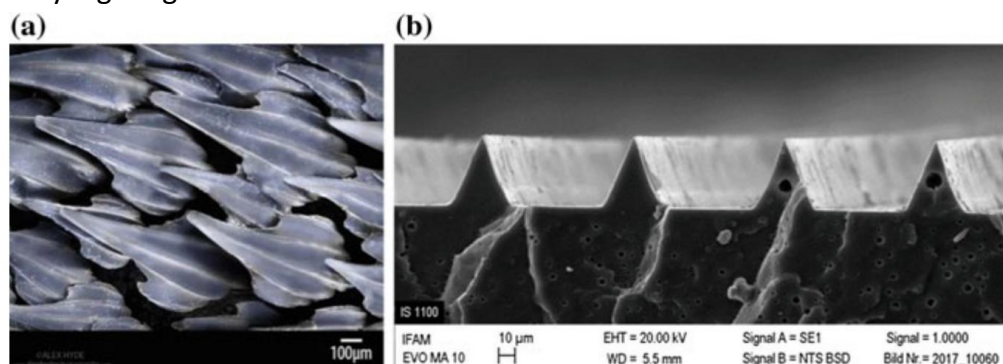


4.3 EFISIENSI HIDRODINAMIK

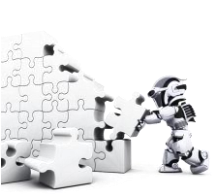
Efisiensi energi merupakan isu krusial, terutama untuk misi jangka panjang AUV. Oleh karena itu, hidrodinamika memainkan peran penting untuk meminimalkan kehilangan energi yang terkait dengan hambatan hidrodinamika. Hambatan terdiri dari dua komponen: gaya gesek terkait viskositas dan gaya terkait tekanan. Gaya yang terakhir merupakan fungsi bentuk yang dapat dioptimalkan secara efektif melalui dinamika fluida komputasional tingkat lanjut dan studi eksperimental model cekungan kapal. Pada gilirannya, bagian hambatan yang didominasi oleh viskositas dan gesekan menjadi semakin penting. Sebagaimana diuraikan di atas, biofouling dapat menyebabkan peningkatan drag hidrodinamik yang dramatis, yang menekankan pentingnya perlindungan lambung yang efektif.

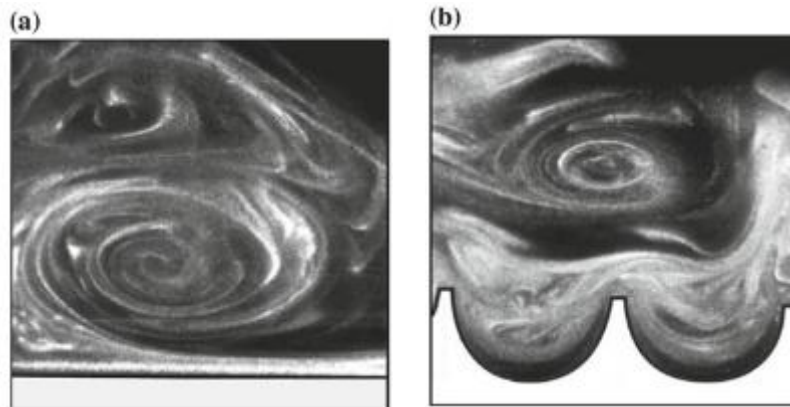
Namun, bahkan di luar permukaan lambung yang halus secara hidrolik, hambatan gesek dapat dikurangi lebih lanjut. Melihat ke alam dapat memberikan inspirasi berharga karena evolusi telah menghasilkan beberapa cara untuk meningkatkan efisiensi hidrodinamik. Sisik plakoid pada kulit hiu perenang cepat, misalnya, dilengkapi dengan tekstur permukaan bergaris searah aliran utama di sepanjang tubuh (Gambar 4.3a). Riblet ini mengurangi pertukaran intensif energi antara struktur pusaran skala kecil dan membantu mengurangi kerugian dalam lapisan batas turbulen (Gambar 4.4.). Adaptasi teknis dari kulit hiu bertekstur telah direalisasikan (Gambar 4.3b) dan berhasil diuji terkait pengurangan hambatan gesek dalam rezim turbulen.

Pendekatan biomimetik lain diadaptasi dari model biologis lumba-lumba. Lumba-lumba memiliki lapisan lemak lembut yang tebal di bawah epidermisnya yang seharusnya mengurangi hambatan dengan menunda transisi dari aliran laminar ke aliran turbulen. Mekanisme yang mendasarinya dibangun di atas stabilisasi lapisan batas laminar oleh permukaan yang lentur. Adaptasi buatan dari kulit lumba-lumba telah dikembangkan dengan meniru dua lapisan dengan sifat material yang berbeda, yaitu lapisan yang relatif tebal, lembut, dan lentur yang mewakili lemak dan lapisan luar yang lebih keras tetapi masih fleksibel yang mewakili dermis. Kulit lumba-lumba buatan ini diaplikasikan pada model bagian haluan kapal dan menunjukkan pengurangan hambatan gesekan hingga 6% (Gambar 4.5.). Konsep ini akan menjadi solusi yang menjanjikan untuk mewujudkan lapisan lambung yang hemat energi untuk AUV yang bergerak lambat.

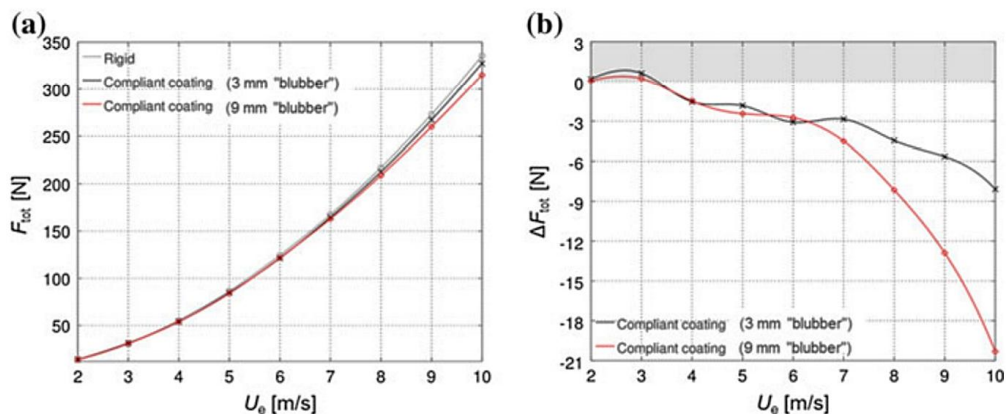


Gambar 4.3 Mikrograf elektron pemindaian kulit hiu (a) dan realisasi teknis lapisan pelepas kotoran laut dengan tekstur riblet pengurang hambatan (b)





Gambar 4.4 Visualisasi aliran turbulen dari pusaran searah aliran pada penampang vertikal di atas pelat datar (a) dan permukaan bertekstur riblet (b)



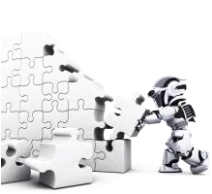
Gambar 4.5 Gaya hambat pada segmen haluan dengan permukaan kaku dan lentur dengan dua ketebalan berbeda pada lapisan "blubber" bagian dalam versus kecepatan terowongan air (a). Pengurangan hambatan terhadap permukaan kaku yang dicapai oleh dua lapisan lentur (b)

4.4 PENGINDERAAN TERINTEGRASI

Kulit mewakili antarmuka yang luas dengan lingkungan sekitar dan oleh karena itu ideal untuk mendeteksi dan mengirimkan isyarat lingkungan.

Material kulit fleksibel, seperti yang dibayangkan untuk teknologi kulit lumba-lumba yang dioptimalkan secara hidrodinamik, selanjutnya memungkinkan untuk menanamkan sensor spesifik (misalnya, mekanoreseptor, akustik, kapasitif, induktif, sensor suhu, atau optik). Material silikon yang lembut dan lentur yang telah terbukti mampu mempertahankan kondisi aliran laminar yang baik di sepanjang permukaan lambung perlu memiliki ketebalan tertentu (sekitar 10 mm) dan oleh karena itu sangat cocok untuk integrasi struktur penginderaan. Selain itu, material tersebut dapat dibuat transparan secara optik sehingga instrumen optik juga dapat diintegrasikan. Namun, potensi pengaruh integrasi sensor tersebut terhadap kinerja hidrodinamik perlu diselidiki.

Aset penting lainnya adalah deteksi, baik secara langsung maupun tidak langsung, kondisi permukaan selama operasi. Pendekatan langsung mencakup sensor kondisi



permukaan terintegrasi, seperti elemen penginderaan induktif/kapasitif dan polimer elektroaktif (EAP) untuk mengukur tingkat pengotoran secara langsung, melalui perubahan sifat listrik antarmuka permukaan dan peningkatan geser permukaan, sementara pendekatan tidak langsung bergantung pada observasi kinerja kendaraan dalam kerangka kerja pembelajaran mesin untuk mengekstrak informasi pengotoran.

4.5 PROSPEK DAN PEKERJAAN MASA DEPAN

Sebelumnya, isu-isu kritis yang disebutkan di atas biofouling, hidrodinamika, dan ketahanan telah dikaji secara terpisah atau dalam kombinasi salah satunya. Yang perlu dilakukan adalah melihat ketiga aspek tersebut secara bersamaan. Oleh karena itu, solusi baru (sinergis) diperlukan untuk memastikan fungsionalitas.

Dalam hal ini, kombinasi pelapisan fungsional dan pembersihan tampak menjanjikan, terutama untuk objek stasioner yang rentan mengalami kegagalan akibat teknologi perlindungan pengotoran yang bergantung pada aliran. Pembersihan aktif dapat dilakukan oleh robot pembersih kecil yang serupa dengan model biologis ikan pembersih, atau secara pasif oleh AUV yang melaju melalui stasiun pembersihan mekanis bawah laut. Konsep perawatan sesuai permintaan dapat diwujudkan (a) secara langsung oleh sensor yang memantau tingkat pengotoran dan, jika perlu, mengeluarkan perintah untuk pembersihan, atau (b) secara tidak langsung melalui pengamatan penurunan/perubahan kinerja kendaraan akibat peningkatan hambatan atau efek pengotoran lain yang dapat diamati.

Dengan bantuan kombinasi teknik pembelajaran mesin yang dipadukan dengan estimasi parameter kunci kendaraan berbasis model dan prediksi kinerja, robot pembersih dapat mengetahui kapan waktunya untuk membersihkan di lokasi tertentu (segmen lambung, baling-baling, sensor). Dalam perspektif ini, isu-isu seperti (i) integrasi fungsi aktuasi untuk struktur dan komponen adaptif tingkat lanjut, (ii) sistem biologis mandiri untuk menghasilkan bioluminesensi, (iii) potensi penyerapan dan identifikasi zat-zat tertentu (misalnya logam berat) patut dipertimbangkan untuk lebih meningkatkan spektrum kemampuan dan menjadikan kulit AUV benar-benar cerdas.



BAB 5

SISTEM MODULAR REKONFIGURASI WAHANA BAWAH AIR.

Penelitian perancangan sistem modular dan dapat dikonfigurasi ulang bertujuan untuk meningkatkan kegunaan wahana bawah air dengan memperluas fleksibilitas dan kemampuan adaptasinya terhadap situasi dan skenario baru. Hal ini akan dicapai melalui perancangan sistem modular pada sisi perangkat keras dan sistem perangkat lunak yang dapat dikonfigurasi ulang. Hal ini diperlukan karena perancangan wahana bawah air saat ini biasanya dirancang khusus untuk tugas tertentu atau sepenuhnya berbingkai terbuka. Meskipun opsi terakhir lebih fleksibel, opsi ini hampir secara eksklusif ditemukan pada sistem ROV, karena desain berbingkai terbuka biasanya memiliki optimasi hidrodinamik yang terbatas, membutuhkan pendorong yang kuat dan dengan demikian menghasilkan banyak energi yang hanya dapat disuplai melalui tether. Terdapat beberapa sistem AUV dengan desain modular, tetapi desain ini biasanya tidak menggabungkan modul dalam kerangka kendali wahana: Modul tambahan bersifat independen dari kendali wahana utama dan hanya digunakan untuk akuisisi data.

5.1 PENDAHULUAN

Pekerjaan pada desain sistem modular dan rekonfigurasi bertujuan untuk meningkatkan kegunaan wahana bawah air dengan memperluas fleksibilitas dan kemampuan adaptasinya terhadap situasi dan skenario baru. Hal ini akan dicapai melalui desain sistem modular pada sisi perangkat keras dan sistem perangkat lunak rekonfigurasi. Hal ini diperlukan karena desain wahana bawah air saat ini biasanya dibuat khusus untuk tugas tertentu atau sepenuhnya berbingkai terbuka.

Meskipun opsi terakhir lebih fleksibel, opsi ini hampir secara eksklusif ditemukan pada sistem ROV, karena desain berbingkai terbuka biasanya memiliki optimasi hidrodinamik yang terbatas, membutuhkan pendorong yang kuat dan dengan demikian membutuhkan banyak energi yang hanya dapat disuplai melalui tambatan. Terdapat beberapa sistem AUV dengan desain modular, tetapi desain ini biasanya tidak menggabungkan modul dalam kerangka kendali wahana: Modul tambahan bersifat independen dari kendali wahana utama dan hanya digunakan untuk akuisisi data.

5.2 CASING DAN INTERKONEKTIVITAS

Salah satu persyaratan utama dalam desain kendaraan bawah air adalah menjaga komponen elektronik kendaraan tetap aman dari lingkungan target, yaitu perendaman dalam air bertekanan tinggi. Hal ini dapat dilakukan dengan beberapa cara yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Untuk pekerjaan ini, strategi berikut akan dibahas:

- Casing Bertekanan:

Casing bertekanan menjaga perangkat tetap tertutup pada tekanan atmosfer, sehingga membatasi ruang antara perangkat dan air serta memberikan tekanan dari luar. Karena



gaya besar yang diberikan pada casing untuk perendaman dalam, casing cenderung berbentuk tabung atau bulat. Meskipun berat, casing memiliki keunggulan dalam menampung udara, menghasilkan daya apung, dan mengurangi dampak berat (untuk kendaraan yang terendam).

- **Pengecoran Resin:**

Pengecoran resin biasanya digunakan untuk perlindungan air dan perlindungan tekanan terbatas. Teknik ini paling banyak digunakan pada kendaraan selam dangkal, karena murah dan ringkas.

- **Terisi Oli Bertekanan Seimbang:**

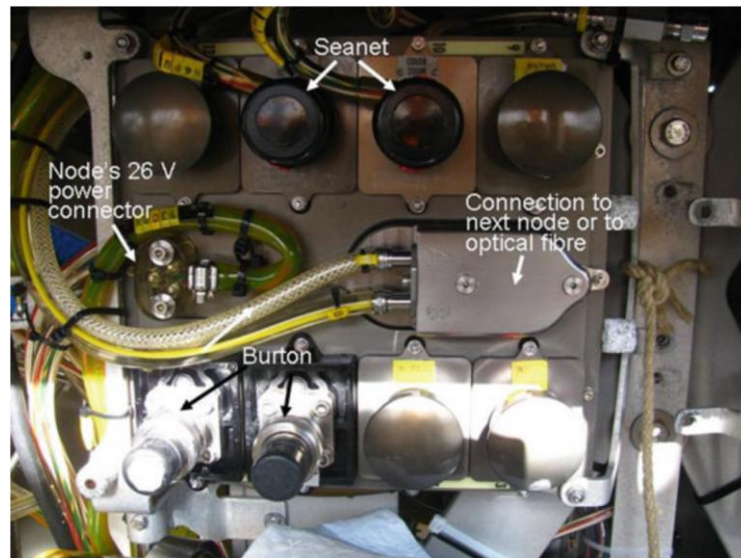
Penutup terisi oli bertekanan seimbang (PBOF) digunakan bersama komponen elektronik/mekanik yang tahan tekanan untuk melindungi komponen dari kontak dengan air laut. Salah satu keuntungan utama pengecoran resin adalah opsi untuk membuka dan menguras penutup untuk keperluan perawatan. Karena tidak ada perbedaan tekanan yang besar yang diberikan pada rumah itu sendiri, bentuknya bisa sangat beragam dan biasanya hanya memiliki ukuran cangkang yang kecil.

Metode lain untuk mengkategorikan desain kendaraan adalah jumlah rumah yang digunakan. Dalam pendekatan monolitik, jumlah rumah dijaga seminimal mungkin. Hal ini memiliki keuntungan mengurangi jumlah konektor dan kabel eksternal dengan mengorbankan rumah yang lebih kompleks (dan biasanya khusus). Karena beberapa perangkat (aktuator seperti pendorong, sensor seperti SONAR) memerlukan perendaman langsung dalam air, kendaraan tanpa konektor hampir tidak mungkin. Strategi desain yang berlawanan adalah pendekatan berbasis rangka, di mana sejumlah perangkat (yang dapat menggunakan metode rumah yang berbeda) disatukan oleh struktur pendukung dan komunikasi diwujudkan melalui konektor bawah air. Pendekatan ini memiliki keuntungan bahwa integrasi komponen *CotS (commercial of the shelf)* dapat lebih mudah diwujudkan, karena banyak sistem sensor bawah air tersedia dalam rumah yang dapat direndam. Kerugian utama adalah jumlah konektor dan kabel; dengan meningkatnya peringkat kedalaman, konektor bawah air cenderung besar dan bersama dengan kabel yang dibutuhkan dapat membentuk persentase yang signifikan dari massa kendaraan.

Karena tujuan dari pekerjaan ini adalah untuk menemukan pendekatan desain yang modular dan dapat dikonfigurasi ulang, pertanyaan tentang ekstensibilitas merupakan faktor penting dalam mengkategorikan kendaraan yang ada. Faktor terpenting di sini adalah standarisasi antarmuka yang digunakan dalam kendaraan. Ini bisa sesederhana menyediakan port ekstensi dengan kabel komunikasi dan daya yang ditentukan, tetapi karena tidak ada standar keseluruhan untuk port tersebut yang tersedia, biasanya memperluas kendaraan yang ada akan memerlukan pekerjaan pada rumah (pengkabelan, pemilihan antarmuka, dll.). Ada beberapa ekosistem yang memungkinkan fleksibilitas seperti itu, misalnya Sistem Telemetri Digital (DTS) oleh Schilling Robotics, yang menggunakan sistem antarmuka yang ditentukan dengan baik untuk penggunaan semua komponen dalam sistem ROV mereka (lihat Gambar 5.1). Contoh lain adalah sistem AUV Gavia, yang menggunakan desain di mana sejumlah modul dapat dirakit menjadi AUV dengan kemampuan yang berbeda (lihat Gambar 5.2). Mereka



menggunakan pendekatan monolitik, di mana setelah perakitan semua modul membentuk satu lambung tekanan tunggal. Antarmuka dicapai dengan konektor kering di sekat modul.



Gambar 5.1 Node DTS dari sistem ROV: Setiap port menyediakan daya 26 V @ 250 W dan antarmuka yang dapat dipilih (Fast-Ethernet, komunikasi serial, atau video analog). Dua jenis konektor yang berbeda dapat digunakan (Burton atau SeaNet). Gambar milik GEOMAR



Gambar 5.2 Dua opsi konfigurasi yang berbeda untuk AUV Gavia dari Teledyne. Setiap segmen lambung berisi komponen fungsional individual dan dilengkapi dengan antarmuka elektromekanisnya. Gambar milik Teledyne-Gavia

5.3 INFRASTRUKTUR KONTROL

Pada banyak kendaraan monolitik, infrastruktur kontrol bersifat spesifik kendaraan dan menggabungkan koneksi langsung dari setiap sensor ke unit pemrosesan pusat. Hal ini dapat berbeda untuk kendaraan yang lebih besar, terutama ROV di mana ekstensibilitas jauh lebih umum. Karena dalam sistem ROV, kemampuan untuk menyediakan semua data sensor pada satu titik (umbilikal) berasal dari penggunaan tele-operator, bus data cepat (seringkali bersifat serat optik) merupakan hal yang umum di sini.

Dalam dijelaskan arsitektur kontrol yang sebagian didasarkan pada koneksi ethernet di antara beberapa rumah tekanan. Sensor dan aktuator individual terhubung langsung ke unit pemrosesan di masing-masing rumah dan koneksi ethernet dilengkapi dengan sejumlah bus



khusus perangkat. Referensi menjelaskan arsitektur kontrol kursi belakang yang sering digunakan, di mana sistem navigasi dan kontrol kendaraan menangani operasi dasar kendaraan dan komputer muatan digunakan untuk pemrosesan sensor dan tujuan otonomi.

Desain Kendaraan Modular

Ide desain sistem yang modular dan dapat dikonfigurasi ulang adalah untuk memperluas contoh yang diberikan di bagian "Tinjauan Umum Metodologi Desain Saat Ini" dan menciptakan seperangkat aturan desain yang dapat menjadi dasar untuk masing-masing kendaraan. Karena banyaknya skenario aplikasi yang berbeda di mana kendaraan bawah air digunakan, desain ini tidak berfokus pada desain struktural tetapi menentukan antarmuka koneksi serta desain kontrol dan pedoman pemilihan perangkat keras.

5.4 ANTARMUKA KONEKSI

Tiga antarmuka koneksi yang berbeda harus ditentukan: antarmuka tujuan umum untuk sensor dan ekstensi, antarmuka daya tinggi untuk aktuator, dan antarmuka kecepatan data tinggi untuk koneksi uplink atau antar-hull.

Antarmuka tujuan umum (GPI) memiliki cakupan yang serupa dengan koneksi DTS Schilling. Antarmuka ini harus dapat berkomunikasi dengan beragam sensor dan menyediakan daya ke perangkat-perangkat ini. Jalur komunikasi ethernet dengan bandwidth Gigabit dikombinasikan dengan catu daya yang dapat dipilih, yaitu 12, 24, atau 48 V. Dengan bandwidth Gigabit-Ethernet, sejumlah sensor dapat diakses, mulai dari kamera digital hingga sensor akustik seperti DVL atau SONAR pencitraan. Diputuskan untuk menghilangkan koneksi serial yang banyak digunakan namun sudah ketinggalan zaman yang ditemukan di Schilling DTS karena perluasan sederhana: Dengan diperkenalkannya konverter serial ke ethernet yang sangat kecil (lihat Gambar 5.3), dimungkinkan untuk membuat adaptor yang dapat dicolokkan di antara perangkat serial dan GPI. Karena ukurannya yang kecil, konverter dapat dicetak ke konektor, hanya sedikit meningkatkan ukuran konektor bawah air secara keseluruhan.



Gambar 5.3 Konverter serial ke ethernet oleh Moxa

Daya disuplai melalui dua saluran, dengan tegangan dan arus pemutus yang diperlukan dapat dipilih dalam perangkat lunak konfigurasi. Hal ini dimungkinkan dengan penggunaan sirkuit sekering elektronik kecil yang mati ketika arus yang dikonfigurasi terlampaui. Karena dikontrol oleh perangkat lunak, sistem kontrol kemudian dapat bereaksi terhadap kejadian



tersebut dengan tindakan yang tepat. Oleh karena itu, konektor untuk GPI membutuhkan 9 (Gigabit-ethernet termasuk shield) +2 Pin. Konektor yang memungkinkan adalah konektor SubConn Ethernet seri 13-Pin atau Teledyne-Impulse MSSJ-14, yang keduanya telah diuji untuk tujuan ini.

Antarmuka daya tinggi (HPI) ditujukan untuk aktuator sekaligus transfer energi (misalnya, pengisian daya). Untuk tujuan ini, dua kabel disediakan untuk transfer daya dan sepuluh pin tambahan dapat dikonfigurasi sebagai sinyal analog (misalnya, untuk pembacaan sensor Hall) atau komunikasi menggunakan Gigabit-Ethernet. Tegangan sengaja tidak ditentukan karena akan membatasi fleksibilitasnya.

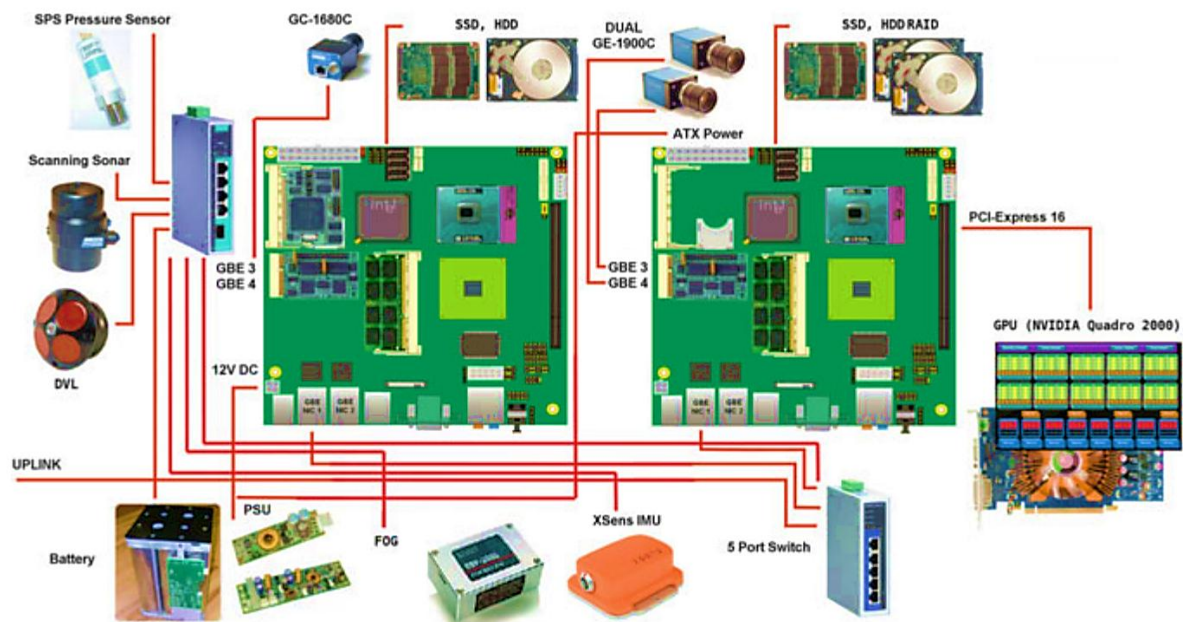
Antarmuka laju data tinggi (DRI) tersedia dalam dua jenis: data saja atau data dan daya (DRI+P). Koneksi data diwujudkan menggunakan antarmuka serat optik, yang dapat menangani laju data hingga 10 GBit. Ini berguna untuk tethering, transfer data, atau komunikasi antarkompartemen. DRI+P menggunakan konektor bawah air hibrida, di mana port serat optik dilengkapi dengan dua jalur catu daya yang dapat dipilih (12, 24, atau 48 V). Ini berguna untuk menghubungkan sensor bandwidth tinggi (seperti kamera) tanpa perlu menambahkan konektor lain untuk daya. Ada sejumlah konektor yang tersedia untuk kedua jenis, misalnya Seacon CS-MS untuk DRI atau seri Teledyne-Impulse Omega 53 × 2 untuk DRI+P.

5.5 DESAIN KONTROL

Infrastruktur kontrol dispesifikasikan sebagai kombinasi papan pemrosesan (PB) dengan uplink gigabit-ethernet. Penggunaan gigabit-ethernet sebagai bus komunikasi utama memiliki sejumlah keuntungan: semua data sensor dan kontrol tersedia di semua titik dalam sistem, redundansi dapat dibangun dengan mudah, dan integrasinya mudah. Ditambah dengan semakin banyaknya produsen peralatan bawah air yang mengadopsi ethernet sebagai antarmuka dan kemampuan untuk menggunakan perangkat dengan kecepatan berbeda pada satu bus, hal ini menjadikan ethernet sebagai tulang punggung sistem kontrol yang tangguh. Ketersediaan semua data di seluruh bus memungkinkan fitur-fitur seperti distribusi beban dinamis di antara beberapa papan pemrosesan serta manajemen daya dan penyimpanan yang cerdas.

Papan pemrosesan dapat berupa homogen (beberapa papan dengan tipe yang sama) atau heterogen, di mana masing-masing papan memiliki kemampuan pemrosesan khusus. Hal ini memungkinkan sejumlah kombinasi yang dapat dipilih sesuai dengan kebutuhan masing-masing kendaraan. Contoh desain seperti itu diberikan dalam Gambar 5.4, dengan kasus khusus bahwa kamera tidak terhubung ke bus ethernet kendaraan tetapi langsung ke PB individual.





Gambar 5.4 Diagram koneksi data AUV Dagon

5.6 VERIFIKASI KONTAINER UNTUK PERANGKAT KERAS ULANG-PROGRAM

Kendaraan bawah air otonom harus beroperasi secara independen, yaitu tanpa akses untuk pemeliharaan. AUV idealnya kembali ke tempat pemulihannya jika terjadi skenario kegagalan. Untuk menciptakan sistem yang toleran terhadap malfungsi, rekonfigurasi dinamis dalam FPGA modern menawarkan tingkat fleksibilitas yang tinggi. FPGA ini memungkinkan modifikasi runtime dari perangkat keras yang diterapkan. Berikut ini, kami mengkarakterisasi dua skenario yang menunjukkan manfaat rekonfigurasi runtime:

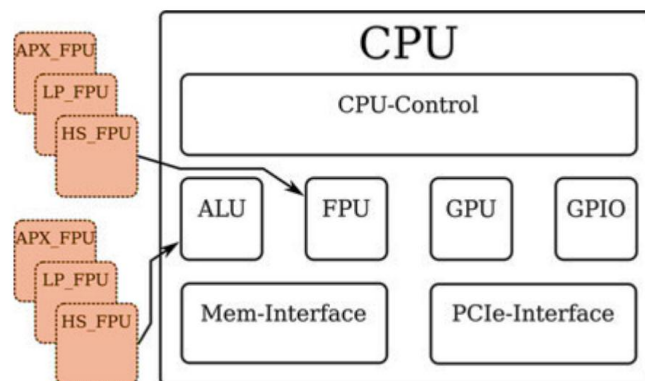
- Sebuah AUV bergerak relatif terhadap lokasi pemulihannya karena arus laut dalam, yang membutuhkan aktivitas pendorong yang lama untuk kembali. Untuk skenario ini, konservasi energi sangat penting. Untuk mengurangi konsumsi daya sistem pemrosesan utama, unit fungsional (misalnya unit logika aritmatika (ALU)/unit titik mengambang (FPU)/unit pemrosesan grafis (GPU)) diganti saat runtime. Penggantinya dapat mencakup berbagai profil. Tabel 5.1 menunjukkan tiga implementasi FPU yang berbeda. Varian APX didasarkan pada konsep komputasi aproksimasi. Dengan menerima kesalahan komputasi yang dapat ditoleransi, kecepatan kalkulasi tinggi dapat diperoleh dengan mengurangi konsumsi daya. Sebaliknya, FPU berdaya rendah (LP_FPU) memberikan hasil yang tepat, sekaligus menghemat daya. Namun, throughput data berkurang secara signifikan. Terakhir, FPU standar (berkecepatan tinggi) memberikan hasil yang tepat pada kecepatan tinggi dengan mengorbankan konsumsi daya yang tinggi.
- Uji Mandiri Terpadu (BIST) mendeteksi submodul yang gagal dalam sebuah FPGA. Karena redundansi modular ganda atau rangkap tiga (TMR), kesalahan tersebut dapat dikompensasi. Namun, untuk membangun kembali TMR, komponen yang gagal akan direlokasi ke area lain di FPGA yang masih berfungsi, karena dua dari tiga contoh TMR yang gagal tidak lagi memungkinkan kompensasi kesalahan. Relokasi ini tidak



mencegah situasi kritis, namun, proteksi TMR tidak akan mampu menoleransi kegagalan perangkat keras lainnya. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya (ditunjukkan pada Gambar 5.4), sistem kontrol di dalam AUV sudah dibangun dan diterapkan dengan mempertimbangkan redundansi untuk mengkompensasi kemungkinan kegagalan. Memanfaatkan teknik konfigurasi ulang pada tingkat FPGA memungkinkan fleksibilitas yang lebih besar dan tingkat ketahanan yang lebih tinggi. Ada banyak contoh aplikasi praktis untuk teknik ini. Di antaranya adalah peningkatan toleransi kesalahan, konfigurasi ulang yang memperhatikan daya, dan pengurangan area dengan time-division-multiplexing saat runtime. Aplikasi yang lebih praktis dari konfigurasi ulang parsial dapat diperiksa pada Gambar 5.5

Tabel 5.1 Contoh penggantian untuk FPU yang dapat dikonfigurasi ulang secara runtime di dalam sistem pemrosesan yang digunakan. Perutean, navigasi, dan tugas lainnya dipengaruhi oleh perhitungan varian FPU masing-masing.

	APX_FPU	LP_FPU	HS_FPU
Konsumsi daya	Sedang	Rendah	Tinggi
Kesalahan aritmatika	Ya	Tidak Ada	Tidak Ada
Throughput data	Tinggi	Rendah	Tinggi



Gambar 5.5 Kemungkinan penggantian submodul perangkat keras untuk mencapai profil operasi yang berbeda, tergantung pada persyaratan misi

Mengingat suatu sistem harus beradaptasi dengan perubahan persyaratan selama runtime (yaitu konservasi daya versus daya komputasi), berbagai submodul di dalam sistem pemrosesan dapat diganti secara dinamis saat runtime. Dalam contoh khusus ini, ALU dan FPU berkecepatan tinggi dapat digunakan saat daya komputasi diperlukan. Sebagai alternatif, varian yang lebih hemat daya (daya rendah) dapat digunakan, saat kecepatan eksekusi tidak penting. Implementasi desain semacam itu membutuhkan arsitektur perangkat keras yang dapat dikonfigurasi ulang.

Sebagai demonstrasi, Gambar 5.6 menggambarkan FPGA generik yang dapat dikonfigurasi ulang beserta komponen-komponen esensialnya. Slot yang ditentukan pengguna (RPn) dalam FPGA dapat ditulis ulang secara dinamis oleh berbagai varian implementasi logika.



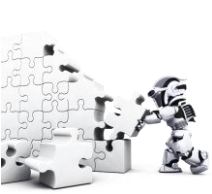
Varian-varian ini yaitu modul yang dapat dikonfigurasi ulang (RM) disimpan dalam memori konfigurasi (MEM). RM ditulis ke port kontrol di dalam FPGA oleh pengontrol rekonfigurasi parsial (PRC) jika diinginkan. Penggunaan rekonfigurasi parsial meningkatkan fleksibilitas sistem dan ruang desainnya secara signifikan. Verifikasi dan pengujian perangkat keras yang mendasarinya biasanya dilakukan sekali, sebelum komponen perangkat keras dipasang pada papan sirkuit cetak (PCB). Perubahan arsitektur perangkat keras saat runtime sebagaimana dipersyaratkan oleh aplikasi yang dituju juga memerlukan pendekatan baru dalam verifikasi dan pengujian.

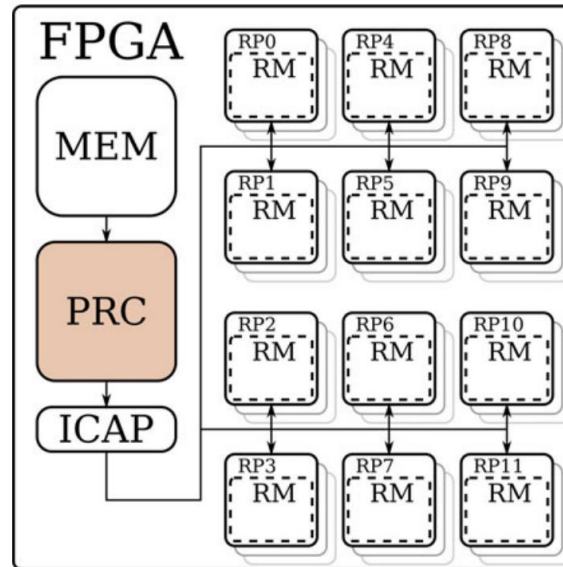
Setelah rekonfigurasi, pengoperasian komponen yang benar harus dipastikan sebelum desain melanjutkan operasi normalnya. Serupa dengan teknik seperti Build-In Self-Test (BIST), sistem harus mampu menentukan status operasionalnya secara terus-menerus, karena jika tidak, rekonfigurasi yang gagal akan membahayakan keamanan operasi. Penerapan verifikasi kontainer diusulkan untuk tujuan ini di antara skenario perlindungan lain yang ada. Setelah sebuah karya penting pada tahun 2014, deteksi serangan "Rowhammer" yang andal terhadap memori utama sistem (melalui perangkat lunak terhadap perangkat keras) telah ditangani. Salah satu kekuatan utamanya adalah overhead perangkat keras yang relatif rendah dengan tetap mempertahankan operasi yang terbukti benar. Skema ini khususnya dapat diterapkan pada logika antarmuka berbagai kompartemen AUV. Pelanggaran protokol komunikasi (terutama dalam kasus media bersama) dapat dideteksi dan diperbaiki saat runtime.

Karena arsitektur perangkat keras AUV yang dimaksud melibatkan beberapa sistem pemrosesan, yang mengeksekusi perangkat lunak dan oleh karena itu rentan terhadap serangan atau errata (di dalam silikon), keseluruhan sistem juga dapat dilindungi pada tingkat instruksi. Bergantung pada pemicunya berbahaya atau tidak sengaja mengeksekusi urutan instruksi tertentu dapat membuat sistem kontrol tidak berguna, sehingga diperlukan restart melalui watchdog. Untuk mengatasi kemungkinan waktu henti ini, konsep verifikasi kontainer yang lebih kompleks diterapkan pada desain prosesor RISC modern. Desain ini dilindungi dari malfungsi berbasis errata atau serangan selama eksekusi berdasarkan arsitektur penyaringan instruksi.

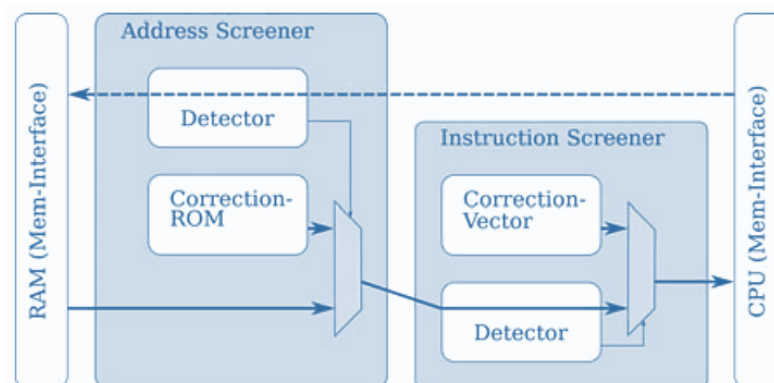
Ikhtisar teknik ini digambarkan pada Gambar 5.7 Komunikasi antara prosesor dan memori utamanya diamati (yaitu disaring) untuk instruksi yang mungkin berbahaya. Untuk perlindungan, mekanisme latensi rendah diaktifkan yang menunda eksekusi ke area yang telah ditentukan sebelumnya dengan substitusi perangkat lunak. Dalam publikasi yang mendasarinya, perkalian digantikan dengan substitusi yang kurang efisien, dengan asumsi adanya cacat pada instruksi mul. Verifikasi formal diterapkan untuk memastikan operasi logika tambahan yang benar.

Konsep yang sama dibahas dari perspektif perangkat lunak, sehingga metode ini juga dapat digunakan tanpa perangkat keras tambahan (yaitu khusus). Algoritma pencocokan string Aho-Corasick digunakan untuk memantau perangkat lunak yang dieksekusi saat runtime, untuk mengamati aliran instruksi untuk instruksi yang mungkin berbahaya (atau urutannya).





Gambar 5.6 Tinjauan umum infrastruktur rekonfigurasi parsial. Penempatan partisi yang dapat dikonfigurasi ulang mengikuti tujuan demonstrasi dan mungkin kurang seragam dalam praktiknya.



Gambar 7.7 Ikhtisar arsitektur penyaringan instruksi seperti yang disajikan dalam. Pemeriksa instruksi menunda eksekusi dengan memasukkan vektor koreksi. Pemeriksa alamat kemudian memasukkan kode substitusi dari ROM koreksi. (Garis alamat putus-putus, garis data padat)

Dengan cara yang sama, verifikasi mandiri menawarkan perlindungan tambahan terhadap kegagalan sistem yang tidak terduga dan telah dibahas sebelumnya. Berbeda dengan praktik umum, sistem dapat dikirim atau diterapkan lebih awal, jika verifikasi dan pengujian dibatasi pada fungsi-fungsi, yang penting untuk operasi, sehingga membuat desain sebagian tidak terverifikasi. Hanya jika verifikasi dapat direalisasikan secara dinamis sesuai permintaan, setelah sistem memasuki mode operasional, metodologi tersebut dapat diterapkan. Menggunakan perangkat keras verifikasi tambahan menutup celah yang disebutkan di atas, karena memungkinkan verifikasi runtime dari sistem perangkat keras. Jelas, mesin verifikasi itu sendiri perlu diverifikasi di awal.

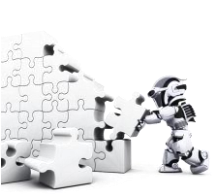
Dalam, penulis mengusulkan mesin verifikasi (yaitu SAT-Solver), yang dibangun untuk dimasukkan ke dalam desain perangkat keras. Alih-alih SAT-Solver tradisional, mereka tidak



memerlukan sistem operasi atau pustaka apa pun karena dapat berfungsi dalam mode pemetaan memori atau bahkan sepenuhnya sebagai submodul perangkat keras yang berdiri sendiri dalam desain sistem keseluruhan. Daya komputasi yang tinggi dan latensi yang rendah merupakan manfaat utama dari karya penting ini di bidang ini. Semua teknik ini memberikan hambatan keamanan tambahan selama pengoperasian sistem dengan tujuan meningkatkan keandalan sistem kendali dan komunikasi, yang penting untuk pengoperasian otonom wahana bawah air.

Prospek

Untuk menguji kelayakan ide desain yang disajikan dalam karya ini, pengembangan sistem robotik nyata perlu dipertimbangkan untuk mengimplementasikan ide-ide tersebut. Hal ini sebagian telah dilakukan dalam desain AUV "DeepLeng", yang dikembangkan dalam konteks proyek "EurEx-SiLaNa". Aspek lainnya, terutama verifikasi berbasis kontainer, dapat dilanjutkan untuk diuji dan dikembangkan pada sejumlah platform dengan tujuan jangka menengah untuk mengimplementasikan struktur tersebut ke dalam wahana bawah air yang fungsional dan mengevaluasi manfaatnya dalam misi nyata.



BAB 6

PROPULSI CERDAS

Kendaraan robotik bawah air yang mengapung bebas bebas bergerak di keenam derajat kebebasan. Meskipun pitch and roll aktif biasanya dibatasi oleh desain, yaitu stabilitas hidrostatik, kontrol sikap, posisi, dan kecepatan robot didasarkan pada pendorong yang mungkin dikombinasikan dengan permukaan kontrol, massa yang bergerak, atau sistem daya apung variabel. Sistem saat ini seringkali tidak memiliki kemampuan diagnostik mandiri dan redundansi, sehingga membuat kendali misi tingkat tinggi "tidak mengetahui" kondisi pendorong. Kurangnya informasi ini dapat menyebabkan keputusan biner yang tidak pasti tentang pembatalan atau kelanjutan misi. Informasi yang lebih baik, yang mungkin memperhitungkan redundansi sistem, akan memungkinkan pengendali misi tingkat tinggi untuk menyesuaikan respons kesalahan atau kinerja sistem, sehingga meningkatkan kemungkinan keberhasilan misi, setidaknya sebagian, termasuk pemulihan sistem dan data, dibandingkan dengan hilangnya data dan kemungkinan hilangnya sistem secara total.

Dalam bab ini, kami mengusulkan untuk membahas topik propulsi dari berbagai perspektif seperti desain dan kontrol motor, rekayasa sistem, serta optimasi melalui pembelajaran mesin dan identifikasi serta kontrol adaptif. Motivasi pendorongnya adalah penelitian terhadap solusi propulsi yang memenuhi persyaratan untuk robot bawah air otonom jangka panjang dengan mempertimbangkan efisiensi sistem yang tinggi, keandalan, dan kemampuan diagnostik mandiri. Hal ini akan dicapai melalui pendekatan sistem terintegrasi antara mesin listrik, baling-baling, dan mungkin juga nosel. Lebih lanjut, penelitian akan berfokus pada kinerja sistem waktu nyata (*real-time*) menggunakan teknik pembelajaran mesin yang dikombinasikan dengan pendekatan berbasis model yang lebih deterministik untuk prediksi dan pemantauan kinerja dalam rangka deteksi kegagalan kesalahan lunak dan keras.

6.1 KEADAAN TERKINI DAN MASALAH YANG DIKETAHUI

Sistem kendaraan bawah air tanpa awak biasanya terdiri dari beban hotel, beban propulsi, dan muatan. Beban hotel mencakup semua subsistem kendaraan yang diperlukan untuk operasi yang tepat, kecuali propulsi. Ini mencakup sistem kontrol, navigasi, dan komunikasi, serta komponen penyimpanan dan manajemen energi. Beban propulsi dipertimbangkan secara terpisah, yang menandakan pentingnya dan kompleksitasnya. Sistem propulsi konvensional terdiri dari baling-baling, poros tengah, terkadang kotak roda gigi, penggerak atau mesin dengan penutup, dan unit kontrol.

Gambar 6.1 menunjukkan beberapa konfigurasi pendorong dan sistem propulsi yang berbeda yang digunakan untuk menggerakkan dan mengendalikan kendaraan bawah air. Sebagai alternatif, yang disebut pendorong berpenggerak pelek, yang tidak memiliki susunan hub konvensional untuk poros dan penggerak, memiliki konfigurasi di mana elemen penggerak disusun mengelilingi diameter luar baling-baling. Dalam pengaturan ini, diameter rotor yang lebih besar pada mesin listrik dapat menghasilkan torsi yang lebih tinggi pada kecepatan yang



lebih rendah untuk menggerakkan baling-baling, sehingga cocok untuk penggerak langsung, berbeda dengan kebutuhan akan kotak roda gigi tambahan yang biasanya disertai dengan kerugian tambahan dan kebisingan mekanis/akustik yang lebih tinggi. Selain itu, dalam desain baling-baling tanpa hub, baling-baling dapat ditopang dari pelek, sehingga mengurangi risiko pengotoran pada baling-baling. Kerugian dari sistem berpenggerak pelek adalah bobotnya yang relatif tinggi dan inersia yang dihasilkan, akibat peningkatan massa yang berputar pada diameter yang lebih besar.

Selain itu, permukaan geser rotor yang relatif besar meningkatkan kerugian gesekan dan risiko permukaan bantalan yang terkontaminasi akibat kontaminasi dari perairan di sekitarnya. Sebagai perbandingan, sistem propulsi konvensional yang dipasang dan digerakkan secara aksial dibatasi oleh daya yang tersedia dan biasanya asimetris secara hidrodinamis, dengan motor penggerak berada di salah satu sisi baling-baling, yang secara efektif membatasi diameter mesin praktis dan oleh karena itu daya maksimum terpasang. Pertimbangan desain penting lainnya adalah pemisahan komponen listrik dan mekanis dari air laut, yang merupakan lingkungan konduktif dan korosif, serta pertimbangan tekanan. Meskipun masalah korosi biasanya ditangani dengan pemilihan material yang tepat, anoda korban, lapisan pelindung, atau kombinasinya, masalah desain rumah lebih kompleks.



Gambar 6.1 Contoh sistem propulsi bawah air. Baris atas: pendorong tanpa hub berpenggerak pelek. Gambar kiri: pendorong propulsi utama (Diameter dalam: 266 mm). Gambar kanan: Konfigurasi pendorong terowongan (Diameter dalam: 160 mm). Baris bawah:



Gambar kiri menunjukkan pendorong berpengerak pelek dengan penopang aksial; gambar kanan menunjukkan konfigurasi baling-baling berpengerak aksial konvensional untuk AUV.

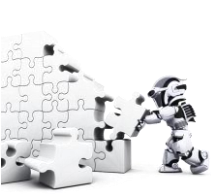
Kredit: MARUM, Universitas Bremen, Jerman

Saat ini terdapat tiga pendekatan desain. Salah satu pendekatannya adalah dengan menempatkan komponen-komponen listrik, termasuk motor yang beroperasi pada tekanan atmosfer. Pendekatan ini merupakan metode penempatan yang paling umum untuk elektronik. Namun, karena kebutuhan akan segel putar bertekanan tinggi untuk baling-baling yang digerakkan poros langsung, metode ini akan menimbulkan kerugian gesekan mekanis yang signifikan pada segel dan menimbulkan risiko kegagalan segel dinamis, khususnya untuk aplikasi kedalaman yang lebih besar.

Pendekatan kedua adalah dengan tidak menggunakan poros penetrasi langsung untuk menghubungkan rangkaian penggerak ke baling-baling. Sebagai gantinya, sambungan tersebut menggunakan kopling magnetik, aksial atau radial, untuk mengisolasi bagian luar yang berputar dari bagian dalam yang berputar secara ramah lingkungan. Metode kopling magnetik ini cocok untuk perbedaan tekanan rendah karena kebutuhan akan membran tipis antara bagian dalam dan luar kopling magnetik demi alasan efisiensi. Jika bagian dalam dijaga mendekati tekanan atmosfer, hal ini dapat sangat membatasi rentang kedalaman sistem. Sebagai solusi untuk sistem yang lebih dalam, bagian dalam diisi dengan cairan isolasi viskositas rendah, biasanya berbahan dasar minyak, yang dijaga sedikit di atas tekanan sekitar dengan kompensator pegas.

Hal ini akan meningkatkan konduktivitas termal antara lilitan motor, elektronik, dan rumah, dengan mengorbankan kerugian fluida gesekan yang lebih tinggi akibat mesin yang berputar dan keterbatasan untuk hanya menggunakan komponen dan pelapis elektronik yang kompatibel dengan tekanan dan fluida. Metode ketiga adalah dengan membungkus lilitan motor dan elektronik sepenuhnya dalam material padat/lentur dan memilih komponen yang terekspos, yaitu bantalan, busung, poros, sehingga dapat beroperasi dengan kokoh dalam kondisi sekitar. Masalah muncul di sini dari celah kecil yang diperlukan antara permukaan yang berputar, yang mungkin tidak memungkinkan pelapisan yang tepat atau terbatasnya pilihan material yang harus memenuhi beberapa persyaratan, seperti interaksi elektromagnetik stator-rotor yang efisien.

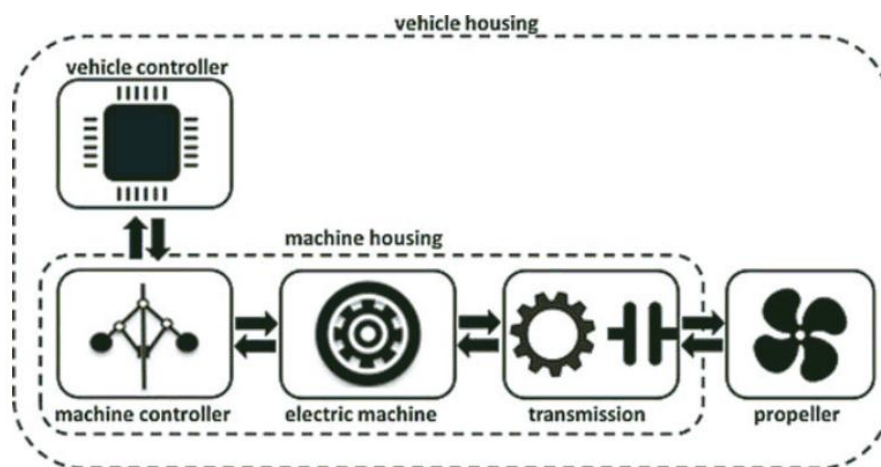
Selain pertimbangan desain yang disebutkan di atas, pertimbangan operasional akan berdampak besar pada pilihan solusi. Pada dasarnya, terdapat dua jenis persyaratan operasional untuk sistem propulsi: operasi melayang dan operasi tipe survei. Sementara operasi melayang, seperti yang ditunjukkan namanya, mengharuskan sistem propulsi untuk beroperasi di sekitar titik operasi kecepatan nol, dua arah, untuk mempertahankan posisi. Sebaliknya, operasi jenis survei dilakukan di sekitar rentang kecepatan desain yang sempit, dengan penekanan khusus pada efisiensi sistem pada titik tersebut.



Desain Sistem

Untuk tujuan penelitian ini kami tidak mempertimbangkan sistem yang digerakkan hidrolik. Sistem-sistem tersebut sejauh ini secara eksklusif digunakan dalam aplikasi ROV, karena kepadatan daya yang tinggi dari motor hidrolik. Karena sistem hidrolik membutuhkan unit tenaga hidrolik (HPU) untuk menggerakkan beban hidrolik, sistem ini tidak cocok untuk kendaraan bawah laut yang otonom karena efisiensi energi yang buruk dan kompleksitas sistem secara keseluruhan.

Gambar 6.2 menunjukkan diagram sistem penggerak listrik khas dan interaksi antara komponennya. Selain interaksi ini, sistem propulsi merupakan bagian integral dari kendaraan bawah laut, berinteraksi dengan hidrodinamika kendaraan.



Gambar 6.2 Diagram sistem sistem propulsi khas. Perhatikan bahwa sistem drive langsung tidak akan menggunakan gearbox dan baling-baling mungkin disalin

6.2 PERSYARATAN UNTUK PROPULSI CERDAS

Area aplikasi yang khas untuk kendaraan bawah laut otonom telah berevolusi selama beberapa dekade terakhir. Mereka telah berkembang dari aplikasi tipe survei akustik ketinggian tinggi khas, menggunakan sonar sidescan atau multi-balok, menuju misi jenis survei optik ketinggian yang lebih rendah. Selain kebutuhan akan kualitas tinggi, pencitraan data dan kendala fisik adsorpsi cahaya dan pertimbangan energi berpose pada aplikasi tersebut, kemampuan untuk mendekati dasar laut dan menghindari tabrakan penting untuk operasi tersebut. Terlepas dari deteksi rintangan, operasi yang aman dan andal sangat penting untuk mencapai kemampuan manuver ini. Untuk mencapai mane-verability yang tinggi pada kecepatan yang relatif rendah, permukaan kontrol tidak memadai karena mereka membutuhkan kecepatan minimum untuk memberikan otoritas kontrol yang memadai untuk menghindari hambatan dengan aman di dekatnya.

Untuk mengatasi masalah ini, kendaraan yang membutuhkan tingkat manuver tingkat tinggi menggunakan pendorong tambahan untuk menyediakan kekuatan kontrol yang memadai. Namun kendaraan ini sebagian besar digunakan untuk survei mikro-bathymetric dan fotogram-metrik dari formasi geologis, bangkai kapal atau saluran pipa. Baru-baru ini telah ada kecenderungan dalam industri untuk bergeser dari kendaraan yang dioperasikan dari jarak



jauh untuk inspeksi dan tugas manipulasi sederhana menuju operasi yang semakin otonom. Dengan pergeseran dari kendaraan yang dioperasikan dari jarak jauh ke kendaraan otonom, kebutuhan dan permintaan akan AUV yang mampu melayang meningkat.

Ini menuntut berbagai jenis sistem propulsi pada kendaraan otonom. Operasi yang melayang menghasilkan peningkatan pemuatan dinamis pada sistem propulsi dibandingkan dengan operasi survei. Untuk aplikasi industri, khususnya untuk sistem penduduk laut, pendorongnya harus sangat dapat diandalkan dan kuat. Persyaratan lebih lanjut pada sistem propulsi, dan khususnya pada dinamika sistem, dihasilkan oleh prospek tugas intervensi yang sepenuhnya otonom di masa depan menggunakan AUV. Mempertimbangkan basis kendaraan yang mengambang bebas, sistem propulsi keseluruhan harus memberikan kekuatan kontrol yang substansial pada tingkat dinamis yang tinggi untuk menyelesaikan tugas manipulasi yang signifikan.

Persyaratan ini tidak hanya tercermin dalam tuntutan pada mesin listrik dan baling-baling tetapi juga dalam kontrol bandwidth tinggi untuk memberikan gaya kesetiaan tinggi dan vektor torsi yang diperlukan untuk mengimbangi gaya reaktif dan torsi yang mungkin dialami sistem. Tuntutan pada respons dorong yang akurat dan cepat bersama dengan rezim hidrodinamik yang kompleks, yaitu interaksi lambung-lambung dan operasi dua arah, membutuhkan pendekatan baru untuk pertanyaan kontrol, kombinasi pengontrol non-linear dengan strategi kontrol adaptif dan mungkin pendekatan pembelajaran mesin.

Pada saat yang sama, orang tidak boleh lupa bahwa kita dibatasi oleh kekuatan on-board yang tersedia. Peningkatan permintaan pada sistem propulsi datang dengan biaya peningkatan konsumsi energi, menambahkan kebutuhan akan efisiensi sistem yang tinggi. Ini termasuk desain termal yang memadai.

Di sisi mekanis, karena AUV beroperasi pada tekanan ambien yang signifikan, hubungan transmisi antara mesin listrik dan baling-baling adalah yang paling penting, bukan hanya karena potensi masalah keandalan tetapi juga karena mereka dapat menjadi sumber utama untuk gesekan dan oleh karena itu menyebabkan kehilangan daya.

Persyaratan sistem secara keseluruhan dapat diringkas sebagai:

- Keandalan dan ketahanan
- Kisaran dinamis tinggi
- Otoritas kontrol yang sangat baik
- Efisiensi sistem propulsi keseluruhan yang tinggi
- Deteksi dan diagnostik kesalahan
- Efisiensi sistem
- Desain motor sehubungan dengan pendinginan, torsi maksimum, tongkat slip rendah dan hisis.

6.3 PENDEKATAN DESAIN SISTEM TERPADU

Melihat persyaratan sistem, untuk mencapai kinerja yang diinginkan, sistem harus dipertimbangkan secara keseluruhan. Sangat berbeda dari pabrik propulsi jenis survei, di mana rentang operasi yang sempit memungkinkan untuk optimalisasi sederhana sistem,



kendaraan multi-thruster yang melayang secara signifikan lebih kompleks. Opsizing satu sub-komponen tunggal tanpa memperhatikan efek pada komponen lain akan menyebabkan desain yang cukup tidak efisien.

Kami akan menggunakan pendekatan desain terintegrasi iteratif menggunakan teknik modal elektro-mekanis untuk mengoptimalkan keseluruhan desain sistem. Ini harus memasukkan pertimbangan interaksi hull-thruster menggunakan CFD dan teknik pemodelan lainnya, seperti interaksi struktur fluida. Namun pendekatan ini terbatas untuk perubahan perlahan-lahan sebagian besar tingkat dorongan uni-directional, karena perubahan dorongan cepat dan hasil perubahan dalam kondisi aliran, khususnya selama pembalikan dorongan untuk melayang kendaraan akan menghasilkan pola aliran yang sangat kompleks dan kacau.

6.4 DESAIN MESIN LISTRIK

Persyaratan untuk desain mesin listrik sebagai perangkat propulsi untuk kendaraan bawah air ditentukan oleh permintaan operasi otonom di lingkungan bawah air. Dalam pengamatan jarak jauh atau aplikasi pengawasan area yang luas, permintaan yang paling penting adalah konsumsi daya yang rendah dan efisiensi tinggi.

Untuk keperluan melayang dalam aplikasi manipulasi bawah air, ada kebutuhan untuk daya tinggi dan kepadatan torsi dalam kombinasi dengan konsumsi daya rendah dan presisi kontrol propulsi untuk dapat memenuhi tuntutan untuk posisi yang tepat bahkan dalam lingkungan yang mengganggu dengan kecepatan arus tinggi. Kedua aplikasi membutuhkan tingkat keamanan kegagalan yang tinggi karena mode operasi otonom.

Untuk alasan ini, toleransi kesalahan adalah aspek penting. Sistem penggerak tiga fase konvensional kehilangan kemampuannya menghasilkan torsi output konstan jika terjadi kegagalan listrik. Topologi penggerak toleran kesalahan memungkinkan kompensasi torsi pengereman yang terjadi jika terjadi kegagalan dan pembuatan output torsi konstan bahkan dalam operasi pasca-kesalahan. Ini dapat dicapai dengan desain multi-fase di mana lebih dari tiga fase listrik konvensional untuk sistem penggerak digunakan. Desain ini memungkinkan redundansi di mesin listrik. Misalnya. Dalam hal kegagalan submachine tiga fase dalam desain enam fase, satu rodil dapat mengkompensasi osilasi torsi yang terjadi atau torsi pengereman yang gagal.

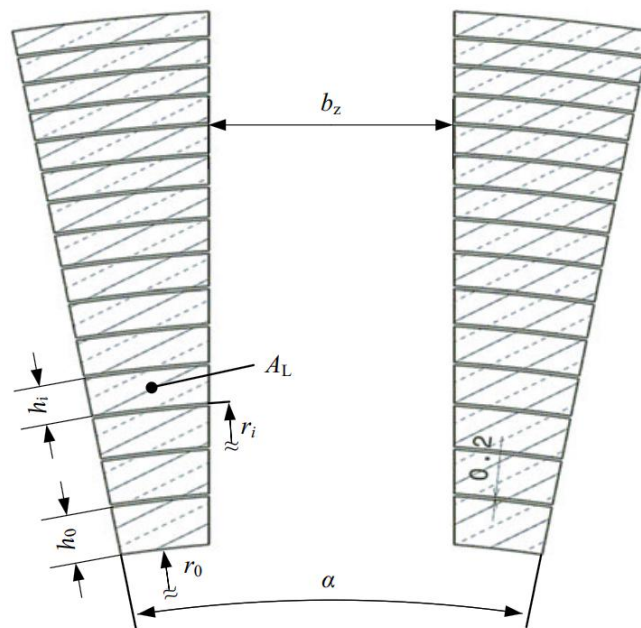
Metode kontrol tanpa sensor memberikan kemampuan tambahan keamanan kegagalan yang lebih tinggi karena kemungkinan berubah ke algoritma kontrol yang sesuai jika terjadi kegagalan sensor sudut yang sangat penting untuk kontrol mesin listrik yang sinkron. Topik tambahan adalah transmisi daya mekanik ke baling-baling. Baling-baling yang digerakkan oleh poros membutuhkan segel poros putar. Ini dapat mengganggu keandalan jangka panjang karena kebocoran, kerugian gesekan, dan masalah abrasi. Salah satu cara untuk mengatasi kesulitan ini adalah penggunaan kopling magnetik seperti yang disebutkan sebelumnya. Ini terkait dengan lebih banyak persyaratan ruang bobot dan instalasi. Karena pendorong yang digerakkan oleh pelek membutuhkan diameter yang lebih besar dan karenanya lebih berat, sifat-sifat ini dapat sangat penting untuk sistem lengkap mengenai muatan, jangkauan, dan waktu operasi. Dengan demikian, penambahan dalam ukuran atau



berat sistem penggerak mungkin tidak layak untuk sistem propulsi semacam ini. Oleh karena itu, jenis transmisi mekanis harus dievaluasi secara akurat sehubungan dengan persyaratan penerapan kendaraan.

6.5 PENDEKATAN MANUFAKTUR BARU

Gulungan konvensional untuk mesin listrik diproduksi dengan kabel bundar yang berliku. Dalam beberapa kasus, kawat persegi panjang digunakan untuk meningkatkan faktor pengisian slot yang dapat mencapai hingga 60% dengan cara ini. Dalam produksi massal tinggi seringkali jauh lebih rendah sekitar 30-40%.



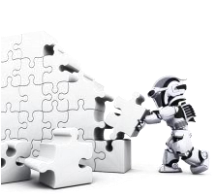
Gambar 6.3 Variabel Tinggi dan Lebar Bentuk Konduktor

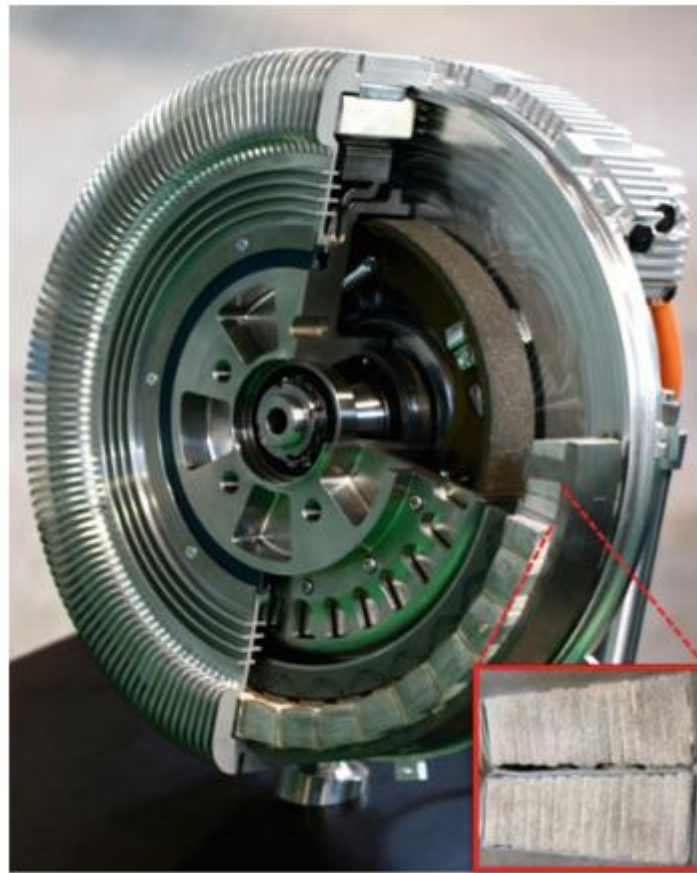
Pendekatan baru adalah pembuatan kumparan dengan pengecoran. Hal ini memungkinkan desain luas penampang yang sepenuhnya bebas di setiap lapisan lilitan. Dengan demikian, dimungkinkan untuk merancang penampang individual untuk setiap lapisan lilitan (lihat Gambar 6.3 dan Persamaan 6.1). Dengan pendekatan ini, faktor pengisian slot sebesar 80% atau lebih dapat dicapai.

Persamaan 6.1: Tinggi lapisan lilitan yang secara teoritis optimal

$$H_1 = \frac{r_1 / \alpha (\alpha - \sin(\arcsin(b_z / 2r_i)))}{++\sqrt{(r_i / \alpha (\alpha - \sin(\arcsin(b_z / 2r_i)))) - 2A_L / \alpha}} \quad (6.1)$$

Dengan meningkatkan faktor pengisian slot, total luas penampang material penghantar di slot mesin meningkat, yang mengurangi resistansi total kumparan. Hal ini secara langsung mengurangi rugi-rugi akibat resistansi ohmik.





Gambar 6.4 PMSM penggerak langsung torsi tinggi dengan kumparan aluminium cor

Daya dan torsi kontinu mesin listrik dibatasi oleh perilaku termalnya. Dengan menyesuaikan luas penampang setiap lapisan lilitan dengan area yang tersedia, tidak hanya faktor pengisian slot yang meningkat, tetapi juga resistansi termal seluruh lilitan terhadap penyerap panas di batas luar tumpukan laminasi berkurang secara substansial. Selain itu, luas penampang pada lilitan ujung dapat ditingkatkan, yang menghasilkan pengurangan resistansi lebih lanjut. Susunan konduktor datar pada lapisan lilitan juga mengurangi efek perpindahan arus yang jika tidak demikian akan meningkatkan rugi-rugi secara signifikan pada kecepatan putar yang lebih tinggi.

Semua efek ini berkontribusi pada peningkatan karakteristik termal dan kinerja mesin listrik tanpa meningkatkan ukuran dan berat. Pengurangan berat lebih lanjut dimungkinkan dengan penggunaan aluminium sebagai material penghantar. Berkat faktor pengisian slot yang tinggi dan perilaku termal yang sangat baik, hal ini menghasilkan penurunan rugi-rugi ohmik sekaligus penurunan bobot yang signifikan. Penurunan rugi-rugi yang signifikan ini tidak hanya menghasilkan kinerja yang lebih tinggi, tetapi juga peningkatan efisiensi dan dengan demikian penurunan konsumsi daya secara keseluruhan (Gambar 6.4).

6.6 PENGINDERAAN TERINTEGRASI

Pendorong untuk sistem bawah air umumnya merupakan komponen yang rapuh, rentan terhadap kerusakan akibat kerusakan bantalan, abrasi, dan penyumbatan komponen



akibat kontaminasi. Karena kontrol derajat kebebasan dalam banyak kasus tidak dirancang secara redundan, pendorong dapat dianggap sebagai satu titik kegagalan yang dapat menyebabkan kerugian fatal, terutama ketika mempertimbangkan kendaraan bawah air otonom.

Pengamatan ini mengarah pada kesimpulan bahwa pemantauan pendorong yang ekstensif sangat penting untuk operasi yang aman. Meskipun integrasi teknologi penginderaan pada aktuator untuk aplikasi di darat sudah sangat maju, teknologi pendorong masih kekurangan sebagian besar sensor. Alasannya dapat ditemukan pada persyaratan mekanis yang tinggi terkait sensor yang bersentuhan dengan fluida di bawah tekanan ambien yang tinggi. Informasi pendorong mengenai properti berikut ini diperlukan:

Sifat fisik	Informasi turunan
Arus	Beban motor
Suhu	Tegangan termal
Kecepatan putar	Masukan kontrol
Daya dorong	Masukan kontrol

Terutama rasa dorong sangat menarik berkaitan dengan propulsi bawah air karena ini adalah keluaran kontrol untuk model kontrol bawah air klasik. Dorongan tidak dapat dimodelkan dengan melihat pendorong itu sendiri, itu tergantung pada area integrasi, kondisi aliran fluida di sekitarnya dan jenis baling-baling yang digunakan. Hingga saat ini, eksperimen identifikasi sistem yang kompleks diperlukan untuk mendapatkan pemetaan kecepatan putar baling-baling dan dorongan. Deteksi dorongan dapat dilakukan dengan mengukur perpindahan aksial poros dan rotor mesin listrik, masing-masing. Ada beberapa pendekatan untuk penentuan perpindahan aksial rotor tanpa sensor misalnya. Metode-metode ini berasal dari kontrol motor tanpa bantalan. Mereka menggunakan parameter kontrol internal seperti tegangan dan arus untuk penentuan perpindahan. Dengan menerapkan metode tersebut pada pengukuran perpindahan aksial mesin listrik, keandalan dapat ditingkatkan karena tidak memerlukan perangkat keras sensor, tetapi juga presisi pengukuran dapat ditingkatkan dalam kondisi lingkungan yang keras dan hambatan bantalan yang kaku, seperti yang terjadi pada aplikasi bawah air.

6.7 OPTIMASI PEMBELAJARAN MESIN

Algoritma pembelajaran mesin sangat cocok untuk permasalahan yang optimasinya bergantung pada variabel multivariat yang saling memengaruhi. Teknologi pendorong memiliki beberapa permasalahan optimasi dalam hal ini. Kami menyajikan tiga pendekatan di mana pembelajaran mesin dapat bermanfaat, dan menyajikan karya-karya sebelumnya beserta arahan penelitian kami.

Kinerja pendorong tidak hanya bergantung pada efisiensi mesin listrik, tetapi juga dipengaruhi oleh jenis aliran fluida dan hidrodinamika struktur pendorong. Selain pendekatan optimasi manual berdasarkan simulasi dalam dinamika fluida komputasional (CFD),



pendekatan optimasi menggunakan pembelajaran mesin dapat digunakan untuk struktur robotik. Dalam, struktur lambung AUV dioptimalkan menggunakan algoritma genetika yang dipadukan dengan simulasi CFD.

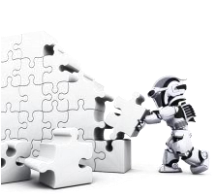
Algoritma genetika untuk mengoptimalkan desain baling-baling saluran atau wahana kendali jarak jauh (ROV). Desain bilah baling-baling merupakan tujuan optimasi lain dalam penelitian. Penelitian ini menghasilkan perangkat lunak sumber terbuka yang dapat digunakan untuk mewujudkan bilah baling-baling yang dioptimalkan untuk kebutuhan spesifik.

Sebagai kesimpulan dari karya-karya sebelumnya ini, dapat dinyatakan bahwa sebagian besar pendekatan untuk mengoptimalkan hidrodinamika AUV atau pendorong dilakukan pada tingkat komponen dan bukan pada tingkat sistem. Terkait pendorong, kami mengusulkan pendekatan optimasi yang melihat berbagai kemungkinan optimasi pada pendorong secara paralel dan dengan demikian memanfaatkan efek timbal balik dalam mengoptimalkan penggerak listrik, hidrodinamika, serta baling-baling. Mendeteksi deviasi dari model pendorong selama operasi merupakan peluang lain untuk menerapkan algoritma pembelajaran mesin. Dalam karya, pendekatan pembelajaran penguatan digunakan untuk memulihkan dari kegagalan pendorong. Pendekatan lain untuk melakukan diagnosis kesalahan dijelaskan dalam. Di sini, filter partikel Gaussian digunakan untuk memperkirakan model kegagalan serta status gerak. Masalah optimasi lain yang cocok untuk pembelajaran mesin adalah identifikasi pengontrol.

Karya-karya kami sendiri dalam domain ini membahas optimasi struktur robotik menggunakan algoritma genetika. Deteksi kesalahan pendorong menggunakan model regresi serta pengembangan pengontrol menggunakan optimasi kumpulan partikel bersama dengan algoritma genetika. Penelitian mendatang di bidang pendorong bawah air akan berfokus pada optimasi berbasis pendekatan sistem untuk hidrodinamika, parameter motor, serta desain baling-baling. Hal ini membutuhkan pendekatan pembelajaran mesin kemungkinan besar berbasis algoritma genetika yang mengembangkan desain baling-baling, pengaturan motor listrik, serta lambung yang sesuai untuk hidrodinamika secara paralel dengan saling ketergantungan, sehingga memunculkan bidang penelitian yang menarik di bidang pembelajaran mesin.

Kesimpulan

Sistem propulsi untuk robot bawah air dapat didekomposisi menjadi beberapa subsistem, di mana setiap subsistem dapat dioptimalkan sesuai skenario aplikasi robot yang diinginkan. Dapat diperkirakan bahwa untuk kendaraan bawah air otonom, skenario aplikasi ini akan bergeser dari tugas observasional murni menjadi tugas yang melibatkan aktivitas melayang serta dukungan operasi intervensi. Konsekuensinya memengaruhi semua subsistem dalam desain propulsi. Untuk menghasilkan gaya penyeimbang, torsi tinggi diperlukan. Sensor yang memantau status sistem diperlukan untuk meningkatkan keandalan sistem propulsi serta presisi kontrol posisi dengan mengukur gaya dorong secara langsung dan menerapkan algoritma kontrol baru. Pendekatan Pembelajaran Mesin memungkinkan eksplorasi desain lebih lanjut dalam hal desain sistem, deteksi kesalahan, serta realisasi pengontrol adaptif yang



membuka jalan menuju muatan yang dapat dikonfigurasi ulang tanpa perlu menjalankan ulang proses identifikasi sistem pengontrol.



BAB 7

KOMUNIKASI KENDARAAN BAWAH AIR OTONOM

Komunikasi nirkabel sangat penting bagi kendaraan bawah air otonom (AUV) untuk memberikan instruksi kerja, meneruskan data yang diindra, atau mengoordinasikan beberapa AUV yang bekerja secara berkelompok. Namun, komunikasi di lingkungan bawah air tidak andal dan tidak memungkinkan laju data tinggi karena interferensi yang tinggi dan kondisi propagasi sinyal yang buruk. Pada bab ini mengulas konsep-konsep yang ada untuk komunikasi bawah air, baik dari segi transfer informasi maupun dari aspek jaringan. Memperkenalkan komunikasi semantik membantu mengurangi jumlah data yang ditransfer dengan memanfaatkan informasi sisi semantik. Jaringan oportunistik memungkinkan penerusan data ujung ke ujung tanpa konektivitas permanen dan dapat diperluas untuk memanfaatkan teknologi komunikasi yang paling sesuai saat meneruskan data dengan ukuran dan prioritas tertentu. Pembelajaran Mesin (ML) membantu mengingat dan mengklasifikasikan informasi latar belakang untuk meningkatkan efisiensi komunikasi.

7.1 PENDAHULUAN

Operasi otonom kendaraan bawah air memungkinkan operasi yang lebih fleksibel dibandingkan dengan kendaraan yang dioperasikan jarak jauh. AUV memungkinkan kemampuan manuver yang lebih baik daripada solusi tertambat dan operasi jarak jauh yang memungkinkan solusi canggih untuk misi ilmiah dan operasi pencarian. Lebih lanjut, beberapa AUV dapat dioperasikan bersama dalam konsep swarm untuk melakukan operasi yang lebih efisien dan efektif. Selain catu daya yang andal dan pemosisian yang presisi, komunikasi nirkabel yang efektif merupakan salah satu persyaratan utama untuk mengoperasikan AUV. Deskripsi pekerjaan perlu dikomunikasikan kepada AUV dan swarm AUV bekerja sama sebagai tim untuk mencapai tujuan bersama berdasarkan pertukaran informasi antar AUV.

Sayangnya, lingkungan bawah air secara signifikan memengaruhi pendekatan transmisi yang tersedia seperti komunikasi akustik, elektromagnetik, induksi magnetik, dan optik. Pendekatan ini memiliki jangkauan pendek, laju data rendah, interferensi/atenuasi tinggi, atau gangguan tautan. Oleh karena itu, komunikasi nirkabel yang andal merupakan salah satu tantangan utama dalam robotika bawah air dan membutuhkan desain bersama yang cermat antara sistem komunikasi dan teknologi AUV. Misalnya, koordinasi terdistribusi AUV melalui kontrol konsensus atau algoritma pembelajaran terdistribusi yang mencapai estimasi konsensus berdasarkan data lokal perlu diadaptasi.

Pengoperasian tim AUV membutuhkan komunikasi deskripsi misi, informasi kontrol, dan data ilmiah untuk pelaksanaan misi kooperatif dalam lingkungan komunikasi bawah air yang keras. Tugas yang menantang ini membutuhkan protokol komunikasi canggih yang secara aktif mencari peluang komunikasi berdasarkan rezim informasi yang dipelajari. Lebih lanjut, makna dan pentingnya pesan untuk AUV terdistribusi harus dipertimbangkan dengan memanfaatkan sifat semantik perintah misi untuk lebih mengoptimalkan informasi yang akan



ditransfer. Untuk kedua konsep tersebut, pendekatan Pembelajaran Mesin (ML) yang sesuai akan memungkinkan desain dan optimasi yang fleksibel.

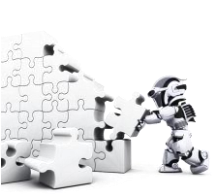
7.2 TEKNOLOGI KOMUNIKASI BAWAH AIR

Pengoperasian wahana udara nir awak (UAV) di atas permukaan dimungkinkan oleh komunikasi radio yang memastikan pertukaran pesan perintah dan muatan pada kecepatan data tinggi dengan penundaan kecil dan keandalan yang dapat diterima. Untuk sistem otonom bawah air, diperlukan tautan komunikasi serupa untuk bertukar informasi kendali dan data ilmiah. Sayangnya, komunikasi bawah air sulit dilakukan karena kondisi propagasi yang mengakibatkan penundaan waktu yang lama dan kecepatan data yang rendah. Selanjutnya, kami meninjau prinsip-prinsip utama yang digunakan untuk komunikasi bawah air dan mencantumkan karakteristik utamanya.

Komunikasi radio didasarkan pada gelombang *elektromagnetik* (EM) yang merambat di udara dengan kecepatan cahaya; kecepatan data tinggi dapat dicapai dengan menggunakan frekuensi tinggi. Sayangnya, di lingkungan bawah air, gelombang EM rentan terhadap kehilangan energi yang parah yang juga meningkat pesat seiring dengan frekuensi di air laut. Menggunakan komunikasi EM frekuensi rendah untuk meningkatkan jangkauan datang dengan kekurangan ukuran antena yang besar dan laju data yang terbatas. Dalam sistem komunikasi radio bawah air dianalisis di mana laju data sekitar 400 kbit/s dan 11 Mbit/s pada jarak 2 dan 1,6 m menggunakan 768 MHz telah ditunjukkan. Untuk 2,462 GHz dan jarak 20 cm, throughput 100 Mbit/s tercapai, sedangkan pada 5 GHz dan 10 cm laju data berkurang menjadi 10 Mbit/s. Dengan demikian, di dalam air kita harus menggunakan frekuensi sedang untuk komunikasi jarak pendek atau frekuensi yang lebih rendah untuk jarak yang lebih jauh.

Berbeda dengan gelombang EM, gelombang akustik merambat lebih efisien di bawah air karena media transmisi lebih tahan terhadap kompresi. Dengan demikian, gelombang akustik merambat secara signifikan lebih cepat dan lebih jauh di bawah air, yaitu, pada kecepatan sekitar 1500 m/s dibandingkan dengan 340 m/s di udara, yang menjadikan komunikasi akustik sebagai teknologi lapisan fisik yang umum dalam jaringan bawah air. Meskipun demikian, komunikasi akustik juga menghadapi banyak masalah, seperti penundaan perambatan yang tinggi, laju data yang sangat rendah karena bandwidth yang tersedia terbatas, dan perilaku kanal yang bergantung pada lingkungan (misalnya, multi-path dan fading). Karakteristik ekstrem kanal bawah air menyebabkan laju kesalahan bit yang tinggi dan kehilangan konektivitas sementara oleh zona bayangan.

Dalam dilaporkan, bahwa sistem jarak jauh yang beroperasi lebih dari beberapa puluh kilometer memiliki bandwidth hanya beberapa kHz, sementara sistem jarak pendek yang beroperasi lebih dari puluhan meter mungkin memiliki bandwidth lebih dari 100 kHz. Untuk kedua kasus, hanya laju bit rendah dalam urutan puluhan kbit/s yang dicapai oleh perangkat yang ada. Mewujudkan laju data yang lebih besar melalui komunikasi akustik merupakan tantangan besar dan pendekatan canggih menggunakan, misalnya, multiplexing pembagian frekuensi ortogonal (OFDM), multiple-input multiple-output (MIMO), antena terarah, dan



pengkodean nonbiner telah diusulkan baru-baru ini. Jaringan akustik bawah air berbasis radio yang ditentukan perangkat lunak (SDR) telah dilaporkan dalam.

Alternatif ketiga untuk pertukaran data bawah air adalah komunikasi optik yang berpotensi memungkinkan laju data melebihi 1 Gbit/dtk karena lebar pita yang tersedia tinggi. Namun, sinyal optik cepat diserap dalam air dan partikel serta plankton yang tersuspensi menyebabkan hamburan optik yang parah. Selain itu, tingkat cahaya sekitar yang tinggi merupakan efek negatif lain untuk komunikasi optik. Hasil eksperimen yang menunjukkan 1 Gbit/dtk dalam media akuatik simulasi air laut jernih telah dilaporkan dalam di mana komunikasi bawah air dengan lebar pita 5 GHz diwujudkan pada jarak 64 m. Penurunan frekuensi sebesar 1 GHz untuk komunikasi 8 m di perairan pelabuhan yang keruh juga telah diteliti. Dengan demikian, teknologi ini dapat digunakan untuk membangun sistem komunikasi multi-hop.

Baru-baru ini, induksi magnetik (MI) telah diusulkan sebagai alternatif lebih lanjut untuk komunikasi bawah air. Komunikasi MI memanfaatkan medan magnet yang bervariasi terhadap waktu untuk menyampaikan informasi antar entitas komunikasi. Untuk komunikasi bawah air, komunikasi MI menunjukkan beberapa fitur unik seperti penundaan propagasi yang dapat diabaikan, perilaku kanal yang dapat diprediksi dan konstan, serta jangkauan komunikasi yang cukup panjang dengan bandwidth tinggi.

Tabel 7.1 Sifat-sifat teknologi komunikasi bawah air

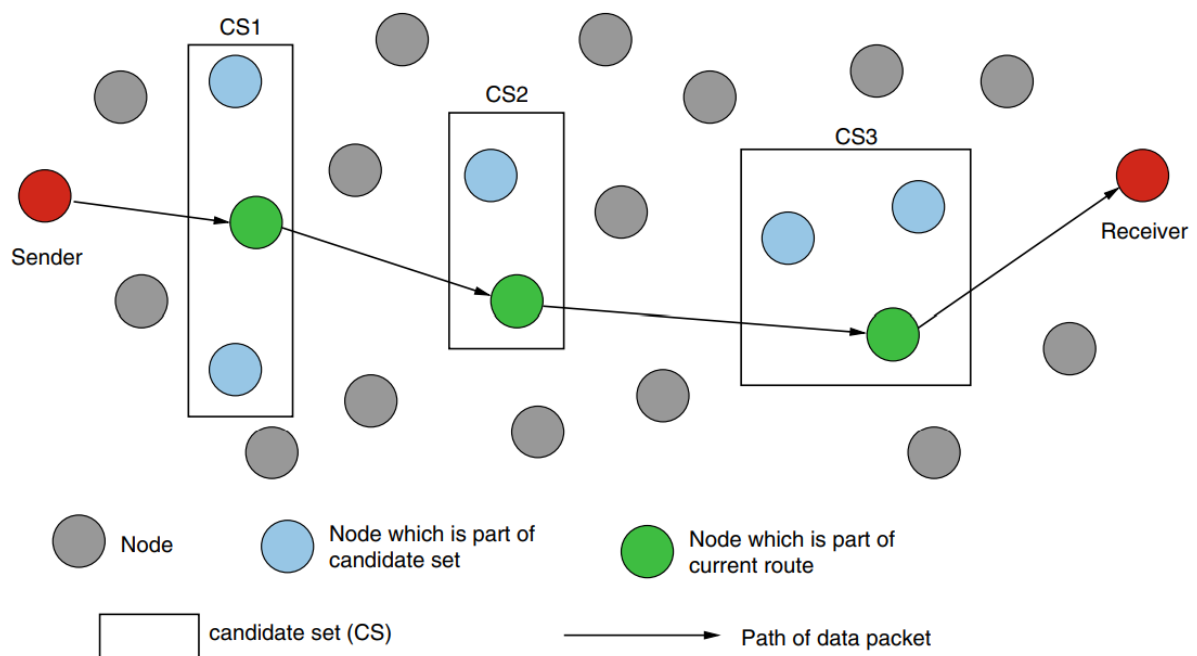
Parameter	Akustik	Elektromagnetik	Optik	Induksi Magnetik
Kecepatan propagasi	~1500 m/s	~33.333 km/s	~33.333 km/s	~33.333 km/s
Kehilangan daya	>0.1 dB/m/Hz	~28 dB/1 km/100MHz	$\propto$ kekeruhan	
Lebar pita (bandwidth)	~kHz	~MHz	10–150 MHz	~MHz
Laju data	~kbit/s	Mbit/s	~Gbit/s	Mbit/s
Ukuran antena	~0.1 m	~0.5 m	~0.1 m	~0.5–2 m
Jangkauan efektif	~km	10 m	~10–100 m	~10–100 m
Keunggulan utama	Penyerapan rendah di bawah air	Kecepatan tinggi dan lebar pita besar	Laju data sangat tinggi	Kecepatan/ bandwidth tinggi dengan saluran yang dapat diprediksi/konstan
Kelemahan utama	Kecepatan rendah, lebar pita terbatas	Redaman tinggi	Penyerapan cepat, hamburan optik, cahaya sekitar	



Tinjauan umum tentang sifat-sifat utama gelombang akustik, elektromagnetik, dan optik serta induksi magnetik diberikan pada Tabel 7.1 Tentu saja, masing-masing skema transmisi memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri untuk komunikasi bawah air, dan pemanfaatannya dalam jaringan komunikasi kompleks perlu memanfaatkan kelebihan dan kekurangan tersebut sekaligus membatasi dampak kekurangannya. Pada bagian selanjutnya, protokol perutean yang sesuai untuk jaringan komunikasi bawah air akan dibahas. Pada bagian selanjutnya, komunikasi semantik (SC) disajikan untuk mengurangi laju data pada kanal fisik dengan memanfaatkan pengetahuan umum dan mengenali makna pesan.

7.3 JARINGAN KOMUNIKASI BAWAH AIR

Protokol perutean oportunistik banyak digunakan untuk simpul stasioner dalam jaringan bawah air menurut. Dalam konteks protokol ini, istilah oportunistik berarti bahwa cara membangun rute berbeda dari jaringan lama. Dalam jaringan lama, rute adalah serangkaian hop yang meneruskan paket data dari satu hop individual ke hop berikutnya. Jika satu hop berikutnya gagal, koneksi terputus. Jaringan oportunistik (OppNets) memanfaatkan sifat siaran jaringan nirkabel, yaitu sebuah simpul dapat terhubung ke beberapa tetangga. Ini berarti terdapat lebih dari satu opsi untuk memilih hop berikutnya menuju tujuan. Ketika sebuah rute dinegosiasikan, protokol oportunistik menentukan set kandidat (CS) dengan semua kemungkinan hop berikutnya sehingga jika terjadi kegagalan, hop lain segera tersedia seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1 Prinsip protokol routing bawah air oportunistik seperti yang dijelaskan dalam

Ada dua cara untuk memilih CS: Protokol geografis mengasumsikan posisi horizontal stasiun diketahui, sedangkan perutean berbasis kedalaman menggunakan posisi vertikal



sebagai kriteria pemilihan. Lebih lanjut, pemilihan CS dibedakan berdasarkan apakah CS ditentukan oleh pengirim atau penerima. Publikasi yang disebutkan sebelumnya memberikan contoh untuk protokol geografis. Dalam penerusan berbasis vektor (VBF), jalur potensial antara sumber dan tujuan diketahui. Setiap simpul yang cukup dekat dengan jalur ideal menjadi bagian dari pipa virtual yang meneruskan paket secara transparan dari sumber ke tujuan. CS sudah tetap dan telah ditentukan sebelumnya oleh sumber.

Namun, protokol ini mensyaratkan adanya konektivitas ujung ke ujung yang belum tentu tersedia dalam jaringan yang jarang penduduknya. Salah satu peningkatannya adalah hop-by-hop VBF yang lebih cocok untuk jaringan yang jarang penduduknya karena tidak memerlukan konektivitas ujung ke ujung dan CS ditentukan untuk setiap penerus potensial. Pendekatan GEDAR (Geographic and Opportunistic Routing Protocol with Depth Adjustment for Mobile Underwater Sensor Network) memperluas hop-by-hop VBF dengan mode pemulihan di mana node mengubah kedalaman untuk perubahan topologi guna meningkatkan konektivitas. Survei yang telah disebutkan sebelumnya juga membahas pendekatan jaringan sensor bergerak bawah air (UWSN) lainnya yang merupakan protokol berbasis tekanan yang menggunakan informasi dari sensor kedalaman untuk meneruskan informasi ke permukaan air.

Dalam depth-based routing (DBR), node tetangga yang lebih dekat ke permukaan air daripada node pengirim merupakan kandidat tujuan penerusan paket. Kelemahan pendekatan berbasis kedalaman sederhana adalah adanya maksima lokal, yaitu node yang tidak dapat meneruskan pesan ke node di tingkat yang lebih tinggi karena kurangnya konektivitas, yang disebut node void. Masalah ini diatasi oleh Hydro-Cast yang menggunakan progres paket yang diharapkan sebagai metrik. Void-aware pressure routing (VAPR) memperkenalkan beacon sebagai opsi lain untuk mendeteksi node void. Dalam, pendekatan VAPR diperluas dengan kesadaran energi untuk mempertimbangkan keterbatasan sumber daya baterai node.

Istilah oportunistik dapat didefinisikan dalam arti yang lebih luas sebagaimana ditentukan dalam referensi yang dibahas sebelumnya. Berbeda dengan bab sebelumnya, definisi OppNets dalam lebih umum: jaringan oportunistik dilakukan antara perangkat setiap kali ada konektivitas, meskipun terputus-putus. Tidak ada asumsi tentang rute atau hop yang dinegosiasikan sebelumnya yang diambil.

Meskipun tidak secara eksplisit merujuk pada jaringan bawah air, tidak ada asumsi tentang media komunikasi yang diambil kecuali untuk tautan komunikasi nirkabel yang tidak dapat diandalkan, yang menunjukkan kemampuan penyebaran OppNets umum tersebut dalam jaringan bawah air. Selain itu, dalam kasus umum OppNets, informasi yang akan diteruskan tidak harus berorientasi tujuan. Pesan tanpa tujuan berguna ketika sejumlah besar node harus mendapatkan informasi tertentu, yang dalam kasus jaringan bawah air, misalnya, dapat berupa peringatan tentang kondisi cuaca buruk.

Selain jaringan bawah air, jenis jaringan lain yang dirancang untuk lingkungan yang keras adalah jaringan sensor bawah tanah nirkabel (WUSN) yang, misalnya, digunakan untuk pemantauan tanah. Tanah memiliki permitivitas dielektrik yang lebih tinggi daripada lingkungan ruang bebas sehingga kehilangan lintasan (path loss) secara signifikan lebih tinggi.



Kelembapan, misalnya, akibat curah hujan, semakin mengurangi jangkauan sinyal. Penulis yang sama juga telah mengembangkan dan mendemonstrasikan perangkat keras untuk node tahan bawah tanah yang akan diterapkan di WUSN. Penerapan WUSN lainnya di lingkungan yang keras dengan kondisi propagasi sinyal yang sulit telah didemonstrasikan di tambang batu bara. Penerapan node sensor di bawah tanah dapat menjadi dasar untuk investigasi di lingkungan bawah air di mana komunikasi juga harus mengatasi kehilangan yang tinggi di media nirkabel.

Pendekatan OppNet yang disajikan dalam literatur untuk lingkungan bawah air tidak sepenuhnya memanfaatkan potensi penuh OppNet. Dengan mengabaikan persyaratan konektivitas permanen, yang masih tersirat dalam OppNet bawah air saat ini, komunikasi dapat diatur dengan cara yang lebih fleksibel dan andal. Sensor bawah air dapat, misalnya, mengumpulkan data secara independen, menyimpan data secara lokal, dan memindahkannya setelah berada kembali dalam jangkauan stasiun tetangga.

Dalam konteks ini, pola mobilitas juga dapat menarik untuk memprediksi kapan dan bagaimana dua node akan bertemu sehingga data dapat diteruskan. Meskipun model dalam referensi ini ditujukan untuk pola mobilitas manusia, dapat dipertimbangkan bagaimana node nirkabel bawah air bergerak saat menjalankan misi sehingga model dapat diadaptasi. Lebih lanjut, node dapat menegosiasikan posisi mereka untuk masuk ke dalam jangkauan komunikasi bersama guna mengoptimalkan konektivitas. Bantuan node jaringan untuk komunikasi tersebut berguna untuk membuat koneksi lebih sering dan dengan demikian meneruskan data lebih cepat yang pada gilirannya mengurangi kebutuhan ruang buffer dan penundaan ujung ke ujung untuk data yang kritis waktu.

Aspek lain adalah bahwa sejauh pengetahuan penulis, protokol perutean bawah air mengasumsikan satu jenis teknologi pembawa tunggal untuk jaringan, misalnya, jaringan akustik. Node bawah air di masa mendatang dapat menyediakan beberapa antarmuka dengan teknologi yang berbeda. Properti spesifik antarmuka tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.1, dapat dimanfaatkan oleh protokol perutean cerdas untuk meneruskan data dengan persyaratan ukuran dan keandalan yang berbeda. Misalnya, informasi kontrol yang ukurannya relatif kecil tetapi seringkali kritis terhadap waktu, dapat diangkut menggunakan koneksi MI yang memiliki kanal yang dapat diprediksi atau jaringan akustik dengan jangkauan yang luas sehingga konektivitas juga dapat dipertahankan dalam jaringan yang jarang penduduknya. Di sisi lain, sejumlah besar data pengawasan yang dikumpulkan oleh sensor dapat diteruskan melalui komunikasi optik yang memiliki konektivitas bervariasi tetapi memberikan kecepatan tinggi.

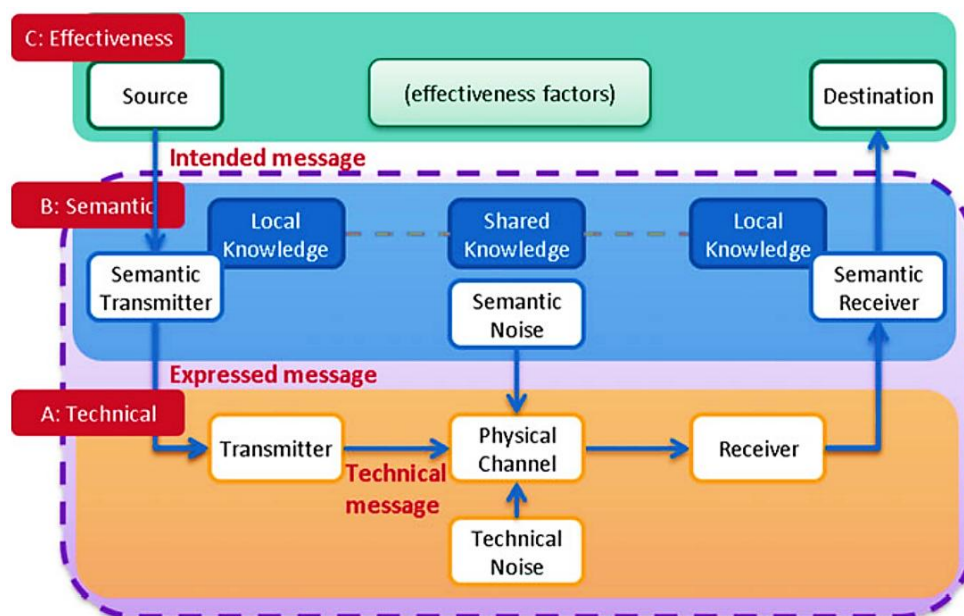
7.4 KOMUNIKASI SEMANTIK

Pada bagian "Teknologi Komunikasi Bawah Air", karakteristik teknologi komunikasi bawah air telah dibahas, dan khususnya laju data yang relatif rendah telah diidentifikasi sebagai tantangan utama. Pada bagian ini, kami berfokus pada perubahan paradigma yang baru-baru ini dikembangkan kembali dalam merancang komunikasi untuk mengatasi hubungan fisik dengan laju terbatas.



Perancangan sistem komunikasi saat ini dan masa depan hanya berfokus pada masalah teknis transmisi serangkaian simbol dan reproduksi pesan ini pada penerima secara tepat atau mendekati. Pendekatan perancangan ini kembali ke teori informasi klasik (CIT) C. E. Shannon dan definisi informasi berbasis entropinya. Namun, pendekatan ini mengabaikan masalah semantik, yaitu seberapa tepat simbol data yang akan ditransmisikan harus menyampaikan makna atau makna yang diinginkan agar aplikasi dapat digunakan. Akibatnya, teknologi komunikasi saat ini hanya berbeda dalam hal pemenuhan nilai metrik rekayasa yang dipersyaratkan (misalnya, tingkat kesalahan, laju data), tetapi tidak mempertimbangkan pentingnya pesan yang akan ditransmisikan bagi aplikasi induk.

Aspek semantik telah menjadi subjek kegiatan penelitian selama beberapa tahun, dengan fokus pada ilmu komputer (misalnya, kecerdasan buatan, data besar), dan oleh karena itu lebih banyak dibahas pada tingkat aplikasi. Di sisi lain, pada tingkat transmisi data, makna simbol data yang akan ditransmisikan belum diperhitungkan. Perluasan model komunikasi klasik dari karakterisasi murni suatu rangkaian simbol menuju komunikasi semantik (SC) dan dengan demikian karakterisasi makna di balik simbol-simbol ini tidak diragukan lagi merupakan langkah inovatif dalam perancangan sistem komunikasi masa depan.



Gambar 7.2 Model komunikasi tiga tingkat

Untuk mengklasifikasikan istilah komunikasi semantik, Gambar 7.2 menunjukkan tiga tingkat komunikasi berbeda yang telah diidentifikasi oleh Weaver pada tahun 1949.

- **Tingkat A:** Masalah teknis menggambarkan komunikasi sintaksis dengan masalah transmisi rangkaian simbol data (pesan teknis) seakurat atau seandal mungkin melalui saluran fisik.
- **Tingkat B:** Masalah semantik berkenaan dengan pertanyaan utama tentang bagaimana simbol data akan ditransmisikan, sehingga makna pesan (pesan yang diungkapkan) disampaikan melalui transmisi setepat mungkin dari pengirim ke penerima.



- **Tingkat C:** Masalah efektivitas akhirnya membahas isu efektivitas, yaitu seberapa kuat pengetahuan yang diperoleh dari penerimaan informasi semantik memengaruhi perilaku aplikasi sesuai keinginan.

Dengan demikian, CIT hanya berfokus pada Tingkat A, yaitu mereproduksi pesan yang dipilih oleh pengirim di penerima secara tepat atau mendekatinya. Kapasitas kanal menentukan laju informasi maksimum yang dapat ditransmisikan secara andal melalui kanal komunikasi. Sebaliknya, tujuan komunikasi semantik adalah mereproduksi interpretasi makna oleh penerima secara tepat atau mendekatinya, dibandingkan dengan pesan yang dimaksudkan oleh pengirim.

Dengan memanfaatkan informasi sisi semantik oleh pengirim dan penerima, komunikasi semantik berkecepatan tinggi dapat dicapai menggunakan kanal rekayasa (teknis) berkecepatan rendah. Dengan demikian, informasi (sisi) semantik dapat secara signifikan meningkatkan konektivitas (laju data, keandalan), memperbaiki latensi, dan meningkatkan efisiensi sumber daya. Pendekatan pertama untuk komunikasi semantik mempertimbangkan makna (Tingkat B) pada level teknis (Tingkat A) dengan memperkenalkan model stokastik (derau semantik) yang mengakibatkan teori informasi klasik (CIT) digantikan oleh teori informasi semantik (SIT).

Pengembangan sistem komunikasi semantik memerlukan desain teoretis informasi dari keseluruhan rantai pemrosesan informasi agar sesuai dengan semantik bidang aplikasi spesifik. Untuk tujuan ini, pendekatan desain berbasis pembelajaran mesin (ML) yang saat ini digunakan untuk mengoptimalkan berbagai blok pemrosesan informasi menggunakan pengukuran dari teori informasi perlu diadaptasi. Namun, semantik pesan perintah belum dipertimbangkan dalam sistem komunikasi sejauh ini, sehingga menghadirkan tantangan penelitian yang besar. Selain pertanyaan mendasar tentang teori informasi semantik, langkah ini memerlukan penelitian dasar di berbagai bidang studi, seperti pengodean semantik, pemrosesan/kompresi sinyal semantik, dan protokol semantik.

Mengintegrasikan komunikasi semantik ke dalam protokol perutean yang dibahas di bagian "Jaringan Komunikasi Bawah Air" memungkinkan transfer informasi yang lebih efisien dibandingkan dengan jaringan komunikasi bitwise-precise. Mempertimbangkan konteks informasi di sisi pengirim dan penerima membantu mengurangi, misalnya, upaya pensinyalan untuk pengaturan koneksi, penutupan, atau pemulihan kesalahan. Informasi latar belakang ini dapat diperoleh dari lingkungan atau dapat disediakan oleh protokol komunikasi, misalnya, prioritas informasi. Peningkatan yang disebutkan di atas untuk komunikasi semantik dan jaringan oportunistik mengharuskan sistem mampu mengingat dan mengklasifikasikan informasi baru. Ini berarti bahwa ML harus diperkenalkan ke dalam komunikasi yang dapat membantu, misalnya, untuk mengidentifikasi di lokasi dan waktu mana saluran memiliki properti tertentu atau jenis informasi tertentu yang perlu ditransfer.

Kesimpulan

Dalam bab ini, dibahas perkembangan terkini dan tantangan jaringan komunikasi bawah air. Jaringan bawah air yang lama belum siap menghadapi persyaratan bawah air yang ketat karena bergantung pada rute dengan simpul statis, konektivitas permanen, dan tautan



komunikasi fisik yang mengasumsikan transmisi data yang presisi per bit. Aplikasi komunikasi bawah air di masa mendatang seperti simpul robotik otonom cerdas menerima instruksi saat bekerja di lokasi, mengumpulkan data sensor, atau berkoordinasi dalam tim. Tugas-tugas ini akan membutuhkan jumlah data yang lebih besar untuk ditransmisikan secara tepat waktu dan andal. Komunikasi semantik dan jaringan oportunistik yang ditingkatkan memanfaatkan pengetahuan dari lingkungan dan misi sebelumnya. Lebih lanjut, jaringan ini memanfaatkan mobilitas simpul dan karenanya dapat beradaptasi lebih baik terhadap perubahan kondisi untuk transportasi data yang fleksibel dan efisien.



BAB 8

MANIPULATOR MODULAR OTONOM BAWAH AIR

Inti dari intervensi bawah air aktif adalah kemampuan manipulasi. Manipulasi bawah air yang presisi, cekatan, dan otonom membutuhkan ekstremitas dan efektor ujung yang sangat tangguh sehingga mampu menahan kondisi lingkungan dan mampu memberikan gaya yang cukup untuk melakukan pekerjaan yang biasanya berat. Pada saat yang sama, sistem juga harus cukup sensitif untuk memungkinkan kontrol yang presisi dan adaptif. Selain itu, baik konsep mekatronik maupun strategi kontrol manipulator harus kompatibel dan terintegrasi dengan baik dengan platform pembawanya. Kontribusi ini menunjukkan permintaan akan sistem tersebut, memberikan gambaran umum tentang keadaan terkini, dan menyoroti kebutuhan pengembangan serta tantangan terkait. Konsep awal untuk aktuator skalabel berkinerja tinggi serta strategi pemodelan dan kontrol untuk manipulator yang terdiri dari elemen-elemen ini diperkenalkan.

8.1 PENDAHULUAN

Robotika bawah air memainkan peran kunci dalam pengembangan lebih lanjut sistem bawah air yang otonom dan cerdas. Intervensi bawah air aktif berdasarkan manipulasi yang sensitif dan otonom merupakan kemampuan inti yang sesungguhnya untuk memungkinkan berbagai operasi bawah air yang bermanfaat. Bersama dengan kendali jarak jauh yang intuitif atau otonomi yang terpantau, robotika bawah air membuka perspektif baru untuk misi pemasangan, pemantauan, pemeliharaan, dan pembongkaran.

Sejauh ini, manipulator yang terpasang pada Kendaraan yang Dioperasikan dari Jarak Jauh (ROV) biasanya berupa sistem monolitik, yang dioperasikan secara manual dari jarak jauh dengan umpan balik sensor yang sangat minim, meskipun sistem tersebut sebagian besar ditenagai secara hidrolik sehingga memberikan banyak kekuatan. Hanya sedikit Kendaraan Bawah Air Otonom (AUV) yang dilengkapi dengan manipulator karena hampir tidak ada manipulator dan strategi kontrol yang sesuai yang memenuhi persyaratan untuk melakukan penemuan bawah air otonom dengan platform bergerak yang mengapung bebas dan mandiri.

Akibatnya, sebagian besar tugas intervensi saat ini dilakukan oleh ROV atau oleh penyelam manusia jika akurasi dan ketangkasan diperlukan. Hal ini, pada gilirannya, membatasi cakupan aktivitas yang memungkinkan, serta waktu operasi dan area aplikasi, dan dengan demikian menciptakan upaya logistik, biaya finansial, dan potensi risiko kecelakaan yang lebih tinggi untuk operasi intervensi bawah air seperti halnya penggunaan AUV. Tantangan untuk memungkinkan intervensi bawah air otonom adalah menyediakan sistem yang kompatibel dengan platform pembawa dan dirancang khusus untuk tugas yang dimaksud atau penerapan universal. Manipulator dan subsistemnya (aktuator, end-effector) harus cukup sensitif dan akurat untuk melakukan tugas secara otonom dengan cara yang aman dan andal. Kendaraan pembawa harus mengkompensasi efek dinamis dari manipulasi (misalnya pendorong harus mengkompensasi gaya akibat gerakan manipulator). Lebih lanjut, pengendali



kendaraan dan manipulator harus cukup dinamis untuk mengkompensasi gangguan seperti aliran dan perubahan distribusi massa.

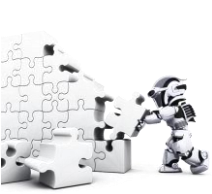
Salah satu pendekatan untuk memenuhi persyaratan ini adalah pengembangan manipulator modular berdasarkan modul aktuator terintegrasi yang dapat diskalakan termasuk sensor dan elektronik kontrol, yang dapat dikonfigurasi secara fleksibel sesuai dengan aplikasi. Konsep penggerak yang disukai akan bersifat elektrik agar kompatibel dengan sumber energi yang disediakan oleh sebagian besar AUV. Mengendalikan manipulator yang digabungkan ke pangkalan mengambang di air memerlukan model yang mampu secara real-time untuk dapat menghasilkan gerakan yang disinkronkan untuk mengurangi pengaruh dinamis bersama.

Model-model tersebut juga diperlukan untuk menentukan dan mengendalikan gaya dan momen yang diterapkan pada efektor ujung. Karena dinamika fluida rumit untuk dihitung, satu pendekatan adalah mengembangkan model abstrak monolitik untuk sistem lengkap berdasarkan data yang dihasilkan dalam eksperimen referensi. Untuk konsep manipulator modular yang diusulkan, model juga harus modular pada tingkat komponen agar dapat mengoptimalkan konfigurasi fleksibel berdasarkan hasil simulasi dan untuk menghasilkan pengontrol secara otomatis untuk morfologi yang berbeda dengan cara yang umum.

8.2 KEADAAN TERKINI

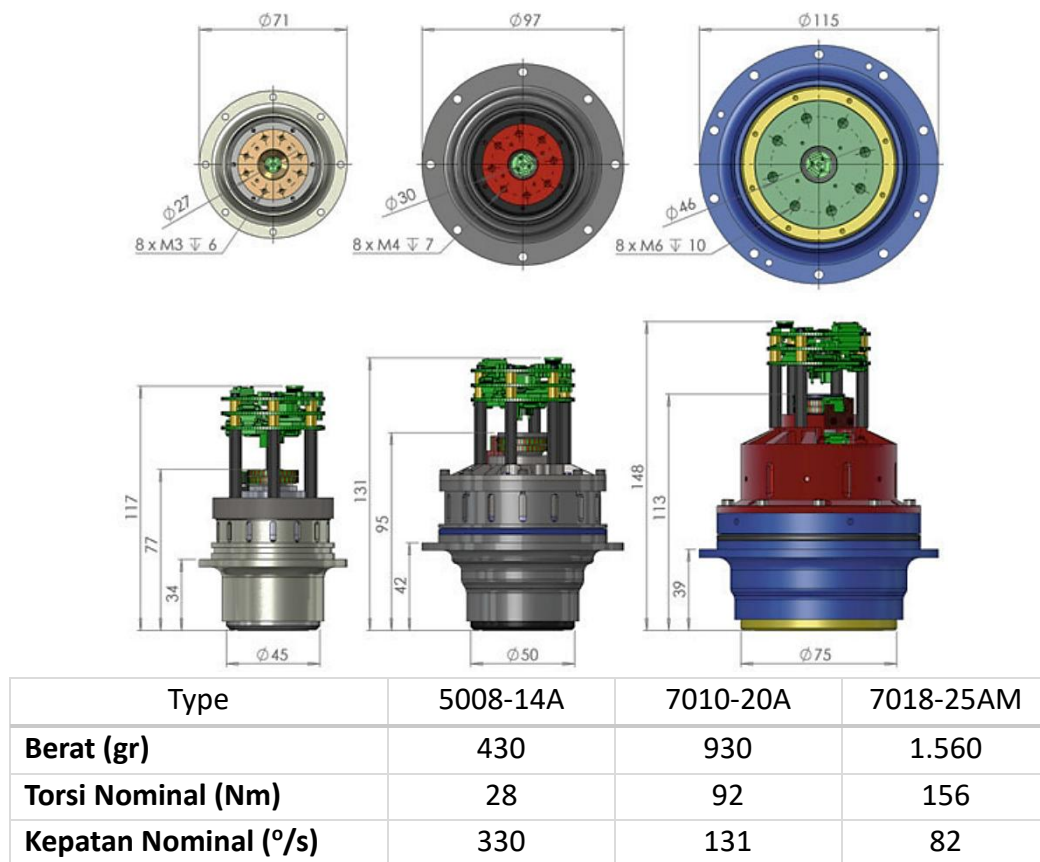
Tinjauan komprehensif manipulator bawah air yang ada diberikan dalam sistem yang dijelaskan dapat dibagi menjadi sistem hidrolik dan elektrik, sementara sebagian besar sistem yang tersedia dan digunakan secara komersial bersifat hidrolik. Keunggulannya dibandingkan manipulator elektrik adalah terdiri dari beberapa komponen (misalnya, tanpa roda gigi) yang membuatnya kurang intensif perawatan dan rentan terhadap kesalahan. Sistem hidrolik memberikan rasio daya terhadap berat yang sangat tinggi dan secara inheren bertekanan. Di sisi lain, kebocoran sejumlah kecil cairan hidrolik sering terjadi dan banyak peralatan pelengkap seperti pompa hidrolik, reservoir, filter, regulator, katup, dll. diperlukan untuk penggunaannya. Sistem kelistrikan lebih jarang digunakan dalam aplikasi komersial dan lebih banyak digunakan dalam sistem ilmiah sebagai prototipe yang dibuat khusus untuk tujuan penelitian.

Hal ini disebabkan oleh kemampuannya untuk gerakan yang presisi dan kontrol gaya/torsi. Tenaga listrik, yang biasanya sudah tersedia pada robot bawah air, merupakan satu-satunya persyaratan tambahan untuk penggunaannya. Kekurangannya adalah seringkali tidak memenuhi persyaratan kecepatan, keandalan, dan kekuatan atau daya untuk sebagian besar tugas intervensi industri. Namun, kekurangan ini dapat diminimalkan dengan pendekatan modularisasi yang diusulkan, yang memungkinkan penggabungan modul-modul dengan kelas kinerja berbeda untuk mengonfigurasi manipulator yang memenuhi persyaratan khusus untuk tugas tertentu. Modul-modul selanjutnya dapat dikembangkan dan ditambahkan ke kit konstruksi jika diperlukan.



8.3 DESAIN SISTEM MODULAR

Untuk mencapai rekonfigurasi, penggunaan ulang, dan fleksibilitas manipulator serta komponen-komponen dasarnya, kami mengusulkan pendekatan modularisasi untuk desain sistem manipulator. DFKI telah menerapkan pendekatan tersebut dalam berbagai proyek di bidang robotika luar angkasa. Keunggulannya terletak pada kenyataan bahwa komponen dengan tingkat kematangan teknologi yang tinggi dapat tersedia pada tingkat modul dan sistem manipulator yang sesuai dapat disusun sesuai dengan persyaratan misi. Keunggulan lebih lanjut dari modularisasi adalah biaya produksi modul yang lebih rendah karena jumlah unit yang banyak, ketersediaan melalui penyimpanan stok, dan kemungkinan penggantian cepat dengan modul suku cadang.



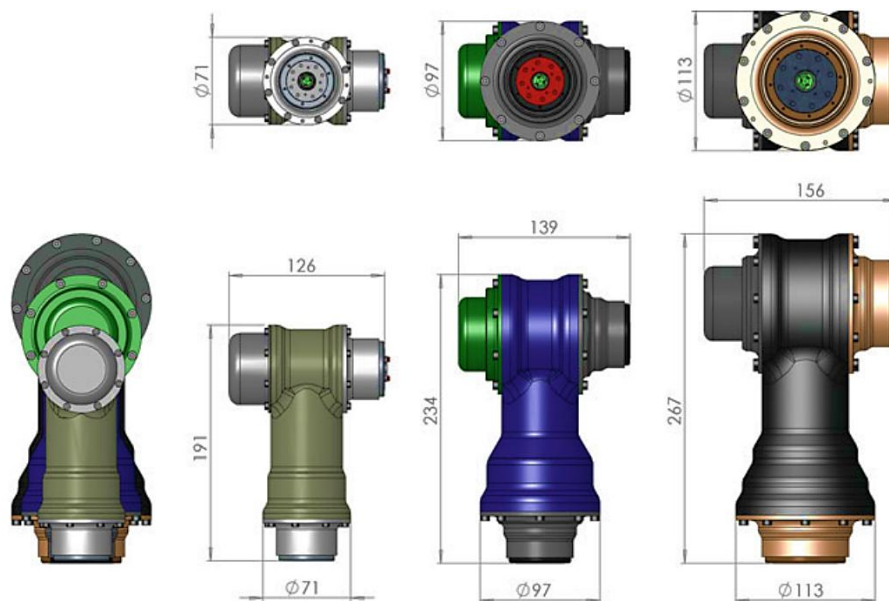
Gambar 8.1 Modul Aktuator

Berdasarkan perkembangan dan pengalaman yang diperoleh dalam proyek-proyek terkait ruang angkasa, konsep desain sistem modular untuk modul aktuator bawah air bertenaga listrik dikembangkan. Modul terintegrasi yang ringkas (lihat Gambar 8.1) terdiri dari motor arus searah brushless rotor dalam (BLDC) yang terhubung ke roda gigi penggerak harmonik, yang dipasang dalam struktur aluminium yang dirancang khusus dengan bantalan yang sesuai. Poros berongga memungkinkan perutean kabel loom aksial melalui aktuator. Tumpukan elektronik yang dipasang pada unit menyediakan driver motor serta sirkuit dan logika untuk kontrol, akuisisi data, dan komunikasi yang diimplementasikan dalam Field Programmable Gate Array (FPGA). Modul-modul ini menyediakan aksesibilitas yang baik untuk



integrasi serta kalibrasi dan mudah dirawat. Tiga modul aktuator dengan ukuran dan kelas kinerja yang berbeda dikembangkan. Modul-modul yang dijelaskan tidak kedap air maupun tahan tekanan sendiri.

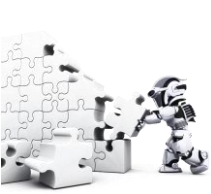
Untuk mencapai penyegelan dan kompensasi tekanan internal, modul aktuator dipasang dalam rumah tambahan yang terbuat dari aluminium anodisasi keras atau, jika diperlukan, titanium. Penutup ini menyediakan satu kopling putar tersegel per derajat kebebasan dan flensa untuk menghubungkan sisi masukan dan keluaran modul secara mekanis ke struktur manipulator. Flensa juga menyediakan sambungan untuk selang hidrolik tempat fluida hidrolik disuplai untuk menghasilkan tekanan internal.



Jenis	PTU5008-14A	PTU7010-20A	PTU7018-25A
Massa (kg)	1,3	2,5	3,9
Massa dengan minyak (kg)	1,7	3	4,6
Massa dengan minyak dalam air (kg)	0,8	1,7	2,7
Torsi nominal (Nm)	28	92	156
dengan kecepatan nominal (°/s)	330	131	82

Gambar 8.2 Unit Pan-Tilt

Kabel loom untuk catu daya dan komunikasi dengan elektronik motor juga dirutekan di dalam selang. Karena dalam konfigurasi manipulator, dua atau tiga sambungan sering disusun berdekatan dan diputar 90° satu sama lain agar sumbu rotasi berpotongan, maka menguntungkan untuk merancang rumah ini agar dapat mengakomodasi beberapa sambungan. Hal ini menghemat berat dan membutuhkan lebih sedikit sambungan dan kopling selang, sehingga mengurangi kebocoran oli hidrolik dan kerumitan dalam hal penyegelan. Tiga rumah dengan ukuran berbeda telah dikembangkan, masing-masing menampung dua modul



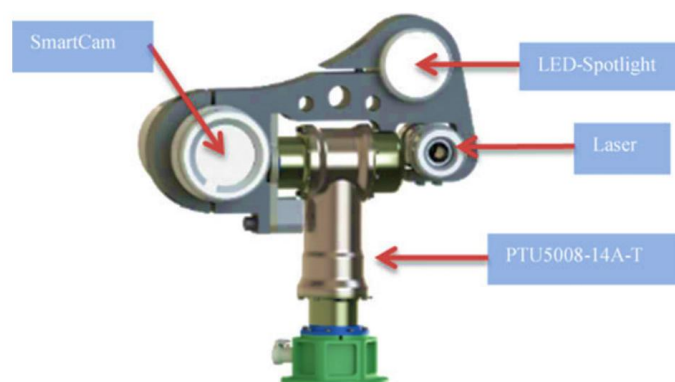
aktuator identik (lihat Gambar 8.2). Unit Pan-Tilt (PTU) ini dirancang sedemikian rupa sehingga dapat digunakan dengan kompensasi tekanan hidrolik hingga kedalaman 6000 m, yaitu tekanan eksternal 600 bar.



Gambar. 8.3 Manipulator DOF yang terdiri dari tiga PTU

Gambar 8.3 menunjukkan manipulator 6 DOF yang dibangun dari tiga modul PTU yang berbeda. Perutean pipa untuk membanjiri komponen dengan oli hidrolik sebagai kompensasi tekanan juga ditunjukkan, begitu pula penampang melintang melalui elemen PTU terakhir sebelum efektor ujung.

Sebuah PTU5008-14A-T (T untuk rumah titanium) telah berhasil diuji selama satu tahun di kedalaman 800 m. PTU tersebut dipasang pada crawler bawah air Wally dan digunakan untuk menggerakkan kepala kamera (lihat Gambar 8.4).



Gambar 8.4 PTU dengan kepala kamera yang dipasang pada Wally, Benthic Crawler, dan diuji di Barkley Canyon

8.4 PEMODELAN DAN KONTROL

Proses perancangan untuk manipulator bawah air modular merupakan tugas yang menantang dari sudut pandang pemodelan matematika dan optimasi sistem. Untuk



melakukan proses perancangan yang efisien, diperlukan model matematika yang akurat dari semua komponen sistem dan sistem simulasi non-linier yang canggih untuk mempertimbangkan semua kondisi lingkungan yang relevan untuk intervensi bawah air aktif. Secara umum, proses perancangan sistem yang kompleks tersebut menggunakan proses perancangan serial, di mana perancangan, simulasi, dan optimasi sistem dilakukan secara berurutan. Proses desain yang modern dan lebih efisien diwakili oleh konsep optimasi desain multidisiplin (MDO).

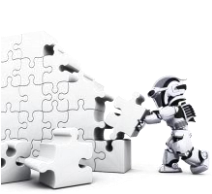
MDO memungkinkan perancang sistem untuk menggabungkan semua disiplin ilmu yang relevan, seperti optimasi sifat aliran, desain kontrol yang tepat dan adaptif, dan desain konsep mekatronik, secara bersamaan. Konsep ini mendapat perhatian tinggi dalam aplikasi kedirgantaraan. MDO membutuhkan tiga area tematik matematika utama: pemodelan sistem, identifikasi parameter, dan optimasi sistem. Karena fenomena fisik yang kompleks dan pengaruh timbal balik di bawah air, sistem simulasi realistis berdasarkan deskripsi sistem non-linier diperlukan.

Secara umum, model-model ini menggunakan penyederhanaan untuk mengurangi kompleksitas sementara parameter model digunakan untuk mengadaptasi model dengan pengukuran yang diamati. Tugas utamanya adalah menentukan parameter model nonlinier sehingga model tersebut cocok dengan pengukuran yang diamati (identifikasi parameter). Identifikasi parameter yang otomatis dan efisien memerlukan metode optimasi nonlinier matematika. Bila ada deskripsi yang baik mengenai semua pengaruh fisik, seseorang dapat menggunakan algoritma kontrol matematika untuk mengarahkan aktuator bawah air yang dapat diskalakan dengan cara yang optimal (misalnya energi optimal). Masalah pengendalian optimal dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \min_{x,u} F(x,u,p) &:= g(x(t_f), t_f) + \int_0^{t_f} f_o(x(t), u(t), t, p) dt \\ \text{unter } \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), t, p) & (OCP) \\ C(x(t), u(t), t, p) &\leq 0 \\ \psi(x(0), x(t_f), p) &= 0. \end{aligned}$$

di mana $x \in R^{n_x}$ menyatakan keadaan sistem pada waktu $t \in [0, t_f]$, $u \in R^{n_u}$ variabel kontrol yang mempengaruhi dinamika $f: R^{n_x} \times R^{n_u} \times R \times R^n \rightarrow R^{n_x}$ dan $p \in R^{n_p}$ beberapa gangguan eksternal. Variabel kontrol harus memenuhi beberapa kendala $\psi: R^{n_x} \times R^{n_u} \times R \times R^{n_p} \rightarrow R^{n_c}$ serta kondisi awal dan akhir $\psi: R^{n_x} \times R^{n_x} \times R^{n_p} \rightarrow R^{n_\psi}$ sambil meminimalkan fungsi objektif F .

Masalah kontrol optimal dapat dipahami sebagai masalah optimasi berdimensi tak hingga, karena keadaan dan kontrol harus optimal untuk setiap titik waktu. Saat menggunakan metode langsung, ada dua pendekatan utama untuk mengubah masalah optimasi berdimensi tak hingga ini menjadi masalah berdimensi hingga, yang menghasilkan masalah kecil dan padat atau masalah besar dan jarang. Khususnya untuk aplikasi yang sangat non-linier, pendekatan



kedua lebih menjanjikan karena ketahanan numeriknya akibat non-linieritas dalam evaluasi dan simulasi model.

Optimasi non-linier merupakan fitur kunci untuk banyak aplikasi di industri dan sains. Pertanyaan umum dalam konteks ini adalah bagaimana variabel bebas suatu model harus dipilih untuk meminimalkan fungsi objektif yang telah ditentukan dengan tetap mempertahankan batasan-batasan tertentu. Permasalahan optimasi non-linier didefinisikan sebagai berikut: misalkan $z \in R^n$ adalah vektor optimasi (misalnya, parameter desain aktuator atau kontrol terdiskritisasi dan status OCP). Lebih lanjut, misalkan $F : R^n \rightarrow R$ menyatakan fungsi objektif dan $g : R^n \rightarrow R^{l_i}$, $h : R^n \rightarrow R^{l_e}$ menyatakan fungsi kendala non-linier umum.

Maka :

$$\begin{aligned} \min & F(z) \\ \text{s.t. } & g_i(z) \leq 0, i = 1, \dots, l_i \\ & h_j(z) = 0, j = 1, \dots, l_e \end{aligned}$$

disebut program non-linier (NLP). Secara umum, terdapat beberapa algoritma berbeda untuk menyelesaikan masalah tersebut. Semuanya merupakan semacam spesialisasi dari metode Newton. Pemecah WORHP ("We Optimize Really Huge Problems") dikembangkan secara khusus untuk masalah optimasi non-linier skala besar dan jarang, dan merupakan pemecah NLP pilihan Badan Antariksa Eropa (ESA). WORHP menggunakan metode pemrograman kuadrat sekuensial jarang (SQP) dengan metode titik interior untuk submasalah kuadrat atau metode titik interior pada tingkat non-linier. Perancangan perangkat lunak difokuskan pada ketahanan tinggi dan perancangan berbasis aplikasi. Formulasi NLP dan paket perangkat lunak WORHP dapat digunakan untuk menangani tantangan utama dalam proses MDO.

Kesimpulan

Intervensi bawah air otonom membutuhkan kemampuan manipulasi yang sensitif dan presisi. Namun, mayoritas manipulator yang ada adalah sistem hidrolik, yang oleh karena itu dapat membawa beban tinggi, tetapi kurang memiliki keterampilan manipulasi yang serbaguna. Lebih lanjut, sistem hidrolik membutuhkan banyak peralatan pelengkap, sehingga tidak cocok untuk sistem swasembada (AUV). Sebaliknya, manipulator elektrik berukuran kecil dan ringan atau sistem hibrida (elektrik/hidrolik) yang mampu menangani beban berat di bawah air dengan presisi, kapasitas persepsi, dan ketangkasan yang tinggi akan memungkinkan berbagai operasi bermanfaat yang tidak dapat dilakukan dengan teknologi yang tersedia. Selain itu, modularitas akan membuat sistem tersebut dapat dikonfigurasi secara fleksibel untuk memenuhi persyaratan berbagai aplikasi tanpa perlu mendesain ulang sistem secara menyeluruh.

Oleh karena itu, kami bermaksud mengembangkan generasi baru manipulator bawah air modular untuk memungkinkan robot dan manusia, baik untuk memeriksa, memelihara, maupun melayani infrastruktur bawah air, serta untuk mengeksplorasi dan menyelidiki lingkungan laut dalam. Mengenai konfigurasi dan kontrol, teknik optimasi matematis akan



mendukung proses desain yang efisien dari manipulator bawah air tersebut dan membentuk dasar kemampuan manipulasi otonom.

BAB 9

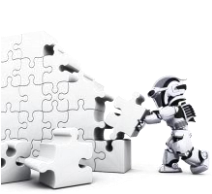
PEMBELAJARAN MESIN UNTUK KONTROL MANIPULASI BAWAH AIR

Manipulasi bawah air otonom saat ini masih menjadi tantangan penelitian yang terbuka. Makalah ini menjelaskan pendekatan untuk mengatasi beberapa tantangan terbuka tersebut. Di satu sisi, penggunaan teknik pembelajaran mesin untuk identifikasi daring dan adaptasi dinamika kendaraan (menangani kompensasi drift, perubahan massa, dll.) serta penggunaan konfigurasi pengontrol berbasis konteks tingkat tinggi untuk beradaptasi dengan perubahan morfologi sistem, perangkat keras, dan/atau tugas. Di sisi lain, kontrol yang tangguh untuk manipulator bawah air berdasarkan perluasan teknik kontrol seluruh tubuh dipertimbangkan, yang memperhitungkan aktuasi heterogen (pendorong pada alas, aktuator pada sambungan lengan) serta dinamika kendaraan bawah air yang tidak pasti. Hasilnya adalah sistem yang sangat dapat dikonfigurasi ulang yang dapat secara otomatis menyesuaikan perilakunya untuk mengatasi perubahan lingkungan, morfologinya sendiri, dan/atau tujuan tugas. Hasilnya direncanakan akan divalidasi dalam dua skenario berbeda: uji coba dinamika berbasis terapung yang berasal dari aplikasi luar angkasa dan robot udara di DLR dan kolam bawah air di DFKI.

9.1 PENDAHULUAN

Manipulator yang dipasang pada wahana bawah air komersial dan riset sebagian besar dioperasikan dari jarak jauh. Tantangan terbuka yang menghambat operasi otonom sebagian besar berasal dari dua sumber: di satu sisi, salah satu masalahnya adalah ketidakpastian dan kompleksitas dalam model (baik model wahana maupun model hidrodinamika). Tantangan ini juga memengaruhi kendali wahana bawah air, tetapi sangat penting bagi kinerja dan kendali manipulator yang dipasang pada wahana bawah air tersebut, terutama karena adanya kopling dinamis gaya antara manipulator dan wahana (misalnya, gerakan manipulator dan gaya kontak 'mengganggu' gerakan wahana dan sebaliknya).

Tantangan kedua berasal dari kurangnya aktuasi wahana (biasanya dilengkapi dengan aktuator yang lebih sedikit daripada derajat kebebasan yang akan dikendalikan). Fakta bahwa wahana bawah air kurang digerakkan menjadi lebih menonjol dan kritis saat manipulator dipasang pada wahana, yang membutuhkan ketangkasan dan presisi yang lebih tinggi. Tantangan ini memiliki dua efek: pertama, ketidakmungkinan untuk menghasilkan lintasan sewenang-wenang untuk mencapai titik yang diinginkan di ruang angkasa membawa kebutuhan untuk lintasan yang lebih kompleks dan teknik kontrol nonlinier dan, kedua, penggunaan pendorong 'lambat' berkinerja buruk dibandingkan dengan aktuator 'lebih cepat' yang digunakan dalam manipulator membutuhkan arsitektur kontrol yang kuat yang mampu



menangani sistem aktuasi heterogen ini. Saat ini, manipulator yang dioperasikan dari jarak jauh adalah peralatan standar untuk sebagian besar ROV, sementara sebaliknya manipulasi otonom masih menjadi tantangan penelitian dan sangat sedikit contoh terbaru yang tersedia (salah satu contohnya adalah karya di). Pada prinsipnya, persamaan gerak manipulator bawah air mirip dengan persamaan manipulator tetap. Namun, ada beberapa perbedaan penting seperti ketidakpastian dalam pengetahuan model (terutama karena pengetahuan yang buruk tentang efek hidrodinamik), kompleksitas model matematika, redundansi kinematik sistem (kendaraan plus lengan), kesulitan dalam mengendalikan kendaraan saat melayang (terutama karena kinerja pendorong yang buruk), dan kopling dinamis antara kendaraan dan manipulator.

Kontrol struktur manipulasi mengambang menjadi fokus penelitian sejak tahun 1980-an, terutama di bidang robotika ruang angkasa, yang menghasilkan hasil penting dalam arsitektur kontrol hierarkis. Berkenaan dengan domain bawah air, pekerjaan awal dilakukan pada tahun 1990-an dalam kontrol manipulator dan masalah koordinasi antara kontrol kendaraan dan lengan untuk teleoperasi. Salah satu upaya pertama yang berhasil dalam manipulasi otonom bawah air dilakukan dalam proyek SAUVIM (Kendaraan Bawah Air Semi Otonom untuk Misi Intervensi, Universitas Hawaii) juga pada akhir tahun 1990-an. Sejak karya pertama, aspek kuncinya adalah eksploitasi redundansi melalui semacam kerangka kerja prioritas tugas dan ini juga merupakan fokus utama dari karya terbaru di. Di sini, kerangka kerja kontrol disajikan untuk mengembangkan Intervention Autonomous Under-water Vehicle (I-AUV) serbaguna yang mencakup lengan manipulator 7-DOF di dalam TRIDENT EU FP7. Secara khusus, karya ini berfokus pada eksploitasi sistem yang sangat redundan untuk mencapai tangkapan objek yang cekatan. Sebuah survei tentang arsitektur kontrol yang dikembangkan untuk robot bawah air hingga akhir 1990-an dapat ditemukan di dalam beberapa tahun terakhir, pendekatan holistik untuk mengendalikan sistem robot secara keseluruhan telah muncul yang dikenal sebagai teknik 'kendali seluruh tubuh', terutama untuk sistem yang kompleks dan sangat redundan yang terdiri dari platform bergerak (baik roda atau kaki) dan sistem manipulasi. Kerangka kerja kendali seluruh tubuh ini menangani beberapa tujuan kendali yang simultan (kendali postur, manipulasi, berjalan, dll.). Karena kendali seluruh tubuh menggunakan umpan balik waktu nyata, robot yang menggunakan pendekatan tersebut lebih adaptif dan dapat bereaksi dengan cepat terhadap sinyal umpan balik sensorik yang tidak terduga, menyelesaikan pada waktu proses untuk penggunaan optimal dari semua derajat kebebasan robot yang tersedia. Asal usul pembangkitan gerakan seluruh tubuh ditemukan pada pembangkitan berjalan pada robot humanoid sambil mencoba memastikan keseimbangan sistem.

Dalam, istilah 'kendali seluruh tubuh' digunakan untuk pertama kalinya untuk merujuk pada kerangka kerja kendali dan prioritas dinamis berorientasi tugas berbasis mengambang yang memungkinkan robot humanoid untuk memenuhi tujuan kendali waktu nyata secara simultan. Prioritas dan koordinasi beberapa pengendali dicapai menggunakan hierarki yang menangani konflik dan memilih pengendali dengan prioritas tertinggi. Segera setelah manipulasi mulai berperan dan, akibatnya, kontak dengan lingkungan diinginkan dan tidak



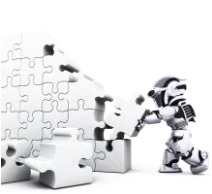
dianggap sebagai gangguan, sistem robotik yang kompleks perlu menangani gaya multi-kontak simultan (kaki dan alas bergerak dengan tanah, manipulator atau manipulator dengan objek yang dimanipulasi), dan dengan tugas menjaga keseimbangan atau postur optimal, antara lain. Hal ini memerlukan strategi kendali daring yang efisien berdasarkan umpan balik waktu nyata yang dapat memanfaatkan redundansi sistem robotik tersebut secara optimal. Hal ini tidak hanya relevan untuk humanoid, tetapi juga dalam aplikasi di mana kita memiliki sistem yang sangat redundan, misalnya sistem robotik lengan ganda yang perlu mengatasi tugas-tugas simultan.

Mengingat sifat sistem yang mengambang bebas seperti yang terdiri dari AUV dan manipulator, tampaknya cocok untuk menggunakan konsep kendali seluruh tubuh untuk domain bawah air, terutama ketika aksi manipulasi (dan dengan demikian, gaya kontak) ikut berperan. Namun, terdapat tantangan yang harus dihadapi dalam domain baru ini, seperti sifat aktuasi yang heterogen, konfigurasi ulang otomatis berdasarkan konteks atau tugas saat ini, dan penanganan efek dinamika yang telah disebutkan sebelumnya. Bagian selanjutnya akan memberikan beberapa detail mengenai metode yang akan digunakan untuk mengatasi tantangan tersebut.

9.2 ML UNTUK ADAPTASI DAN REKONFIGURASI KONTROL SELURUH TUBUH

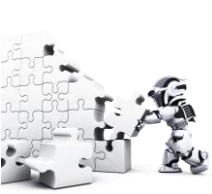
Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, salah satu tantangan utama dalam manipulasi bawah air muncul dari interaksi kompleks dan nonlinier antara tubuh manipulator dan fluida di sekitarnya. Nonlinieritas dalam dinamika muncul secara alami akibat beberapa efek hidrodinamik seperti penambahan massa, efek redaman dan gaya angkat, daya apung akibat Archimedes, serta gangguan eksternal. Estimasi parameter hidrodinamika yang presisi hampir mustahil dilakukan karena variasi parameter lingkungan seperti suhu, densitas air, dan salinitas. Teknik pemodelan klasik hidrodinamika kapal selam semacam itu memiliki ketidakakuratan akibat penyederhanaan persamaan matematika, yaitu dengan mengasumsikan simetri geometris tubuh dan mengabaikan efek nonlinieritas orde tinggi. Dengan cara ini, pembelajaran mesin menarik sebagai teknik yang menjanjikan untuk mempelajari model nonlinier kompleks yang diberikan input dan output mereka, dan oleh karena itu dapat memperhitungkan aspek-aspek yang tidak dimodelkan dari hidrodinamika kendaraan.

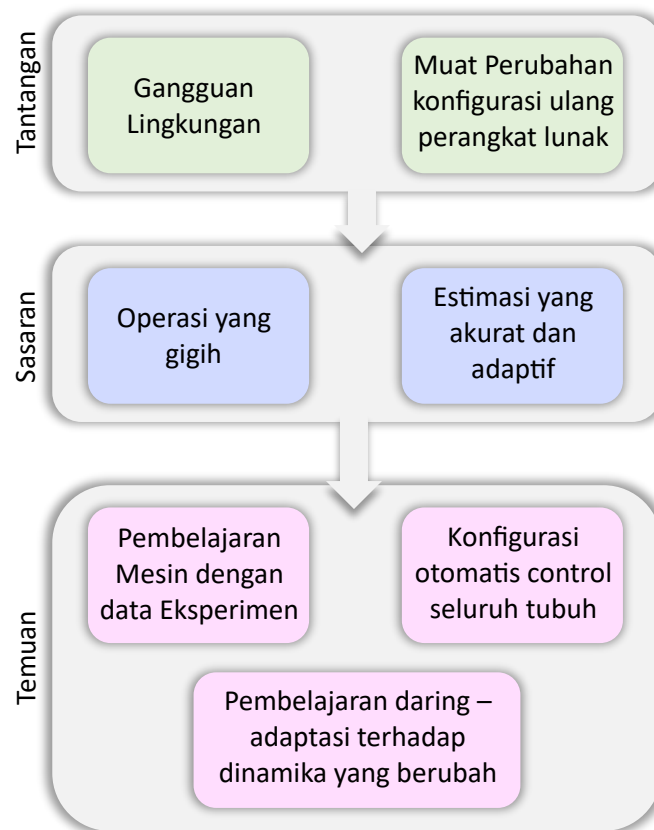
Dalam kasus manipulasi mengambang bebas seperti yang dipasang pada AUV, sangat relevan untuk dapat melakukan tindakan manipulasi presisi tinggi. Proses ini menjadi lebih kompleks ketika manipulator harus menangani objek yang bentuk dan ukurannya berbeda, yang membuat persamaan hidrodinamika yang telah diprogram sebelumnya menjadi usang. Akibatnya, dua tantangan yang ada dapat dilihat, yang pertama adalah mengembangkan model yang memberikan prediksi yang akurat dan dengan ketidakpastian prediksi yang diperkirakan yang dapat digunakan untuk tujuan navigasi. Tantangan kedua dihadapi ketika dinamika robot berubah (misalnya membawa beban yang berbeda atau bagian tubuh robot telah diubah).



Di sinilah pembelajaran daring berperan untuk mengadaptasi model dinamika dengan mempelajari dinamika secara real-time dari aliran data yang diekstraksi dari rangkaian sensor robot. Akibatnya, tugas pertama adalah menangani pengembangan pustaka perangkat lunak menggunakan teknik pembelajaran mesin untuk mengidentifikasi secara eksperimental model gerak dinamis sistem kendaraan-lengan dan mengadaptasi model ini sesuai dengan tugas manipulasi yang berbeda, serta untuk mengintegrasikan model tersebut ke dalam kerangka kerja kontrol seluruh tubuh. Dalam hal ini, DFKI telah menggunakan teknik identifikasi model daring berdasarkan pembelajaran mesin untuk mengidentifikasi model gerak kendaraan bawah air (dalam hal ini, tanpa manipulator).

Demikian pula, ada pengalaman dalam identifikasi eksperimental dinamika robot menggunakan teknik klasik dan pendekatan pembelajaran mesin, atau menggunakan metode berbasis data untuk identifikasi dinamika. Metode-metode tersebut dapat digunakan untuk menambah informasi dari model simulasi dengan data eksperimen. Gambar 9.1 menggambarkan konsep di balik perkembangan ini. Di atas, tantangannya: gangguan lingkungan dan perubahan beban atau konfigurasi ulang perangkat keras yang diinginkan dalam manipulator bawah air serbaguna modular. Tujuan yang diharapkan adalah mencapai operasi persisten, yaitu otonomi jangka panjang melalui estimasi dinamika yang akurat dan adaptif. Metodologi ini didasarkan pada penggunaan teknik pembelajaran mesin untuk mengidentifikasi dinamika sistem dengan menggunakan data eksperimen dan pembelajaran daring untuk mengatasi perubahan dinamika. Salah satu kendala utama pengontrol seluruh bodi adalah konfigurasinya yang rumit, yang biasanya dilakukan secara manual untuk sistem dan/atau tugas tertentu.



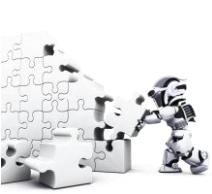


Gambar 9.1 Gagasan konseptual tentang tantangan, tujuan, dan pendekatan yang diterapkan untuk identifikasi dinamika sistem seluruh tubuh menggunakan teknik pembelajaran mesin

Oleh karena itu, pengembangan strategi otomatis untuk mengonfigurasi parameter pengontrol seluruh bodi dengan informasi kontekstual dan tugas tingkat tinggi menggunakan teknik pembelajaran mesin merupakan persyaratan utama untuk berhasil dalam penggunaan praktisnya. Selain itu, pengontrol yang dibutuhkan juga perlu dipilih dan dikonfigurasi secara otomatis berdasarkan modul perangkat keras yang berbeda untuk membangun sistem tertentu. Informasi konfigurasi ini dapat digunakan sebagai pengetahuan awal untuk pemodelan dan adaptasi dinamika sistem. Dengan demikian, hasilnya adalah sistem yang dapat mengadaptasi perilakunya menggunakan informasi kontekstual dan mengubah morfologi jaringan kendali perangkat lunak menggunakan informasi tentang perangkat keras.

9.3 KONTROL SELURUH TUBUH UNTUK SISTEM HETEROGEN UNDERACTUATED

Penerapan robot bawah air dengan basis yang digerakkan dan lengan yang diartikulasikan membutuhkan kombinasi keterampilan mobilitas dan manipulasi. Akibatnya, pendekatan kontrol seluruh tubuh, yang memungkinkan integrasi beberapa tujuan kontrol dengan prioritas yang berbeda, telah diusulkan untuk kelas sistem ini. Dalam konteks interaksi fisik, kerangka kerja kontrol kepatuhan hierarkis diusulkan dalam untuk manipulator basis tetap menggunakan argumen pasif. Kombinasi pengontrol kepatuhan tersebut dengan basis bergerak yang dikontrol posisi/kecepatan dipertimbangkan dalam.



Selain itu, kerangka kerja yang sama juga telah diterapkan pada dinamika basis mengambang robot berkaki, tetapi dengan asumsi bahwa kontak yang tersedia memungkinkan kontrol gaya kontak yang tepat. Untuk menerapkan pendekatan kontrol yang serupa pada manipulator bawah air, kita dapat memanfaatkan kesamaan struktural antara sistem robot yang berbeda dengan dinamika dasar mengambang. Ketika membandingkan dinamika benda tegar utama dalam manipulator ruang angkasa, robot berkaki, serta manipulator udara, seseorang dapat mengamati struktur dinamis umum di mana dinamika dasar mengambang digunakan dalam kombinasi dengan kondisi kontak yang berbeda dan sifat aktuator yang berbeda.

Dalam konteks manipulator bawah air, khususnya dinamika bawah air kendaraan dan sistem kontrol kendaraan yang mungkin kurang digerakkan memainkan peran penting. Untuk desain pengontrol, perhatian khusus harus diberikan pada ketahanan pengontrol sehubungan dengan ketidakpastian dalam dinamika bawah air. Analisis ketahanan teoretis dapat didasarkan pada konsep stabilitas-keadaan-masukan dan dapat menggunakan formulasi sistem di mana ketidakpastian model dianggap sebagai gangguan dari dinamika nominal yang dikendalikan. Redundansi rantai kinematik lengkap memungkinkan untuk mempertimbangkan variabel tugas yang berbeda termasuk pose kendaraan dan variabel momentum pada prioritas yang berbeda dalam hierarki kontrol.

Faktanya, penggunaan variabel momentum sistem total alih-alih pose dan orientasi kendaraan baru-baru ini menghasilkan pengendali yang efisien dalam konteks robotika luar angkasa dan sangat mungkin bahwa sifat serupa juga dapat digunakan dalam sistem bawah air. Lebih lanjut, salah satu tantangan mendasar adalah pertanyaan bagaimana mengatasi interaksi dinamis antara gaya kontak (yang diperlukan) untuk manipulasi dan dinamika pangkalan yang mungkin kurang aktif. Berdasarkan kerangka kerja hierarkis umum untuk mengendalikan manipulator bawah air yang kurang aktif, tantangan berikutnya adalah perluasan kerangka kerja ini menuju model aktuator yang lebih realistis dan arsitektur kontrol yang muncul dalam sistem bawah air. Pendorong kendaraan bawah air memiliki dinamika dan laju kendali yang relatif lambat dibandingkan dengan manipulator robot canggih. Selain itu, komputasi terdistribusi untuk pangkalan dan manipulator perlu dipertimbangkan juga.

Oleh karena itu, seseorang akhirnya harus mengatasi arsitektur kendali heterogen di mana berbagai subsistem dan sensor dioperasikan pada laju kendali yang berbeda. Konsep Pasifitas Domain Waktu (TDPC) menghadirkan kerangka kerja yang andal untuk arsitektur kontrol heterogen tersebut. Tujuan akhirnya adalah metodologi desain pengontrol generik yang dapat mengisolasi efek penundaan waktu, pengambilan sampel, dan dinamika aktuator terhadap kinerja keseluruhan. Sebagai langkah awal menuju tujuan ini, TDPC dapat menghasilkan komponen kontrol korektif tambahan untuk meningkatkan ketahanan pengontrol seluruh bodi terhadap ketidaksempurnaan model ini.

9.4 EVALUASI

Strategi pengendalian yang dikembangkan rencananya akan diuji dan dievaluasi di dua lokasi uji yang berbeda. Di satu sisi, pengembangan inti pengendalian seluruh bodi akan

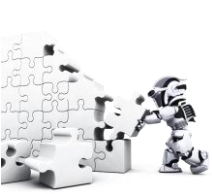


divalidasi terlebih dahulu dalam infrastruktur simulasi dinamika basis terapung yang ada untuk aplikasi luar angkasa dan robot terbang yang berlokasi di DLR (lihat Gambar 9.2 (kanan)). Secara paralel, dinamika sistem seluruh bodi akan divalidasi di kolam bawah air di DFKI (lihat Gambar 9.2 (kiri)). Pada tahap selanjutnya, pengembangan akhir juga akan divalidasi di kolam bawah air di DFKI, menggunakan manipulator bawah air yang tersedia di DFKI. Pembelajaran model seringkali membutuhkan data yang cukup kaya yang harus mencakup sebagian besar ruang keadaan model, karena hampir mustahil untuk mencakup seluruh ruang.

Oleh karena itu, memperoleh kumpulan data yang besar dan kaya merupakan langkah penting untuk mempelajari model yang akurat. Untuk tujuan tersebut, eksperimen identifikasi akan dilakukan secara ekstensif di fasilitas pengujian maritim di DFKI, di mana eksitasi tambahan pada sistem akan diperlukan. Misalnya, robot akan diperintahkan untuk melintasi lintasan acak-periodik. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghasilkan lintasan tersebut dibahas lebih rinci dalam. Untuk memastikan generalisasi model yang baik, eksperimen terpisah harus dilakukan untuk menguji kinerja model.

Eksperimen validasi biasanya melibatkan perintah robot untuk melakukan lintasan titik-ke-titik acak, dan setelah itu melakukan validasi silang prediksi model dengan data terukur. Metodologi ini telah diuji menggunakan dua AUV (tanpa manipulator) di DFKI, di mana perbandingan antara beberapa metode pembelajaran mesin dan metode berbasis fisika klasik disajikan dalam. Untuk pendekatan pembelajaran daring, aliran data perlu diperoleh dan diproses secara bertahap dan dalam waktu nyata (real-time). Dalam situasi seperti itu, metode tambahan untuk menambahkan dan melupakan sampel diperlukan untuk menangani aliran data yang berkelanjutan. Karena robot akan berinteraksi secara fisik dengan lingkungannya, robot diharuskan untuk memperhitungkan situasi yang tidak diketahui atau tidak terduga yang mungkin dihadapinya.

Oleh karena itu, uji coba eksperimental yang melibatkan dinamika yang bergantung pada waktu diperlukan. Beberapa skenario eksperimental dapat dirancang, di mana robot diharuskan untuk melakukan tugas-tugas yang tidak diperhitungkan sebelumnya, seperti berinteraksi dengan berbagai objek dengan massa yang tidak diketahui, atau mengikuti lintasan tertentu saat dilengkapi dengan muatan yang berbeda, dll. Eksperimen semacam itu diperlukan untuk menguji dan memvalidasi kemampuan pembelajaran daring untuk terus beradaptasi dengan situasi baru. Selain akurasi prediksi model yang dipelajari, dua aspek tambahan yang akan diuji masing-masing adalah: (1) kecepatan adaptasi, dan (2) kemampuan model untuk beralih di antara konteks yang dipelajari sebelumnya atau untuk memutuskan apakah model baru perlu dipelajari. Kerangka konsep pembelajaran daring dinamika AUV disajikan dalam, di mana kami menyediakan metode untuk menambahkan dan melupakan sampel data serta metode penolakan outlier. Kerangka tersebut divalidasi pada data eksperimental dari AUV dengan modifikasi dalam konstruksi mekanisnya.



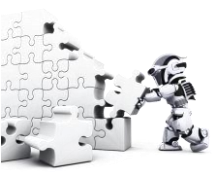


Gambar 9.2 kiri: Kolam untuk menguji kendaraan bawah air yang terletak di DFKI, kanan: infrastruktur simulasi dinamika pangkalan terapung untuk aplikasi luar angkasa dan robot terbang yang terletak di DLR

Selain itu, beberapa pendekatan dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja pembelajaran daring secara keseluruhan. Salah satu idenya adalah menggabungkan pembelajaran dengan pengetahuan pakar yang dapat digunakan sebagai informasi awal untuk metode pembelajaran. Pendekatan lain adalah meningkatkan kecepatan konvergensi pembelajaran daring dengan memilih kumpulan sampel data yang tepat, pendekatan ini biasanya disebut sebagai pembelajaran aktif. Perangkat keras robotika dalam simulator loop Gambar 9.2 (kanan) telah diterapkan di masa lalu untuk mengevaluasi berbagai sistem pangkalan terapung termasuk manipulator ruang angkasa mengambang bebas dan manipulator udara berbasis helikopter.

Menerapkan sistem ini untuk pengembangan dan evaluasi pendekatan kontrol untuk manipulasi bawah air memerlukan penerapan perkiraan representatif untuk efek bawah air dalam dinamika kendaraan. Salah satu keuntungan dari sistem ini adalah kenyataan bahwa berbagai situasi yang berbeda untuk dinamika kendaraan (yaitu efek bawah air yang berbeda dalam fluida stasioner atau dinamis) dapat diemulasikan dengan sedikit usaha. Selain itu, sistem ini memungkinkan untuk memisahkan efek dinamika robot itu sendiri dan efek lingkungan tempat robot beraksi. Pengujian yang dilakukan pada sistem ini akan berfokus pada penggunaan variabel momentum untuk kontrol seluruh bodi dalam berbagai kondisi bawah air yang diemulasikan. Pengujian ini dianggap sebagai evaluasi awal sebelum melakukan uji lapangan luar ruangan di lingkungan bawah air yang sesungguhnya.





BAB 10

KONTROL ADAPTIF UNTUK SISTEM GENGAMAN BAWAH AIR

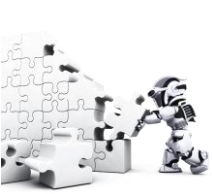
Mencengkeram objek di bawah air, bahkan hingga saat ini, merupakan salah satu tantangan terbesar dalam pengoperasian sistem robotik, baik yang dioperasikan jarak jauh maupun otonom. Saat ini, sebagian besar tugas manipulasi di bawah air dilakukan menggunakan kendaraan yang dioperasikan dari jarak jauh (ROV) yang menangani semua tugas pemeliharaan dan inspeksi industri yang melibatkan intervensi. Manipulasi pada kendaraan bawah air otonom (AUV) masih menjadi topik penelitian karena melibatkan kontrol basis yang bergerak dan gaya yang berinteraksi dalam konfigurasi yang paling menantang. Penelitian dan penelitian lanjutan yang disajikan di sini berfokus pada kontrol dan pemrosesan sinyal end-effector itu sendiri selama manipulasi bergerak otonom.

Persyaratan untuk penelitian dalam kontrol adaptif untuk gripper bawah air, yang pada dasarnya merupakan tantangan algoritmik, didasarkan pada fondasi mekanis dan elektrik. Yaitu, ketersediaan kinematika yang handal serta rangkaian sensor yang memadai. Pencapaian mengenai aplikasi bawah air disajikan pada bagian berikut.

10.1 SISTEM GRIPPER

Dasar untuk kemampuan mencengkeram tingkat lanjut adalah manipulator yang tepat yang memungkinkan cengkeraman dengan gaya atau bentuk tertutup, beserta serangkaian sensor yang memungkinkan pemantauan tugas manipulasi otonom. Untuk aplikasi di bawah air, kondisi lingkungan yang menantang membatasi pengembangan end-effector tersebut untuk waktu yang lama. Kondisi lingkungan seperti tekanan sekitar, air asin, dan kontak langsung dengan air membatasi kemungkinan penerapan solusi konvensional karena solusi tersebut tersedia untuk aplikasi di darat. Oleh karena itu, tinjauan lengkap tentang perkembangan sistem gripper bawah air dapat diberikan secara komprehensif. Karena sistem grip dengan umpan balik taktil sangat diminati untuk manipulasi otonom, fokusnya adalah pada gripper yang memiliki teknologi ini.

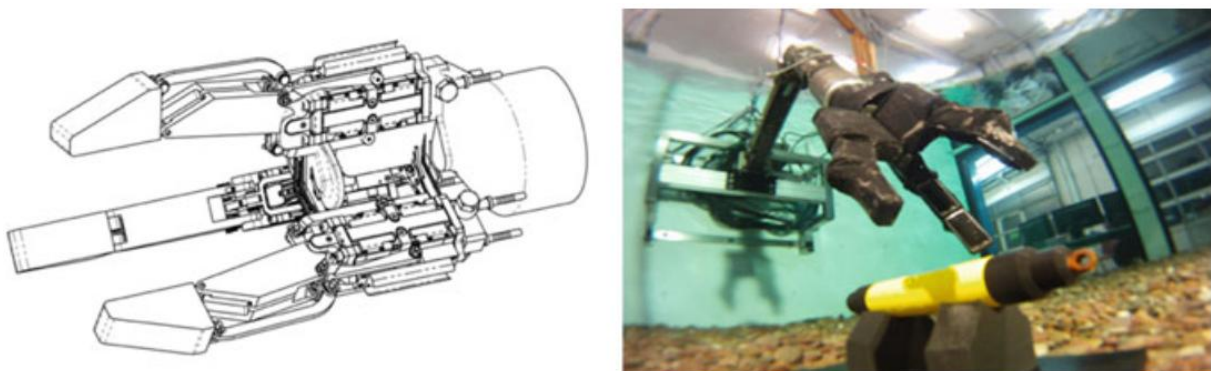
Upaya pertama menuju manipulasi bawah air multi-jari dilaporkan dalam. Selama proyek AMADEUS, sebuah gripper tiga jari dikembangkan yang terdiri dari pengukur regangan untuk mengukur gaya serta sensor yang terbuat dari polivinilidena fluorida (PVDF) untuk penginderaan selip. Prinsip aktuasi dirancang menggunakan tiga struktur bellow di setiap jari untuk membengkokkan elemen jari. Dinyatakan bahwa kontrol posisi harus didasarkan pada estimasi pose yang diperoleh dari tekanan di dalam struktur bellow. Dengan menggunakan hidrolika untuk aktuasi, perilaku dinamis yang beroperasi pada 10 Hz tercapai. Tujuan penggunaan gripper AMADEUS adalah dalam mode teleoperasi yang dikombinasikan dengan fungsi bantuan dan pembuatan model berdasarkan sensasi taktil yang diamati oleh sensor terintegrasi.



HEU Hand II dari Universitas Teknik Harbin dirancang sebagai alat untuk manipulator laut dalam industri. Hal ini dijelaskan dalam karya. Morfologi dipilih berdasarkan desain tiga jari yang masing-masing memiliki dua sendi. Satu set sensor pengukur regangan diintegrasikan di ujung jari untuk penginderaan kontak yang dikombinasikan dengan pengamatan torsi yang diberikan dari aktuasi motor DC. Kontrol impedansi diimplementasikan sebagai skema kontrol. Para penulis menyatakan bahwa pendekatan ini menimbulkan tantangan tambahan ketika diterapkan pada skenario bawah air karena istilah hidrodinamik seperti massa tambahan, hambatan, dan daya apung tidak diketahui secara pasti. Inilah sebabnya penulis menerapkan kontrol impedansi jaringan saraf berbasis posisi untuk mengatasi ketidakpastian dalam model robot.

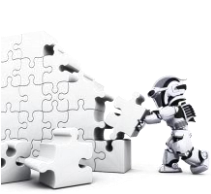
Sebuah manipulator penggerak tendon tiga jari untuk aplikasi dalam proyek TRIDENT disajikan oleh. Gripper digunakan dalam kombinasi dengan manipulator bawah air elektrik pada kendaraan bawah air otonom (AUV) Girona 500. Ini memiliki elemen penginderaan kontak di ujung jari menggunakan prinsip pengukuran optik. Kontrol kecepatan dan posisi diimplementasikan pada pengontrol motor yang digunakan untuk aktuasi gripper. Pengontrol ini dihubungkan oleh unit kontrol yang mengoordinasikan sistem lengan dan gripper AUV yang berjalan pada 100 Hz.

Gripper tiga jari lainnya dengan fokus pada umpan balik sensor taktil multi-moda dikembangkan selama proyek SeeGrip. Alat ini dirancang untuk digunakan sebagai alat pengganti manipulator laut dalam industri. Morfologinya menampilkan dua ibu jari yang dapat berlawanan arah serta dua anggota gerak pada setiap jari. Encoder sudut absolut memungkinkan penerapan kontrol posisi. Aktuasinya didasarkan pada katup servo sub-miniatur yang beroperasi pada tekanan 50 bar dan frekuensi 3 kHz (Gambar 10.1).



Gambar 10.1 Morfologi dan uji lapangan gripper SeeGrip

Dengan meninjau kembali kondisi terkini yang disajikan, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar gripper robotik untuk aplikasi bawah air dikembangkan untuk memungkinkan tugas telemanipulasi yang dikombinasikan dengan ROV. Gripper otonom didasarkan pada kemampuan untuk bereaksi terhadap rangsangan eksternal yang berasal dari sebanyak mungkin modalitas. Tidak seperti aplikasi di darat, parameter hidrodinamika dan redaman harus dipertimbangkan, baik dari gripper maupun objek yang ditangani.



10.2 SENSOR SENTUH

Bagian ini membahas secara singkat pertimbangan desain terkait sensor yang diterapkan pada kontak dengan air dan tekanan sekitar yang bervariasi. Mengukur pose gripper sangat penting untuk posisi pra-pegangan dan untuk mendukung identifikasi bentuk geometris objek di dalam gripper. Pendekatan klasik seperti roda encoder tidak cocok untuk tugas ini karena memerlukan rumah tekanan atau keandalannya terbatas saat direndam langsung di air sekitar. Karena medan magnet tidak direndam oleh air, sensor berbasis efek Hall sangat cocok dan terbukti berhasil untuk mengukur posisi sudut di kolom air.

Penelitian sebelumnya lebih lanjut didasarkan pada sensor gaya yang toleran terhadap tekanan. Demi kualitas umpan balik sensor, sensor yang mampu beroperasi secara independen dari kolom air dan tidak rusak oleh kontak dengan air sangat dibutuhkan. Untuk mengukur gaya absolut, prinsip pengukuran sensor strain gauge telah terbukti cukup andal. Sensor ini tersedia dalam teknologi MEMS dan disusun dalam Sirkuit Jembatan Wheatstone.

10.3 SOLUSI UNTUK KONTROL OPTIMAL NONLINIER

Optimasi nonlinier merupakan fitur kunci untuk banyak aplikasi dalam industri dan sains. Pertanyaan umum dalam konteks ini adalah bagaimana variabel bebas suatu model harus dipilih untuk meminimalkan fungsi tujuan yang telah ditentukan dengan tetap mempertahankan batasan tertentu. Permasalahan optimasi nonlinier didefinisikan sebagai berikut: misalkan $z \in R^n$ adalah vektor optimasi (misalnya, parameter kontrol gripper). Selanjutnya, misalkan $F: R^n \rightarrow R$ menyatakan fungsi tujuan dan $g: R^n \rightarrow R^{\{l_i\}}$, $h: R^n \rightarrow R^{\{l_e\}}$ menyatakan fungsi kendala nonlinier umum.

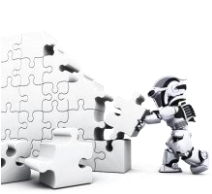
Maka:

$$\min_z F(z)$$

$$s. t. g_i(z) \leq 0, i = 1, \dots, l_i$$

$$h_j(z) = 0, j = 1, \dots, l_e$$

disebut pemrograman nonlinier (NLP). Secara umum, terdapat beberapa algoritma berbeda untuk menyelesaikan masalah tersebut. Semuanya merupakan spesialisasi dari metode Newton. Pemecah WORHP ("We Optimize Really Huge Problems") dikembangkan khusus untuk masalah optimasi nonlinier skala besar dan jarang, dan merupakan pemecah NLP pilihan Badan Antariksa Eropa (ESA). WORHP menggunakan metode pemrograman kuadrat sekuensial jarang (SQP) dengan metode titik interior untuk submasalah kuadrat atau metode titik interior pada tingkat nonlinier. Perancangan perangkat lunak difokuskan pada ketahanan tinggi dan perancangan berbasis aplikasi.



10.4 PRINSIP-PRINSIP KOMPUTASI TERDISTRIBUSI

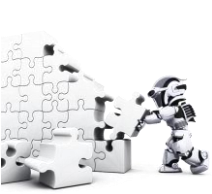
Konsep komputasi terdistribusi berasal dari sistem terdistribusi dalam bidang ilmu komputer. Sistem terdistribusi terdiri dari berbagai komputer jaringan yang memiliki kemampuan untuk berkomunikasi satu sama lain melalui pengiriman pesan untuk mengoordinasikan tindakan mereka, dan akhirnya mencapai tujuan bersama. Komputasi terdistribusi adalah suatu metode, biasanya berupa algoritma, untuk memecahkan masalah global secara terdistribusi. Masalah objektif utama dibagi menjadi banyak sub-masalah dan masing-masing diselesaikan oleh satu komponen, yaitu satu komputer atau beberapa, dari sistem terdistribusi.

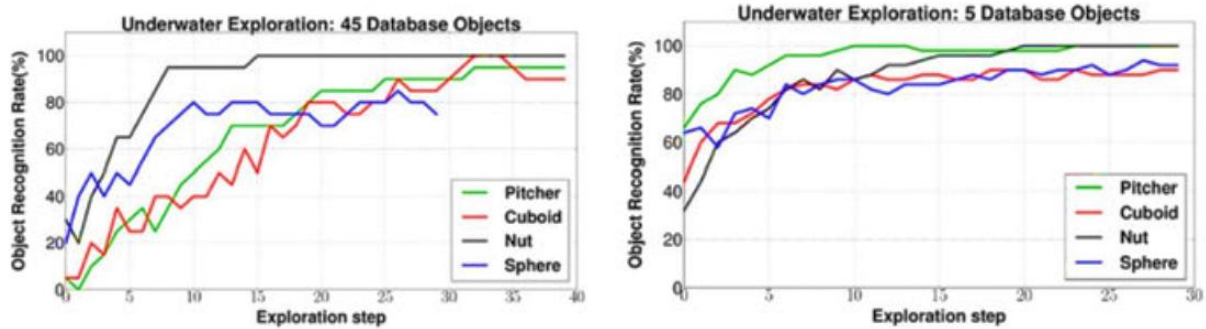
Dibahas dalam banyak literatur seperti dalam, komputasi terdistribusi pada sistem terdistribusi menunjukkan keunggulannya dibandingkan dengan komputasi terpusat di mana semua informasi harus dihitung di pusat komputasi. Salah satu keunggulan signifikannya adalah toleransi kesalahan inheren yang berarti adanya kegagalan tidak memengaruhi kelangsungan hidup keseluruhan sistem. Hal ini meningkatkan ketahanan keseluruhan sistem. Pencegahan kemacetan juga merupakan keuntungan yang cukup besar ketika jaringan komponen besar atau sejumlah besar data perlu ditangani. Distribusi tugas komputasi dari masalah global ke komputer yang berbeda akan membuat komputasi menjadi efisien. Untuk merancang algoritma komputasi terdistribusi yang tepat, kita ingin mengejar solusi yang relatif akurat dari masalah global dan pada saat yang sama menjaga efisiensi komputasi. Selain itu, beberapa persyaratan lain juga perlu dipertimbangkan, seperti overhead komunikasi yang rendah, pemrosesan paralel, latensi yang dapat diterima, sinkronisasi, skalabilitas, dll.

10.5 EKSPLORASI TAKTIL

Eksplorasi taktil objek masih sangat terbatas. Alasannya kemungkinan besar karena kurangnya kebutuhan akan hal ini di sebagian besar aplikasi di darat dan keterbatasan dalam ketangkasan dan dukungan taktil untuk aplikasi di bawah air. Untuk aplikasi di bawah air, teknologi ini menjadi sangat penting karena keterbatasan visibilitas sering kali menyebabkan kondisi lingkungan di mana manipulasi otonom, bahkan manual, tidak memungkinkan.

Kemampuan terkini dalam domain ini sangat terbatas dibandingkan dengan aplikasi di bawah air. Dalam karya, sebuah pendekatan untuk mengenali dan melokalisasi objek yang telah diketahui sebelumnya dalam enam derajat kebebasan disajikan. Berkat resolusi spasial dan gaya yang tinggi, serta kinematika gripper, representasi objek yang bersentuhan dengan awan titik padat menjadi mungkin. Hal ini memungkinkan penggunaan teknik pencocokan awan titik mutakhir bersama dengan strategi titik terdekat (ICP) iteratif. Bersamaan dengan algoritma Batch RANSAC, pendekatan ini digunakan untuk mengembangkan hipotesis mengenai objek yang dieksplorasi sehubungan dengan pencocokan basis data. Para penulis menyatakan bahwa pendekatan ini terbatas pada satu elemen sensor dari sistem gripper yang digunakan untuk pendekatan tersebut dan dengan demikian dapat dioptimalkan secara drastis (Gambar 10.2).





Gambar 10.2 Tingkat pengenalan objek menggunakan pendekatan eksplorasi objek yang disajikan dalam

Dengan mempertimbangkan strategi eksplorasi manusia yang dieksplorasi dalam, mengikuti kontur dievaluasi dalam sebagai metode eksplorasi yang efisien untuk objek yang tidak dikenal. Pendekatan ini menggunakan citra taktil yang diperoleh sebagai indikasi ke mana harus menggerakkan end-effector.

Perencanaan lintasan sederhana melintasi citra taktil digunakan untuk mengarahkan dan menggerakkan lengan manipulator berdasarkan informasi yang diperoleh pada geometri berbentuk s. Untuk mencapai rekonstruksi kontur objek yang kompleks, pemrosesan data daring untuk menghasilkan informasi berdasarkan struktur objek yang telah diperoleh diperlukan untuk memperoleh gerakan eksplorasi berikutnya. Tugas ini intensif dalam komputasi karena memerlukan perencanaan lintasan, pencocokan pola, fusi data, serta kontrol aktuasi multi-jari.

10.6 KONTROL ADAPTIF DALAM MANIPULASI BAWAH AIR

Eksplorasi taktil di bawah air merupakan tugas yang sangat non-linier karena fenomena fisik yang kompleks dan pengaruh timbal baliknya. Untuk menggunakan perangkat lunak optimasi numerik yang canggih, diperlukan pemahaman mendasar tentang semua pengaruh dan model matematika. Umumnya, model-model ini menggunakan penyederhanaan untuk mengurangi kompleksitas, sementara parameter model digunakan untuk mengadaptasi model dengan pengukuran yang diamati. Tugas pertama adalah menentukan parameter model non-linier agar model sesuai dengan pengukuran yang diamati (identifikasi parameter). Identifikasi parameter yang otomatis dan efisien memerlukan metode optimasi non-linier matematis, seperti formulasi NLP dari bagian sebelumnya.

Hanya ketika terdapat deskripsi yang baik tentang semua pengaruh fisik, seseorang dapat menggunakan algoritma kontrol matematika untuk mengendalikan gripper di bawah air secara optimal (misalnya optimal waktu atau energi). Masalah kontrol optimal dapat dipahami sebagai masalah optimasi berdimensi tak hingga, karena keadaan dan kontrol harus optimal untuk setiap titik waktu. Saat menggunakan metode langsung, terdapat dua pendekatan utama untuk mengubah masalah optimasi berdimensi tak hingga ini menjadi masalah berdimensi hingga, yang menghasilkan masalah kecil dan padat atau masalah besar dan jarang. Khususnya untuk aplikasi yang sangat non-linier, pendekatan kedua lebih menjanjikan karena ketahanan numeriknya yang disebabkan oleh non-linieritas dalam evaluasi dan simulasi



model. Memecahkan masalah kontrol optimal non-linier untuk gripper akan menghasilkan lintasan optimal dan kontrol optimal terkait. Pada langkah terakhir, algoritma kontrol harus mengadaptasi kontrol terhadap gangguan alami secara waktu nyata (real-time). Untuk melakukan tugas ini, diperlukan pengukuran yang kuat dan tepat dari semua status sistem.

10.7 PEMROSESAN SENSOR TERDISTRIBUSI DATA MASIF

Sebagaimana disebutkan di bagian sebelumnya, pemrosesan terdistribusi merupakan metode yang kuat dan efisien untuk menangani data masif karena pencegahan kongesti dan masalah titik kegagalan tunggal dari pemrosesan terpusat. Demikian pula, pemrosesan sinyal terdistribusi dalam jaringan sensor bermanfaat untuk sistem cengkeraman bawah air yang dipertimbangkan, di mana berbagai sensor ditempatkan pada gripper robotik untuk memperoleh data terkait, seperti posisi, kecepatan, sudut, tekanan, suhu, dll. Setiap sensor tunggal dalam sistem tidak dapat mengakses semua pengamatan karena kategori dan kemampuan penginderaan yang berbeda. Dengan demikian, perlu bekerja sama dengan node tetangga dengan mengomunikasikan pesan untuk mendapatkan solusi global secara terdistribusi. Kita juga dapat menyebut tugas tersebut sebagai fusi sensor terdistribusi.

Salah satu kemungkinan untuk mencapai solusi terdistribusi adalah dengan menguraikan fungsi tujuan global jaringan menjadi jumlah sub-tujuan, biasanya dengan kendala tambahan yang memastikan solusi lokal yang diperoleh oleh setiap agen konvergen ke solusi umum di seluruh jaringan. Kelas khusus dari algoritma semacam itu disebut algoritma berbasis konsensus terdistribusi. Misalnya, optimasi kuadrat terkecil berbasis konsensus dapat ditemukan di. Beberapa kemungkinan lain untuk pemrosesan terdistribusi melalui jaringan sensor seperti metode berbasis inkremental berbasis difusi, berbasis gosip dan berbasis grafik juga dapat diselidiki lebih lanjut dalam aplikasi ini dengan menghadapi persyaratan praktis yang berbeda untuk membedakan manfaatnya.

Dalam sistem kontrol, data penginderaan entah bagaimana dapat berhubungan dengan keadaan keseluruhan sistem secara matematis. Dalam beberapa kasus, keadaan adalah variabel tersembunyi dan hanya pengetahuan tentang proses dinamis dan pengamatan yang sesuai yang tersedia. Untuk skenario seperti itu, metode estimasi keadaan berbasis model seperti filter Kalman dapat diterapkan. Disesuaikan dengan aplikasi ini, penyelidikan lebih lanjut tentang desain yang kuat dari algoritma estimasi keadaan terdistribusi, misalnya, pekerjaan kami sebelumnya, melalui jaringan sensor dapat dipandang sebagai tugas penelitian yang mengacu pada strategi pemrosesan terdistribusi di atas.

Kesimpulan

Selama beberapa tahun terakhir, sistem robotik telah menunjukkan kemampuan yang mengesankan dalam berbagai disiplin ilmu. Namun, sebagian besar keterampilan ini disajikan secara terpisah dan memiliki keterbatasan kemampuan pemrosesan atau data sensor, padahal keduanya seharusnya digabungkan untuk menghasilkan solusi yang serbaguna. Agar kemampuan ini dapat diterapkan dalam aplikasi dunia nyata, ketahanan dan keandalan dalam tugas yang diberikan serta efisiensi operasional merupakan faktor krusial untuk mencapai penerimaan.



Menurut pendapat kami, tujuan ini hanya dapat dicapai dengan menghadapi tantangan mengintegrasikan kemampuan dalam penginderaan, pemrosesan, dan reaksi. Oleh karena itu, kami mengusulkan arsitektur penginderaan dan komputasi yang sangat terdistribusi untuk robot yang memproses modalitas penginderaan multimoda untuk menghadapi ketidakpastian dalam umpan balik sensor berdasarkan prinsip pengukurannya. Waktu reaksi yang singkat yang dimungkinkan oleh paralelisasi tugas pemrosesan terdistribusi serta komputasi keluaran kontrol berdasarkan solusi non-linier akan memungkinkan tugas manipulasi dan eksplorasi tingkat lanjut.

Kami mengusulkan demonstrasi asumsi ini dengan mewujudkan eksplorasi taktil yang tangguh melalui penggabungan berbagai bidang keahlian yang disajikan dalam bab ini. Kami yakin bahwa jika kami berhasil dalam tugas ini, robot end-effector yang terintegrasi dengan baik akan membuka jalan menuju sistem robot yang tangguh dan sangat reaktif, bahkan di darat, yang dibutuhkan jika kami ingin robot dapat diterima sebagai rekan kerja manusia.



BAB 11

TANTANGAN DALAM NAVIGASI VISUAL BAWAH AIR DAN SLAM

Pada bab ini membahas navigasi visual kendaraan bawah air otonom (AUV) dengan dan tanpa peta tertentu, yang disebut Peta Lokalisasi dan Pemetaan Simultan (*Simultaneous Localization and Mapping* / SLAM). Kami merangkum tantangan dan peluang di lingkungan bawah air yang membedakan navigasi visual dari navigasi darat dan juga meninjau secara singkat perkembangan terkini di bidang ini. Kemudian, sebagai makalah posisi, kami berargumen mengapa banyak dari tantangan ini dapat diatasi dengan pemodelan ketidakpastian yang tepat dalam representasi SLAM. Hal ini khususnya akan memungkinkan algoritma SLAM untuk menangani ambiguitas antara "Saya melihat fitur yang sama lagi", "Saya melihat fitur yang berbeda tetapi tampak serupa", dan "Lingkungan telah berubah dan fitur tersebut berpindah".

11.1 PENDAHULUAN

Operasi bawah air yang dilakukan oleh penyelam (di perairan dangkal) atau mesin yang dikendalikan dari jarak jauh membutuhkan tenaga ahli yang terampil dan biasanya menghalangi personel atau seluruh kapal selama durasi misi yang panjang, sehingga mengganggu misi berulang untuk pemantauan, intervensi, atau misi ke lokasi lepas pantai yang jauh dan menyulitkan eksplorasi atau pemetaan paralel besar-besaran. Kendaraan bawah air otonom (AUV) dapat menjadi solusi untuk masalah ini, karena beroperasi tanpa campur tangan manusia.

Namun, AUV membutuhkan lokalisasi dan navigasi otomatis yang andal, yang merupakan tantangan di bawah air. Meskipun mobil otonom dengan penglihatan mesin di darat semakin matang, pengetahuan ini belum ditransfer ke robot di lautan dan sejauh ini AUV (lihat Gambar 11.1) tidak menggunakan informasi visual untuk lokalisasi dengan cara yang sama seperti di darat. Dalam kontribusi ini, kami membahas tantangan dan spesialisasi utama untuk penglihatan bawah air, lokalisasi, dan SLAM, serta merumuskan apa yang kami yakini dapat menjadi langkah menuju navigasi bawah air yang lebih baik.



Gambar 11.1 AUV Anton GEOMAR beroperasi di kedalaman 100 m di terumbu karang Tisler, Norwegia. Untuk memetakan dasar laut secara visual (gambar kanan), AUV harus tetap dekat



dengan permukaan tanah karena jarak pandang yang buruk dan keterbatasan energi untuk penerangan.

11.2 LOKALISASI BAWAH AIR

Karena kurangnya GPS bawah air, lokalisasi di laut jauh lebih menantang daripada di darat. Pendekatan umum untuk mendapatkan posisi perangkat yang terendam didasarkan pada ping akustik, seperti lokalisasi garis dasar ultra-pendek (USBL) atau lokalisasi garis dasar panjang (LBL). Perangkat USBL, misalnya yang dipasang di kapal permukaan, menggunakan empat hidrofona yang ditempatkan pada jarak yang sangat pendek satu sama lain dan mengukur perbedaan waktu kerja sinyal akustik yang dipancarkan oleh robot yang terendam.

Mengingat kecepatan suara di air, posisi relatif robot kemudian dapat ditriangulasi dan diubah menjadi koordinat absolut dengan memanfaatkan posisi dan orientasi GPS kapal. LBL didasarkan pada prinsip yang sama, tetapi menggunakan beberapa transponder yang dipasang di lokasi yang sangat berbeda untuk melakukan triangulasi robot. Baik USBL maupun LBL mengalami propagasi multi-jalur, gema, refraksi di lapisan air, gangguan garis pandang di medan yang kompleks, serta derau dan gaung. Tergantung pada skenarionya, hal ini menghasilkan varians estimasi posisi yang tinggi dan outlier yang lebih sering atau lebih jarang, yang mana USBL lebih diperhatikan daripada LBL.

Robot bawah air yang dekat dengan tanah biasanya juga menggunakan log kecepatan Doppler (DVL) yang mendeteksi pergeseran Doppler dari sinyal yang dipancarkan dan dipantulkan di tanah untuk mendapatkan estimasi kecepatan. Informasi ini dapat digabungkan dengan estimasi lokalisasi yang telah disebutkan sebelumnya atau digunakan dalam pendekatan perhitungan mati ketika tidak ada pembaruan posisi langsung yang terdeteksi. Karena kebutuhan dan biaya untuk rumah tekanan, baling-baling, dan daya AUV meningkat pesat seiring dengan kedalaman penyelaman, AUV industri dan ilmiah biasanya juga dilengkapi dengan akselerometer berkinerja tinggi, sensor inersia, atau giroskop yang berkaitan dengan harga keseluruhan sistem, (secara tidak langsung) memberikan informasi orientasi berkualitas tinggi.

Detail lebih lanjut tentang sensor yang tersedia untuk lokalisasi dibahas dalam, sementara memberikan gambaran umum terkini tentang navigasi bawah air secara umum. Secara keseluruhan, posisi dan orientasi relatif di bawah air dapat diperoleh dengan cukup andal, tetapi posisi absolut masih menjadi topik yang menantang, khususnya di perairan yang lebih dalam. Hal ini mempersulit kampanye pemantauan yang mengharuskan kembali ke tempat yang dikunjungi sebelumnya, atau juga misi layanan di lokasi yang belum dilengkapi transponder dan dikalibrasi secara tepat untuk penggunaan LBL.

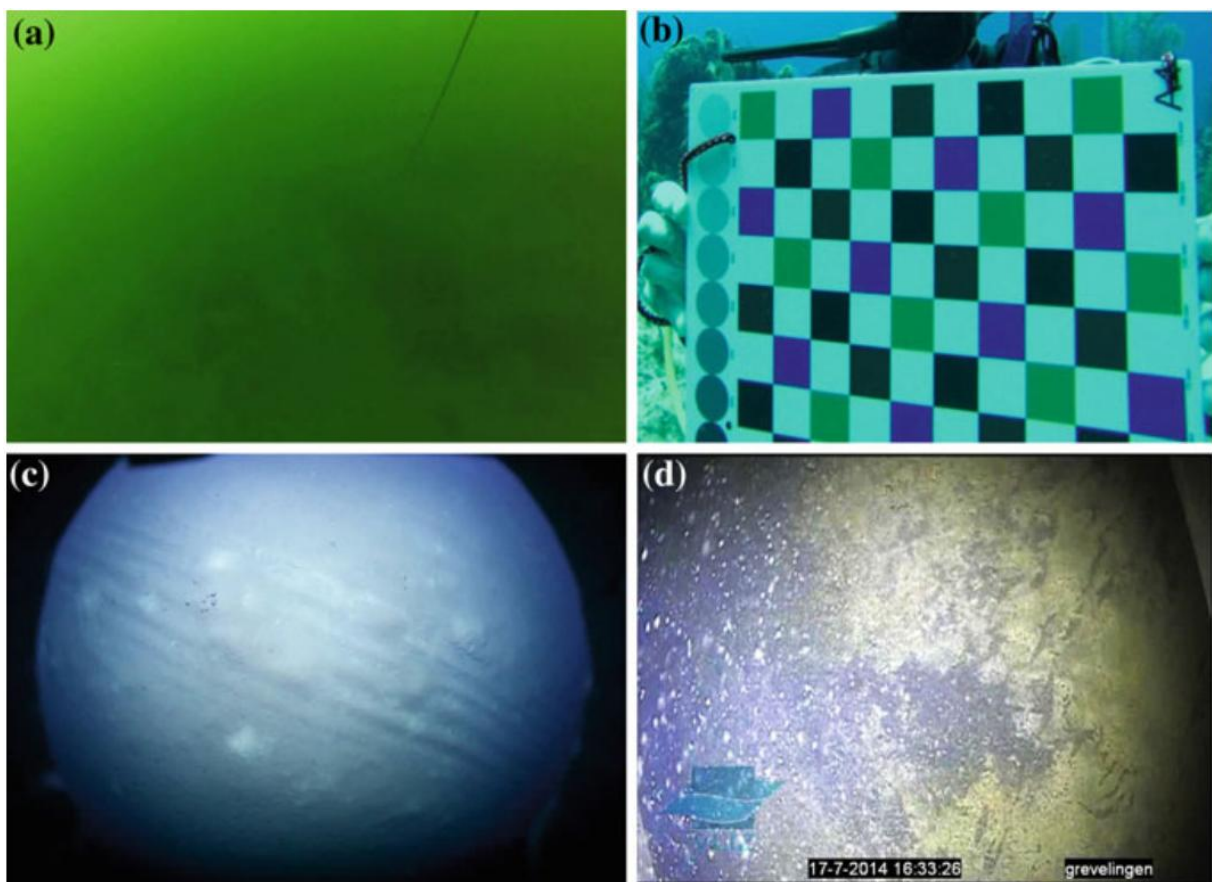
Lokalisasi visual berpotensi membantu, tetapi visi komputer bawah air memiliki beberapa keterbatasan seperti yang dirangkum di bagian selanjutnya.

11.3 TANTANGAN DAN KEADAAN TERKINI DALAM VISI BAWAH AIR

Saat mengambil foto di bawah air, berbagai fenomena memengaruhi gambar: Cahaya diserap dan dihamburkan saat bergerak di dalam air. Atenuasi yang bergantung pada panjang

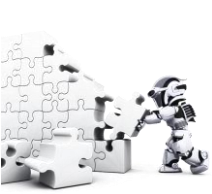


gelombang ini serta cahaya yang menutupi atau partikel yang mengambang mengganggu teknologi penglihatan standar dan membatasi visibilitas efektif hingga beberapa meter. Saat memotret titik pemandangan tertentu dari perspektif yang berbeda, foto-foto tersebut menunjukkan warna dan kecerahan yang berbeda, tergantung pada jaraknya. Contoh efek ini dapat dilihat pada Gambar 11.2 Masalah ini menjadi lebih parah ketika sumber cahaya terpasang pada robot, yaitu bergerak dan iluminasinya terus berubah. Mobley memberikan gambaran umum yang sangat baik tentang perambatan cahaya bawah air fisik pada tingkat partikel, juga terkait dengan ketergantungan parameter pada komposisi air (salinitas, tekanan, partikel, ...). McGlamery dan Jaffe mengusulkan model pencitraan perambatan cahaya bawah air yang mudah dipahami dalam hal atenuasi dan hamburan.



Gambar 11.2 Contoh gambar yang menggambarkan tantangan visi komputer: **a** Gambar laut Baltik yang hampir seluruhnya berwarna hijau yang menunjukkan hamburan kuat dan visibilitas terbatas, **b** Papan catur RGB di kedalaman air 10 m, di mana kotak merah tampak hampir hitam, karena bagian merah dari sinar matahari sebagian besar telah diserap dalam perjalanannya melalui air, **c** Gambar yang menunjukkan iluminasi dasar laut yang tidak homogen menggunakan lampu kilat dan **d** Partikel mengambang di latar depan yang mengaburkan dasar laut

Selain efek fotometrik yang memengaruhi warna piksel, kebutuhan akan rumah kedap air dan tahan tekanan di sekitar kamera juga menciptakan efek geometris pada proses



pencitraan. Ketika kamera tetap kering di balik jendela kaca tebal dari rumah bertekanan, sinar cahaya merambat dari suatu objek melalui air dan dibiaskan pada antarmuka air-kaca dan kemudian dibiaskan lagi pada antarmuka kaca-udara ketika memasuki bagian dalam rumah. Khususnya untuk casing laut dalam, kacanya bisa setebal beberapa sentimeter dan memiliki kerapatan optik yang jauh lebih besar (misalnya safir) dibandingkan dengan udara atau air. Refraksi mematuhi hukum Snell dan bergantung pada sudut datang dan indeks bias material, serta secara substansial mempersulit model pencitraan.

Pendekatan awal untuk pengukuran optik bawah air 3D menunjukkan bahwa sebagian besar refraksi dapat dikompensasi oleh distorsi radial 2D, yang merupakan perkiraan praktis untuk skenario tertentu, tetapi secara umum, efek refraksi bergantung pada jarak. juga menunjukkan ketidakabsahan model lubang jarum untuk pelabuhan datar, dan Agrawal dkk. menunjukkan bahwa sistem tersebut merupakan kamera aksial, yaitu kamera yang tidak memiliki sudut pandang tunggal. Kemudian, menggunakan model refraksi yang terinspirasi oleh fisika dalam struktur-dari-gerakan bawah air. Sistem terbaru juga mempertimbangkan pasca-pemrosesan yang dimotivasi secara fisik dari masalah perambatan cahaya bawah air dan menunjukkan pengenalan lokasi pada set data visual murni yang direkam di bawah air atau untuk registrasi titik awan bawah air 3D.

Berbeda dengan misi robotik di darat, penulis kontribusi ini tidak menyadari SLAM visual langsung yang sebenarnya dilakukan untuk mengarahkan robot di laut. Ada karya luar biasa dalam proyek DEPTHX yang secara otonom mengeksplorasi sistem cenote Zacatón menggunakan SLAM berbasis sonar, tetapi ini tidak melibatkan visi komputer dan secara keseluruhan merupakan pengecualian. Salah satu kemungkinan penjelasan untuk hal ini adalah risiko kehilangan robot di lautan karena lokalisasi yang salah atau penilaian diri yang salah terkait ketidakpastian posisi terlalu tinggi.

Penilaian diri yang kritis ini dan pendeteksian kegagalan yang sebenarnya merupakan topik yang menantang yang kurang mendapat perhatian dibandingkan (terkadang terlalu percaya diri) mengoptimalkan estimasi yang sebenarnya. Seberapa pentingnya hal ini untuk misi yang sebenarnya dapat dilihat misalnya dari sistem strategi cadangan yang kompleks yang digunakan dalam proyek DEPTHX, Gagasan menarik lainnya terkait penanganan ketidakpastian telah diajukan oleh Milford dan Wyeth dan baru-baru ini juga oleh Pfingsthorn. sebagaimana akan dibahas di bagian selanjutnya tentang konsep SLAM.

11.4 FENOMENA SLAM UMUM DAN KAITANNYA DENGAN DOMAIN BAWAH AIR

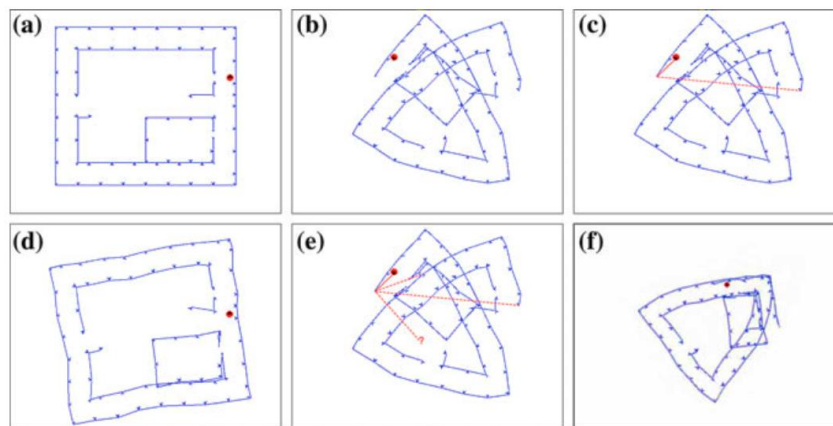
Di sini kami mengulas fenomena SLAM terpenting yang berasal dari sifat relatif pengamatan, khususnya akumulasi kesalahan, yang disebut "kepastian hubungan meskipun terdapat ketidakpastian posisi" dan penutupan loop beserta implikasi khususnya untuk SLAM bawah air.

Akumulasi Kesalahan

Pada contoh di Gambar 11.3, sebuah robot melakukan loop melalui suatu lingkungan (Gambar 11.3a). Selama perjalanannya, robot tersebut membuat peta pada dasarnya dengan merangkai hubungan spasial antara fitur yang diamati secara lokal dan dari odometri. Hal ini



menyebabkan akumulasi kesalahan, karena setiap mata rantai dalam rantai ini menambah kesalahan (Gambar 11.3b). Sementara pada SLAM terestrial di luar ruangan, GPS memecahkan masalah akumulasi ini, odometri bawah air, yaitu log kecepatan doppler (DVL) dan girometer relatif presisi, sedangkan dibandingkan dengan situasi di darat, informasi absolut, sebagian besar dari sistem akustik, sulit diperoleh dan/atau tidak presisi. Jadi, fenomena akumulasi kesalahan sangat relevan dalam SLAM bawah air. Pengecualian penting adalah arah vertikal, di mana kedalaman absolut dapat diukur dengan mengukur tekanan air dan sudut pandang yang dapat diamati secara absolut dari gravitasi.

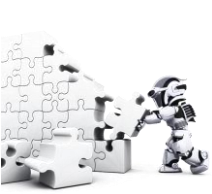


Gambar 11.3 Fenomena SLAM umum berupa akumulasi kesalahan, penutupan loop, dan asosiasi data tak pasti. Ilustrasi diadaptasi dari dan menunjukkan contoh di dalam ruangan, tetapi fenomena ini bersifat universal dan memiliki implikasi khusus dalam SLAM bawah air. Animasi yang menunjukkan struktur ketidakpastian sebelum dan sesudah penutupan loop.

Kepastian Hubungan Meskipun Ketidakpastian Posisi

Akumulasi kesalahan menyebabkan fenomena lain yang terlihat pada peta estimasi (Gambar 11.3b). Suatu area lokal biasanya dipetakan dengan cukup presisi karena ketidakpastiannya hanya dipengaruhi oleh pengamatan yang dilakukan di area tersebut, sedangkan posisi globalnya (dan orientasinya) dipengaruhi oleh akumulasi kesalahan dan jauh lebih tidak pasti. Hal ini telah disebut "Kepastian hubungan meskipun ketidakpastian posisi" oleh salah satu dari kami. Hal ini mengharuskan algoritma SLAM untuk merepresentasikan ketidakpastian lebih dari sekadar angka absolut, tetapi dengan sesuatu yang dapat merepresentasikan korelasi antar fitur, misalnya matriks kovarians, grafik hubungan, atau subpeta lokal.

Kümmerle. membahas observasi ini dalam makalah mereka "On measuring the accuracy of SLAM algorithms" dan mengusulkan bahwa evaluasi dalam SLAM tidak boleh didasarkan pada posisi absolut atau pose, melainkan pada relasi pose yang relevan untuk aplikasi yang memotivasi dataset dan yang untuknya dataset harus memberikan ground-truth. Kami ingin menekankan bahwa dengan memberikan ground-truth untuk beberapa relasi dan beberapa yang tidak, dataset menentukan prioritas. Misalnya, dataset dengan relasi ground-truth terhadap pose awal mendukung pengurangan akumulasi kesalahan, dataset dengan



relasi pada penutupan loop mendukung deteksi dan penanganan penutupan loop, sedangkan dataset dengan relasi antara pose jarak menengah mendukung akurasi peta lokal.

Sebagai contoh konkret, bayangkan sebuah AUV yang memelihara beberapa fasilitas bawah air. Pada akhirnya, AUV perlu melokalisasi dengan akurasi cm relatif terhadap fasilitas tersebut. AUV tidak akan mengetahui posisinya di bumi dengan akurasi yang sama, tetapi itu juga tidak diperlukan. Namun, untuk mencapainya, AUV akan mulai dari posisi GPS yang diketahui secara tepat di permukaan yang hanya diketahui secara kasar relatif terhadap fasilitas tersebut. Kemudian, ia akan terlokalisasi relatif terhadap berbagai fitur di sepanjang perjalanannya sehingga posisi absolutnya akan semakin buruk, tetapi posisi relatif terhadap fasilitasnya akan semakin baik. Contoh ini menunjukkan bahwa dalam SLAM, penting untuk merepresentasikan "kepastian relasi".

Penutupan Loop

Dengan mempertimbangkan kembali Gambar 11.3, robot kembali ke posisi awal, mengamati suatu fitur, dan mengidentifikasinya kembali sebagai fitur yang sama yang diamati sebelumnya (Gambar 11.3c). Karena kesalahan yang terakumulasi, hal ini tidak sesuai dengan estimasi peta saat ini yang perlu dikoreksi (Gambar 11.3d). Koreksi ini bukanlah sesuatu yang perlu diprogram secara eksplisit, melainkan muncul secara otomatis dari perlakuan yang tepat terhadap observasi dan ketidakpastiannya, misalnya dengan estimasi kuadrat terkecil menggunakan informasi bahwa suatu fitur diamati kembali.

Penutupan loop menghasilkan peningkatan yang signifikan pada peta (Gambar 11.3d). Peningkatan ini cenderung lebih besar jika fitur tersebut sudah lama tidak terlihat. Inilah sebabnya, misalnya, pola mesin pemotong rumput yang sering digunakan memiliki garis-garis yang tumpang tindih sehingga loop ditutup di antara garis-garis yang berdekatan.

Memodelkan Ketidakpastian Dalam Berbagai Bentuknya

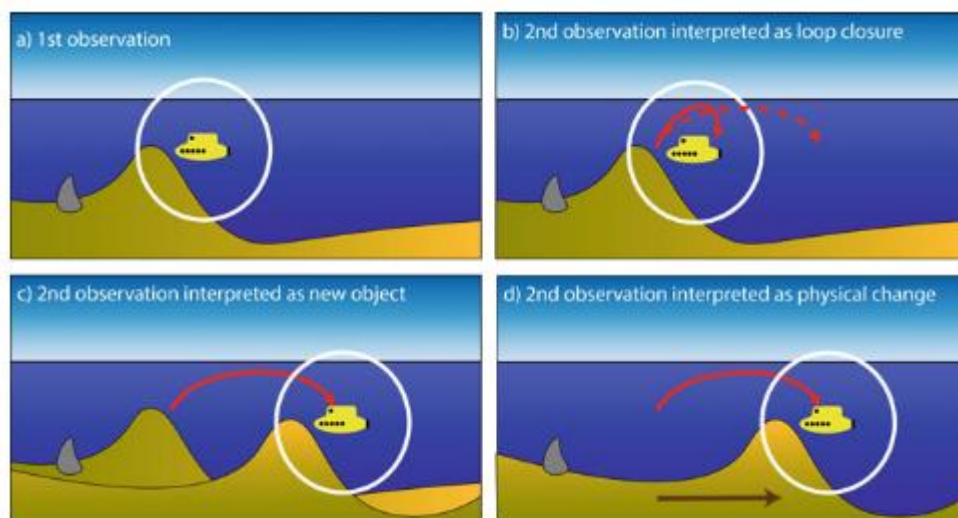
Penutupan loop bergantung pada identifikasi ulang yang tepat. Dalam SLAM bawah air, hal ini sangat sulit karena lingkungannya seringkali repetitif, terdapat fitur-fitur yang tidak dapat diandalkan seperti pergerakan tanaman atau ikan, kondisi pencahayaan yang menghambat pencocokan fitur, dan untuk peta yang lebih lama, lingkungannya dapat berubah. Dalam banyak algoritma SLAM, membuat keputusan asosiasi data yang salah akan merusak peta sepenuhnya karena memaksa dua titik berbeda pada peta menjadi sama. Hal ini dapat dibayangkan sebagai peta kertas dengan kedua titik tersebut direkatkan. Gambar 11.3e menunjukkan situasi ini: Fitur yang diamati dapat berupa fitur dari awal yang mengarah ke peta Gambar 11.3d, atau fitur lain yang diketahui yang mengarah ke peta pada Gambar 11.3f, atau fitur yang sama sekali baru tanpa loop tertutup (Gambar 11.3e).

Menghadapi tantangan ini, kami ingin mengusulkan untuk memodelkan ketidakpastian dalam asosiasi data juga secara probabilistik, sehingga tidak pernah diputuskan secara final tetapi dapat direvisi ketika muncul bukti yang bertentangan. Jika diasumsikan asosiasi data bersifat acak dengan masing-masing dari tiga opsi yang disebutkan memiliki probabilitas tertentu, hasilnya adalah distribusi campuran dengan setiap opsi asosiasi data mengarah ke satu komponen campuran. Distribusi ini merupakan kombinasi yang menarik dan sulit ditangani antara ketidakpastian diskrit (asosiasi data) dan kontinu (derau). Dalam praktiknya,



interpretasi lain pun muncul. Lingkungan mungkin telah berubah dan fitur tersebut bergerak. Meskipun kemungkinan ini universal, bentuk konkret dari perubahan lingkungan yang (tidak) mungkin sangat bergantung pada lingkungan. Dalam pengaturan dalam ruangan, sebagian besar perubahan disebabkan oleh objek yang bergerak, misalnya furnitur atau orang. Perubahan lingkungan di bawah air mungkin lebih halus dan kontinu, misalnya pasir yang hanyut.

Perubahan lingkungan semacam itu mungkin juga menjadi minat ilmiah khusus untuk misi sains kelautan, sehingga penting untuk dimodelkan dan dibedakan dari akumulasi kesalahan murni. Kami menginginkan algoritma SLAM untuk memutuskan (namun tidak pernah final) apakah suatu hal merupakan fitur yang diketahui, fitur baru, atau perubahan lingkungan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 11.4 Hal ini tidak hanya membutuhkan penanganan distribusi atas berbagai kemungkinan, kemungkinannya, peta yang dihasilkan, dan ketidakpastiannya, tetapi juga model yang akurat tentang jenis perubahan apa yang mungkin terjadi atau kemungkinan besar terjadi.



Gambar 11.4 Ilustrasi berbagai interpretasi observasi. *a* AUV pertama-tama mengamati beberapa fitur lokal (lingkaran putih). *b–d* Kemudian, AUV melakukan perjalanan yang lebih jauh di mana kesalahan terakumulasi dan mengamati fitur yang serupa. Terdapat tiga interpretasi berbeda: *b* Ini adalah fitur yang sama yang terlihat sebelumnya, *c* Ini adalah fitur baru yang tampak serupa, atau *d* Fitur tersebut telah berpindah karena perubahan lingkungan. Ketidakpastian diskret ini memunculkan distribusi multi-moda peta posterior.

Skema Evaluasi yang Berbeda untuk Keandalan yang Lebih Baik

Ada tantangan penting lain di mana ketidakpastian pemodelan menjadi penting, yaitu tantangan keandalan. Semua sistem SLAM yang disajikan di bagian "Tantangan dan Keadaan Terkini dalam Visi Bawah Air" telah dijalankan pada set data yang terekam. Satu-satunya misi yang kami ketahui, di mana SLAM visual benar-benar mengendalikan AUV, adalah dalam lingkungan uji yang terkontrol atau kontes seperti SAUC-E.1 SLAM visual adalah teknologi yang rapuh dan dapat gagal karena berbagai alasan yang telah disebutkan sebelumnya. Penggunaan



teknologi ini untuk pengendalian berisiko tinggi terhadap kegagalan misi atau bahkan hilangnya AUV. Di sisi lain, navigasi visual memungkinkan skenario di mana sensor akustik tidak memadai, seperti di medan yang kompleks.

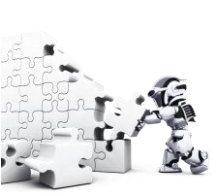
Oleh karena itu, sangat penting bagi sistem SLAM untuk melaporkan statusnya sendiri. Meskipun banyak backend SLAM sebenarnya menyediakan informasi ketidakpastian, misalnya matriks kovariansi untuk EKF, hal ini didasarkan pada banyak asumsi, antara lain asosiasi data yang benar, parameter derau pengukuran yang konservatif, independensi antar pengukuran, dan linearisasi yang memadai. Jadi, backend tersebut hanya benar ketika "semuanya berjalan dengan baik" dan tidak andal dalam kasus-kasus bermasalah. Sangat sedikit, misalnya yang mendeteksi kegagalan. Sebaliknya, batas kovariansi yang terlalu yakin merupakan sumber utama kegagalan SLAM karena dalam kasus seperti itu, pengukuran yang benar tidak lagi diterima oleh algoritma SLAM karena tampak tidak masuk akal.

Lebih lanjut, metodologi evaluasi saat ini tidak membahas masalah ini. Evaluasi biasanya mengukur rata-rata atau kesalahan posisi absolut akhir dan menghitung dataset mana yang menyimpang. Evaluasi tidak mempertimbangkan keluaran ketidakpastian dari sistem SLAM. Sebaliknya, kami mengusulkan bahwa sistem SLAM harus selalu mengetahui seberapa yakin ia mengetahui hubungan spasial antara dua fitur lingkungan atau pose robot dan harus memberikan informasi ini kepada modul perencanaan dan kendali misi superordinat. Untuk evaluasi, "skor kinerja" seharusnya bukan kesalahan aktual dalam suatu hubungan, tetapi batas kesalahan yang diestimasi sistem harus dipertimbangkan. Alasannya adalah bahwa kendali misi hanya dapat bergantung pada batas tersebut dan bukan pada kesalahan aktual, karena tidak diketahui. Ketika kesalahan aktual melebihi batas yang diberikan (dalam hal informasi kovariansi dalam arti statistik), hal ini harus dianggap sebagai kegagalan sistem SLAM yang jauh lebih parah daripada bagaimana divergensi pada dataset saat ini dihitung.

Kami percaya bahwa skema evaluasi semacam itu akan mengarah pada algoritma yang memberikan batas dan mempertahankan batasnya, dan khususnya mencoba memberikan batas konservatif bahkan ketika batas tersebut tidak sepenuhnya berfungsi seperti yang diharapkan.

Kesimpulan

Dalam kontribusi ini, kami telah membahas isu-isu umum navigasi bawah air dan bagaimana informasi visual dapat membantu. Karena bahkan saat ini SLAM bawah air di lautan biasanya hanya beroperasi pada data luring, kami membahas isu-isu utama yang membuat penglihatan di lautan jauh lebih menantang daripada di darat. Menurut pendapat kami, khususnya penanganan ketidakpastian merupakan isu krusial, dan setelah menjelaskan prinsip-prinsip dasar SLAM terkait ketidakpastian, kami telah merumuskan saran bagaimana penanganan ketidakpastian yang berbeda dapat membantu meningkatkan SLAM visual bawah air. Gagasan-gagasan ini harus dilihat sebagai konsep awal yang masih harus dibuktikan.



BAB 12

PEMETAAN & NAVIGASI BAWAH AIR MULTIMODA

Navigasi otonom di bawah air, di mana informasi apriori tentang lingkungan terbatas dan perubahan kondisi lingkungan mempersulit persepsi, membutuhkan kemampuan penginderaan yang tangguh serta strategi pemrosesan sinyal yang canggih. Multimodalitas dalam penginderaan serta pemrosesan data dianggap sebagai pendekatan untuk memperkuat kekokohan pengambilan keputusan bagi robot bawah air otonom. Bab ini merangkum perkembangan terkini dalam teknologi penginderaan dan membuka pertanyaan penelitian baru terkait penginderaan dan pemrosesan sinyal menggunakan pendekatan pembelajaran mesin.

12.1 PENDAHULUAN

Sistem otonom memperoleh banyak kemampuannya dari masukan sensorik yang memungkinkan mereka menilai situasi lingkungan terkini serta kondisi internalnya. Tanpa masukan yang tepat dan andal, keputusan berdasarkan informasi sensor dapat berakibat fatal bagi sistem otonom. Pengamatan ini berlaku untuk semua sistem robotik; baik itu mobil otonom, robot humanoid, maupun robot bawah air. Mengingat pentingnya pengaruh lingkungan, sensor perlu dipilih secara cermat dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan sekitar yang diharapkan, di mana sistem diharapkan beroperasi dengan andal. Sensor optik, termasuk kamera dan LIDAR, merupakan sensor yang paling umum digunakan dalam sistem otonom.

Kemudahan penggunaannya yang relatif, biaya rendah, dan jangkauan aplikasinya yang luas, termasuk fleksibilitas penggunaan pencahayaan buatan dan alami, menjadikannya inti dari sebagian besar sistem robotik terestrial dan udara. Ranah bawah air merupakan tantangan tersendiri bagi sistem optik dan membatasi penggunaannya karena tingkat penyerapan yang tinggi pada spektrum elektromagnetik cahaya tampak dan adanya kekeruhan. Meskipun beberapa batasan untuk sensor optik, seperti kamera, dapat dinilai dan diperhitungkan, batasan lainnya seperti tingkat kekeruhan yang tinggi lebih sulit dan terkadang mustahil diatasi dengan sistem optik. Untuk meningkatkan keandalan dalam penginderaan, modalitas lain, seperti akustik, perlu diintegrasikan dan keluarannya perlu diselaraskan. Pendekatan ini memungkinkan untuk mengetahui apakah suatu sensor saat ini tidak beroperasi dengan baik berdasarkan kondisi lingkungan yang memengaruhi prinsip pengukurannya, dan selanjutnya meningkatkan kualitas pengukuran.

Gagasan menggabungkan berbagai prinsip pengukuran untuk menilai sifat lingkungan atau kondisi internal sistem otonom disebut penginderaan multimoda. Dengan munculnya aplikasi baru untuk AUV yang membutuhkan navigasi di lingkungan terbatas serta kemampuan interaksi, penginderaan multimoda menjadi semakin penting dalam domain ini. Bagian berikut membahas persyaratan penginderaan multimoda di lingkungan bawah air untuk pemetaan dan navigasi yang aman bagi robot bawah air.



12.2 ARAH PENGEMBANGAN SISTEM BAWAH LAUT OTONOM

Salah satu skenario aplikasi utama untuk robot bawah air otonom adalah pemetaan area dasar laut atau kolom air. Data keluaran digunakan untuk penelitian di lautan kita, pemasangan fasilitas produksi bawah air, atau dalam misi pencarian dan penyelamatan. Selama operasi survei ini, kendaraan beroperasi pada jarak aman dari dasar laut untuk menghindari rintangan yang memerlukan penyimpangan dari jalur yang telah diprogram sebelumnya. Sensor yang digunakan untuk navigasi adalah sensor inersia seperti giroskop serat optik (FOG), log kecepatan Doppler (DVL) yang mengukur kecepatan di atas permukaan tanah atau di kolom air, dan sistem berbasis sonar untuk penentuan posisi dalam serangkaian transduser akustik (LBS atau USBL).

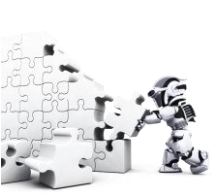
Operasi di lingkungan terbatas di dekat dasar laut sebagian besar masih dilakukan dengan menggunakan kendaraan yang dioperasikan dari jarak jauh (ROV) yang dikendalikan dari kapal pasokan di permukaan laut oleh operator untuk mengemudikan kendaraan dan melakukan tugas manipulasi. Pengurangan biaya dan kemajuan teknologi telah mendorong pengembangan konsep residensi bawah laut untuk kendaraan bawah laut otonom. Konsep baru ini membutuhkan stasiun dok bawah air di dekat area operasi untuk robot bawah laut otonom, tempat sistem dapat bertukar data dan mengisi ulang daya.

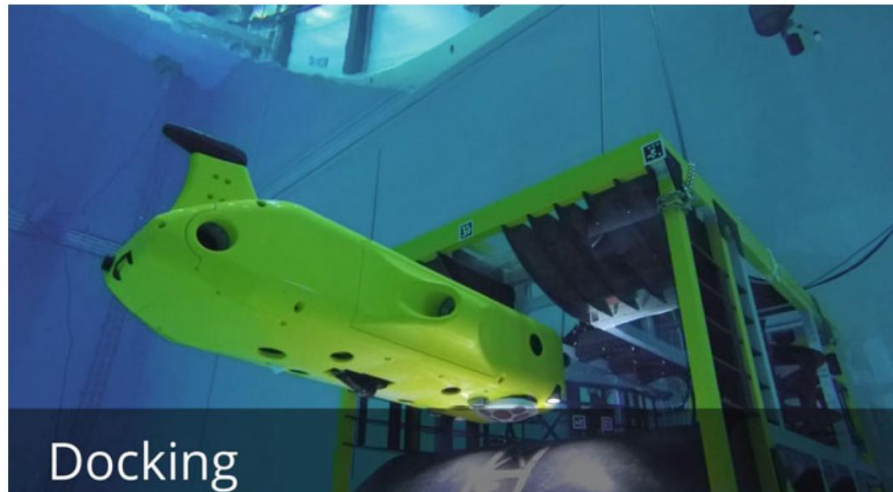
Dengan demikian, kapal yang selalu berada di area operasi tidak lagi diperlukan, sehingga mengurangi biaya sekaligus meningkatkan intensitas operasi. Tugas yang seharusnya dilakukan oleh robot otonom residensi bawah laut tersebut adalah beroperasi di dalam fasilitas produksi bawah laut untuk mengukur, misalnya, kondisi tali jangkar, perangkat proteksi katodik, atau berinteraksi dengan panel kontrol yang terpasang pada struktur aset untuk mengendalikan katup, pompa, dan perangkat lainnya di atau dekat dasar laut.

12.3 KONDISI LINGKUNGAN UNTUK KENDARAAN RESIDENSI BAWAH LAUT

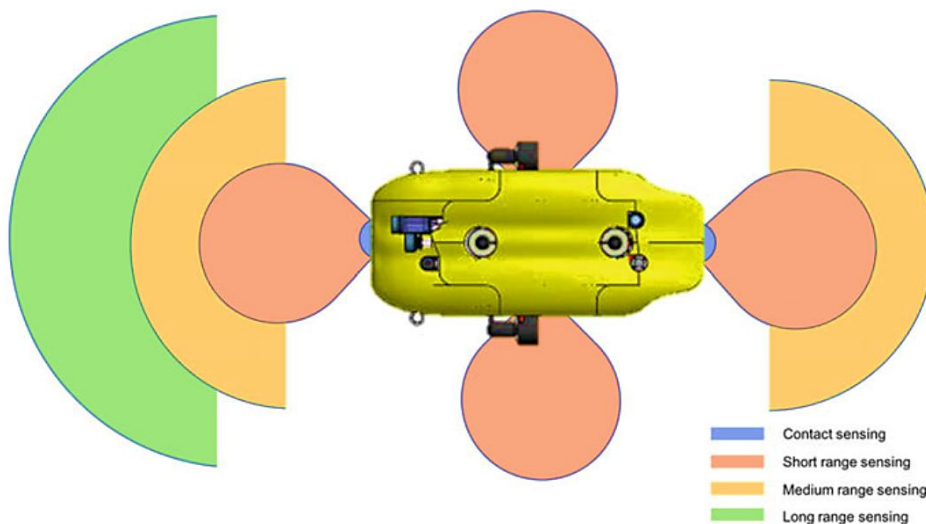
Perbedaan mendasar antara operasi residensi bawah laut dan operasi dari kapal pendukung adalah persyaratan untuk masuk atau terhubung ke stasiun dok. Karena dok juga memungkinkan pengisian ulang daya kendaraan, proses ini krusial untuk keselamatan pengoperasian kendaraan. Beberapa kegiatan penelitian saat ini sedang diarahkan untuk pengembangan AUV residensi bawah laut. Sebagian besar AUV yang dikembangkan menggunakan kamera yang dikombinasikan dengan penanda visual (lihat Gambar 12.1) atau sumber cahaya buatan, atau kombinasi kamera dan USBL untuk docking.

Tergantung pada lokasi area operasional, perubahan arus atau keterbatasan visibilitas harus dipertimbangkan, yang membutuhkan kemampuan manuver yang tinggi serta penginderaan yang kuat untuk mendeteksi antarmuka docking. Karena visibilitas berpotensi berubah, modalitas penginderaan lebih lanjut sangat penting untuk tugas ini. Gambar 12.1 dan 12.2 menunjukkan prosedur docking untuk kendaraan bawah air otonom dalam kondisi laboratorium.





Gambar 12.1 AUV Flatfish, penghuni bawah laut, saat berlabuh di lingkungan laboratorium



Gambar 12.2 Penginderaan lingkungan multimoda untuk misi otonom jangka panjang

12.4 TEKNOLOGI SENSOR

Sementara mencari prinsip pengukuran lebih lanjut selain sensor optik, penginderaan berbasis suara paling sering digunakan. Gelombang akustik merambat sekitar 5 kali lebih cepat di air daripada di udara dan, tergantung pada frekuensinya, dapat digunakan untuk pengukuran jarak pendek (>1 MHz) serta jarak yang sangat jauh yang mencakup cekungan samudra (<300 Hz). Sayangnya, seperti halnya indra penglihatan, kondisi lingkungan seperti clutter atau perubahan sifat air di kolom air dapat memengaruhi kinerja sensor.

Namun, modalitas lain seperti penginderaan magnetik, induktif, dan kapasitif telah menunjukkan hasil yang sangat menjanjikan untuk penginderaan jarak pendek dan, dalam kondisi ideal, jarak menengah. Penelitian Boyer. mengusulkan elemen penginderaan listrik pasif pada AUV yang dikombinasikan dengan penanda listrik aktif pada struktur untuk navigasi jarak pendek. Para penulis mengusulkan konsep stasiun dok, di mana medan listrik dibentuk dengan menggunakan dinding isolasi menuju elektroda emitor tunggal yang terletak di



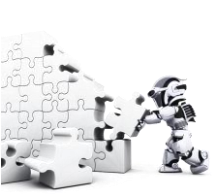
konektor dok. AUV yang dilengkapi dengan elektroda penginderaan pasif harus dikontrol untuk mengikuti garis medan listrik yang dipancarkan.

Simulasi suspensi yang tidak homogen menunjukkan bahwa hukum kendali yang diterapkan untuk dok berdasarkan modalitas penginderaan ini masih berfungsi dengan baik. Solusi yang diusulkan dievaluasi di kolam uji menggunakan sistem AUV kecil. Kekurangan dari pendekatan ini adalah sensitivitas terhadap struktur yang memancarkan medan listrik sendiri yang berada di dekat area dok. Konsentrasi partikel yang tidak homogen di kolom air juga memengaruhi pengukuran. Data tentang jangkauan solusi ini serta presisi lokalisasi tidak disediakan. Pengaturan sensor medan magnet untuk melacak kabel bawah laut dengan AUV menggunakan dua magnetometer pasif triaksial yang terpasang pada AUV. Untuk aplikasi dalam pelacakan kabel, pengaturan ini memerlukan pembangkitan sinyal arus frekuensi rendah pada kabel yang akan dilacak.

Penggunaan sonar pemindaian mekanis untuk memetakan bagian bawah gunung es di Atlantik. Dan menggunakan glider Slocum yang dilengkapi dengan sonar yang sesuai, pendekatan pemetaan mereka dievaluasi dalam simulasi dan dalam eksperimen nyata di dekat Newfoundland. Gunung es bawah laut dipantau dari jarak 40 m. Data yang diperoleh digunakan sebagai masukan ke pengontrol profil-following yang memungkinkan kendaraan untuk mengelilingi gunung es yang dipantau dengan aman tanpa tabrakan.

Pendekatan menarik untuk meningkatkan kualitas persepsi lingkungan melalui fusi data sensor disajikan dalam Kragh dan Underwood. Para penulis menerapkan segmentasi semantik pada modalitas penginderaan seperti kamera dan lidar untuk mendeteksi hambatan dalam skenario aplikasi pertanian. Penggunaan pendekatan mereka yang mencakup tautan spasial, multimoda, serta temporal memungkinkan mereka untuk meningkatkan kemampuan klasifikasi serta informasi traversabilitas untuk kendaraan darat otonom. Selain teknologi penginderaan itu sendiri dan kemampuan fusi sensor daring, informasi jarang yang tersedia dari robot bawah air di lautan merupakan syarat krusial untuk penerapan algoritma pembelajaran mesin. Oleh karena itu, logis untuk mengeksplorasi opsi algoritmik yang memanfaatkan informasi jarang dari data sensor untuk menghasilkan ekspektasi untuk situasi tertentu atau bekerja dengan pendekatan transfer serta generalisasi.

Para penulis dalam Rao. menyajikan arsitektur algoritma pembelajaran mesin untuk menghasilkan hubungan antara data kamera dari kendaraan bawah air otonom dan informasi batimetri yang diindra jarak jauh berdasarkan data akustik. Algoritma awal digunakan untuk mempelajari fitur secara independen untuk setiap modalitas, model gerbang konsektif selanjutnya meningkatkan akurasi klasifikasi dan dapat digunakan untuk memprediksi fitur visual yang dapat diharapkan murni berdasarkan informasi akustik. Pendekatan lain berfokus pada isu bahwa beberapa sensor lebih rentan terhadap kesalahan dalam kondisi tertentu (misalnya pencahayaan, partikel mengambang) atau lebih terpengaruh oleh derau sensor akibat perubahan kondisi dibandingkan yang lain, yang telah dibahas dalam penelitian kami sebelumnya. Dalam konteks deteksi objek, kami mengusulkan pendekatan baru yang mampu memberi bobot pada prediksi berbagai modalitas sensor secara daring.



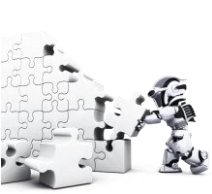
Arsitektur jaringan saraf konvolusional (CNN) dalam yang spesifik dikembangkan dengan memanfaatkan skema fusi akhir. Tiga CNN yang berbeda dilatih untuk tugas deteksi objek menggunakan data RGB, kedalaman, dan aliran optik. Fitur yang diekstraksi dari ketiga pakar ini kemudian digunakan untuk melatih campuran pakar dalam (MoDE). MoDE direpresentasikan oleh jaringan gating yang mempelajari cara memberi bobot pada keluaran pakar berdasarkan fitur tingkat tinggi yang diekstraksi. Telah ditunjukkan bahwa jaringan dapat beradaptasi dengan perubahan spontan dalam kondisi pencahayaan, yaitu, dalam lingkungan gelap, jaringan gating secara otomatis memberi bobot pada prediksi yang diperoleh dari data kedalaman lebih kuat daripada prediksi dari data RGB.

12.5 PENDEKATAN PENGEMBANGAN YANG DIBAYANGKAN

Sensor dan model yang sesuai untuk pengambilan keputusan daring pada tingkat kognitif deliberatif bagi robot otonom merupakan elemen kunci bagi sistem robotik masa depan. Untuk mencapai tujuan tersebut, kami akan mengkaji berbagai pendekatan untuk mengidentifikasi modalitas penginderaan yang diperlukan agar suatu tugas berhasil diselesaikan, serta berbagai pendekatan untuk mengatasi ketidakpastian dalam pengambilan keputusan berdasarkan data sensor yang salah dan informasi apriori yang jarang.

Salah satu kesulitan yang muncul dari meluasnya penggunaan jaringan saraf tiruan dalam (DNN) adalah bahwa jaringan tersebut diketahui menghasilkan prediksi yang tidak menentu dan tidak aman ketika dihadapkan dengan masukan baru. Seiring upaya kami untuk menciptakan agen otonom yang aman dan andal, kami tertarik pada kepastian keputusan jaringan. Oleh karena itu, menginterpretasikan hasil dari kerangka kerja pembelajaran mendalam secara probabilistik akan menguntungkan. Dalam penelitian kami sebelumnya tentang fusi sensor, kami telah menunjukkan bahwa jaringan saraf tiruan dapat dilatih untuk memberi bobot pada beberapa modalitas berdasarkan keandalannya. Namun, pendekatan ini hanya menghasilkan kombinasi sensor yang paling mungkin dan tidak memberikan indikasi apa pun tentang distribusi probabilitas dan, khususnya, tentang ketidakpastian hasilnya.

Dalam pengembangan lebih lanjut, kami bertujuan untuk menggunakan metodologi yang menghasilkan interpretasi probabilistik dari kepastian jaringan atas saluran informasi individual. Jaringan saraf seperti itu, yang mempertimbangkan ketidakpastian, dikenal sebagai jaringan saraf Bayesian. Hubungan teoretis antara putus sekolah dan inferensi perkiraan dalam proses Gaussian. Namun, dalam penggunaan lapisan putus setelah setiap lapisan konvolusional terlalu menghambat kinerja CNN karena regularisasi hasilnya terlalu kuat. Menurut mereka, cukup menambahkan lapisan putus sekolah setelah setiap lapisan yang diinisialisasi secara acak. Pada waktu pengujian, inferensi dilakukan dengan merata-ratakan sampel stokastik dari jaringan putus sekolah. Hal ini menghasilkan tantangan komputasi, yang kami rencanakan untuk diatasi dalam proyek ini misalnya. dengan hanya mengambil sampel lapisan akhir jaringan. Dengan demikian, kami berencana untuk memperluas kerangka kerja fusi sensor yang disajikan dalam untuk tidak hanya menerima klasifikasi akhir CNN, tetapi juga kepastian tentang keputusan oleh jaringan.



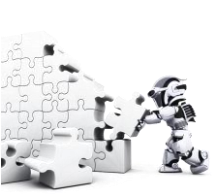
Arah penelitian lebih lanjut yang layak dicermati lebih dekat untuk fusi data sensor dalam skenario aplikasi bawah air adalah penggunaan pengetahuan domain seperti hukum fisika yang diketahui untuk mengurangi kebutuhan pelatihan berlabel dalam algoritma pembelajaran mesin. Pendekatan ini mengurangi ruang pencarian untuk algoritma pembelajaran mesin dan berpotensi menghasilkan umpan balik yang kuat. Manajemen data sensor adalah disiplin ilmu di mana modalitas penginderaan dipilih sebagai masukan untuk fusi data sensor berdasarkan biaya penggunaannya serta penerapannya pada situasi saat ini. Meskipun pendekatan ini sebagian besar digunakan untuk parameter sensor yang berbeda, pendekatan di mana sensor multimoda ditangani juga diselidiki. Dalam banyak kasus, ide-ide ini digunakan dalam sistem stasioner, dalam konteks penginderaan multimoda untuk robotika bawah air, pendekatan ini merupakan dasar yang menarik untuk adaptasi ke robot bergerak otonom.

Kesimpulan

Sensor akustik dan optik merupakan modalitas sensor yang dominan untuk navigasi kendaraan bawah air otonom. Dengan memasuki ruang dan struktur terbatas serta konsep aplikasi baru seperti hunian bawah laut, modalitas penginderaan lebih lanjut perlu dievaluasi untuk mencapai operasi yang andal dan aman di lingkungan kritis. Beberapa kegiatan penelitian yang menggunakan prinsip pengukuran selain yang disebutkan sebelumnya telah dipresentasikan dan didiskusikan. Jelas bahwa semua prinsip ini memiliki kekurangan dalam situasi lingkungan tertentu, yang membuatnya semakin penting untuk mewujudkan sistem sensor multi-moda yang mencakup penilaian fungsionalitas pendekatan pengukuran tertentu. Manfaat lain dari pengaturan multi-moda adalah potensi peningkatan akurasi atau ketahanan yang dihasilkan dari kombinasi informasi sensor.

Penanganan pendekatan ini membutuhkan pengetahuan domain yang memadai dan pemilihan pendekatan fusi sensor yang sesuai, tergantung pada situasi misi saat ini. Solusi dari domain aplikasi lain dengan tantangan serupa perlu diselidiki. Pendekatan yang menjanjikan didasarkan pada Jaringan Saraf Tiruan Konvolusional. Tugas selanjutnya adalah penilaian kuantitatif terhadap teknologi yang tersedia dan yang disajikan terkait kemampuannya untuk menentukan lokasi objek secara tepat berdasarkan jarak pemancar dan penerima. Karya penelitian yang disajikan sebagian besar menyajikan kelayakan teknologi itu sendiri, tetapi belum mencakup ukuran kinerja jarak dan presisi yang sebenarnya.

Pekerjaan tambahan perlu dilakukan untuk mengevaluasi prinsip-prinsip pengukuran lebih lanjut. Dengan mempelajari kurva redaman cahaya, suara, atau gelombang elektromagnetik, beberapa rentang frekuensi layak untuk dikaji lebih lanjut mengenai penerapan teknologi penginderaan baru. Tujuannya adalah untuk dapat mengidentifikasi peralatan sensor yang sesuai untuk AUV bawah laut otonom jangka panjang yang andal, baik untuk rentang penginderaan yang berbeda maupun untuk menilai tingkat kepercayaan terhadap masing-masing teknologi penginderaan



BAB 13

KERANGKA KERJA SIMULASI UNTUK INTERVENSI BAWAH AIR

Pada bab ini membahas aspek-aspek potensi pemanfaatan dinamika fluida komputasional (CFD) dalam konteks robotika bawah air. Meskipun CFD merupakan bidang penelitian interdisipliner, pada bab ini secara eksklusif membahas peran penelitian ilmu komputer (CS) dengan fokus pada CFD. Oleh karena itu, kontribusi teladan dari kelompok penelitian CS yang diketuai oleh para penulis dibahas. Penerapan industri dari penelitian sebelumnya dijelaskan secara singkat. Terakhir, tantangan dan pertanyaan penelitian terbuka terhadap kerangka kerja simulasi untuk analisis dan pelatihan intervensi bawah air diuraikan. Skenario aplikasi potensial untuk simulasi CFD di bidang robotika bawah air diuraikan di seluruh naskah.

Manfaat Dinamika Fluida Komputasi

CFD banyak digunakan untuk mendukung dan mempercepat proses pengembangan, misalnya, sistem aeronautika atau otomotif. Salah satu aplikasi utamanya adalah pengurangan ruang desain sistem pada tahap pengembangan awal untuk mengurangi kebutuhan eksperimen yang memakan waktu dan mahal. Pada tahap pengembangan selanjutnya, CFD digunakan sebagai alat pelengkap. Sementara eksperimen nyata dilakukan untuk mengoptimalkan parameter desain, CFD digunakan untuk mengevaluasi pengaturan yang, misalnya, terlalu rumit atau terlalu berbahaya untuk eksperimen nyata. Terakhir, pada tahap pengembangan akhir, CFD dapat membantu menilai dampak perubahan inkremental pada sistem yang sudah ada (lihat contoh).

13.1 RISET ILMU KOMPUTER UNTUK CFD

CFD merupakan bidang riset interdisipliner yang menggabungkan kontribusi dari mekanika fluida, analisis numerik, dan ilmu komputer (CS). Khususnya, riset CS berkontribusi pada implementasi skema numerik berkinerja tinggi untuk beragam arsitektur komputasi. Hal ini terutama mencakup paralelisasi, vektorisasi, dan penyeimbangan beban untuk lingkungan perangkat keras dengan arsitektur SMP/MPI/GPU. Contoh kontribusi lainnya adalah rekayasa perangkat lunak, verifikasi kode, pra- dan pasca-pemrosesan, khususnya penggabungan batas-batas geometris yang kompleks, dan visualisasi kumpulan data besar.

Pendekatan CFD terkemuka dengan berbagai kontribusi CS adalah Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Dalam survei SPH tahun 2012, Monaghan menyatakan lima tantangan penting, dua di antaranya terkait dengan numerik dan pemodelan, yaitu derau dan turbulensi, sementara tiga tantangan lainnya dapat diuntungkan dari riset CS, yaitu performa, resolusi adaptif, dan penanganan batas untuk fluida multifase dalam 3D. Saat ini, kombinasi solusi CS dengan pencarian tetangga mutakhir, penanganan batas serbaguna untuk batas-batas yang kompleks secara geometris, dan pemecah Poisson bebas matriks memungkinkan simulasi skenario SPH tak termampatkan 3D dengan geometri batas kompleks yang terdiri dari hingga



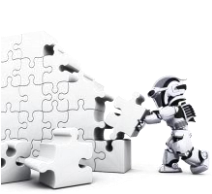
5,0 · 10⁸ sampel pada satu PC. Resolusi adaptif telah dibahas, misalnya, dalam dan penanganan batas 3D dengan fluida multifase telah ditunjukkan dalam.

Meskipun penelitian CS membahas berbagai aspek yang relevan untuk solusi CFD, keterkaitan antara penelitian CFD dan CS belum optimal yang tampaknya sebagian disebabkan oleh perbedaan budaya. Peninjau sejawat dalam CFD dan CS mengevaluasi kriteria yang berbeda yang tercermin dalam pendekatan yang berbeda untuk menulis publikasi. Dari perspektif CS, peningkatan interkoneksi CS dengan CFD dan juga dengan evaluasi eksperimental merupakan aspek kunci untuk keberhasilan penelitian dan pengembangan menuju kerangka kerja simulasi untuk analisis dan pelatihan intervensi bawah air.

Penulis membahas secara singkat kontribusi sebelumnya dan beberapa penelitian terkait di bidang fluida SPH. Pendekatan-pendekatan ini merupakan dasar bagi tantangan menuju kerangka kerja simulasi untuk analisis dan pelatihan intervensi bawah air yang diuraikan dalam bagian "Menuju Kerangka Kerja Simulasi untuk Intervensi Bawah Air". Pencarian tetangga umumnya dianggap sebagai hambatan kinerja utama dalam konsep CFD Lagrangian. Tetangga, yaitu sampel yang berdekatan yang diperlukan dalam komputasi, berubah seiring waktu dan harus disimpan jika pemecah tekanan iteratif digunakan, misalnya untuk SPH tak termampatkan. Daftar Verlet merupakan konsep yang sangat populer untuk mencari tetangga. Meskipun konsep ini telah diusulkan lebih dari lima puluh tahun yang lalu, konsep ini masih dipertimbangkan dalam implementasi CFD saat ini, misalnya.

Namun, masalah utama daftar Verlet adalah konsumsi memori struktur data sekunder yang dibangun untuk mempercepat pembaruan daftar tetangga yang sering. Untuk mengatasi masalah ini, berbagai alternatif berdasarkan daftar terurut dan tabel hash dengan kebutuhan memori yang berkurang telah diusulkan dan dianalisis, misalnya. Varian pencarian tetangga ini memungkinkan pemrosesan sejumlah besar sampel SPH pada satu PC dan skenario dengan hingga 500 juta sampel telah dihitung. Hambatan kinerja kedua dalam SPH tak termampatkan adalah perhitungan tekanan yang memerlukan penyelesaian bentuk diskritisasi dari persamaan Poisson Tekanan (PPE), yaitu sistem linear. Pemecah PPE standar biasanya bekerja dengan representasi matriks jarang yang efisien memori yang mengodekan operator Laplacian.

Namun, untuk sejumlah besar sampel, konsumsi memori sangat besar. Selain itu, implementasi MPI dari pemecah PPE yang menggunakan representasi matriks jarang dapat menjadi tantangan. Untuk mengatasi masalah ini, implementasi PPE bebas matriks telah diusulkan, misalnya. Bergantung pada pemecahnya, implementasi ini tidak memerlukan gagasan eksplisit tentang elemen matriks. Paling banyak, elemen diagonal harus diketahui untuk pemecah gaya Jacobi. Representasi matriks renggang tidak diperlukan dan hanya sedikit nilai tambahan yang disimpan per sampel fluida dalam implementasi penyelesai PPE. Implementasi MPI bersifat langsung, sementara jumlah sampel yang sudah besar dapat diproses pada satu PC. Skenario 500 juta sampel yang disebutkan di atas menunjukkan simulasi SPH tak termampatkan, di mana PPE telah diselesaikan dengan cara bebas matriks. Dalam penelitian lanjutan, PPE juga menggabungkan sampel batas, yaitu PPE tidak hanya menghitung



tekanan untuk sampel fluida, tetapi juga untuk sampel batas. Hal ini menghindari metode perkiraan seperti pencerminan tekanan atau ekstrapolasi tekanan pada sampel batas.

Penanganan batas adalah salah satu topik terpenting untuk kualitas simulasi yang dibahas oleh berbagai kontribusi CS. Misalnya, menunjukkan bahwa representasi batas multi-lapis yang biasanya digunakan dengan sampel berukuran seragam dapat digantikan oleh satu lapisan dengan sampel berukuran bervariasi. Ini secara signifikan menyederhanakan pengambilan sampel batas, yaitu pra-pemrosesan geometri batas yang biasanya mahal. Lebih lanjut, geometri batas sembarangan dari dimensi apa pun dapat ditangani. Bahkan batas yang berpotongan yang bergerak relatif satu sama lain selama simulasi dapat ditangani. Salah satu contoh menonjol adalah pergerakan wiper pada kaca depan. Ide menarik lainnya telah diusulkan dalam, di mana tekanan batas dihitung dengan sangat efisien oleh pemecah PPE bebas matriks.

Konsep alternatif lainnya adalah kombinasi pemecah fluida SPH dengan penanganan batas Moving Least Squares (MLS). SPH lebih efisien daripada MLS untuk bagian dalam fluida, tetapi MLS dapat lebih akurat daripada SPH pada batas dengan kekurangan pengambilan sampel. Derau skala-panjang-pendek merupakan masalah SPH umum yang berdampak negatif pada kualitas simulasi. Dua konsep yang mengatasi masalah ini adalah koreksi kernel, misalnya, dan pergeseran partikel, misalnya. Strategi alternatifnya adalah kombinasi dua pemecah PPE. Satu pemecah PPE menggunakan divergensi kecepatan yang diprediksi sebagai suku sumber. Pemecah ini menghitung medan kecepatan. Pemecah PPE kedua menggunakan deviasi densitas yang diprediksi sebagai suku sumber. Pemecah kedua ini tidak memengaruhi medan kecepatan yang telah dihitung sebelumnya, tetapi menghitung posisi sampel yang diperbarui untuk menghindari pergeseran volume yang akan terjadi jika hanya pemecah divergensi kecepatan yang digunakan.

Pemecah kedua merealisasikan pergeseran partikel, yaitu pengambilan sampel ulang medan kecepatan yang telah dihitung dalam penyelesaian PPE pertama. Pemecah PPE kedua sangat efisien dengan jumlah iterasi yang ditentukan pengguna yang sangat rendah, biasanya satu hingga dua. Berbeda dengan metode pergeseran partikel alternatif, parameter penskalaan yang ditentukan pengguna tidak diperlukan. Selain topik-topik utama yang dibahas di atas, CS juga berkontribusi pada rekonstruksi antarmuka, misalnya dan rendering, misalnya. Pemecah SPH efisien baru untuk berbagai bahan telah diusulkan, misalnya untuk bahan granular, cairan yang sangat kental, padatan elastis, dan benda kaku. Pemecah SPH terpadu yang menangani cairan yang berinteraksi, cairan yang sangat kental, padatan elastis dan kaku telah diusulkan. Efisiensi pemecah untuk cairan yang sangat kental dan padatan elastis telah ditingkatkan dengan formulasi implisit baru. Interaksi fluida-kaku yang kuat dan kopling kaku-kaku baru berdasarkan SPH telah diusulkan dalam.

Relevansi Industri

Gabungan upaya CFD dan CS selama beberapa tahun terakhir telah menghasilkan solusi baru yang dipasarkan oleh FIFTY2 Technology, perusahaan spin-off dari Universitas Freiburg, sejak tahun 2015. FIFTY2 mengembangkan dan menjual PreonLab, sebuah kerangka kerja untuk simulasi fluida Lagrangian berbasis SPH dengan fokus khusus pada akurasi,



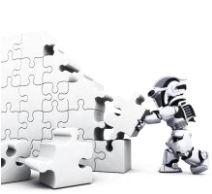
efisiensi, kegunaan, dan keandalan. PreonLab sepenuhnya terparalel dan berjalan pada PC desktop dan kluster berkinerja tinggi. Waktu pra-pemrosesan minimal karena tidak diperlukan penggabungan batas. Berbagai kemampuan pasca-pemrosesan dari hasil simulasi telah direalisasikan bersama dengan visualisasi yang kuat dan efisien. Kualitas simulasi PreonLab telah dievaluasi dengan kasus uji standar, misalnya skenario jebolnya bendungan Marin, dan dengan berbagai skenario lain dari mitra eksternal.

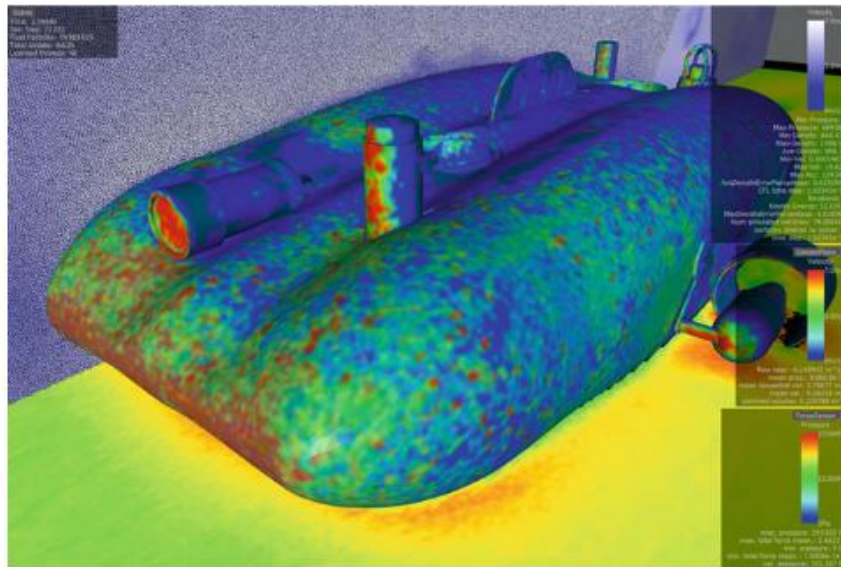
Area aplikasi yang disukai adalah aliran permukaan bebas dengan geometri batas yang kompleks dan bergerak cepat, misalnya. kendaraan di jalur air, prediksi evakuasi air hujan untuk kendaraan dengan wiper bergerak, atau desain kotak roda gigi dengan pelumasan yang dioptimalkan. Kemampuan visualisasi dan pasca-pemrosesan PreonLab merupakan alat yang sangat relevan untuk penelitian CFD dan CS di masa mendatang menuju kerangka kerja simulasi untuk analisis dan pelatihan intervensi bawah air. Misalnya, Gambar 13.1, 13.2, 13.3, dan 13.4 menunjukkan tangkapan layar PreonLab dengan berbagai visualisasi hasil simulasi. Sebaliknya, solusi dari tantangan penelitian yang diuraikan di bagian "Menuju Kerangka Kerja Simulasi untuk Intervensi Bawah Air" dapat menarik untuk pengembangan lebih lanjut PreonLab FIFTY2.

13.2 SIMULASI UNTUK INTERVENSI BAWAH AIR

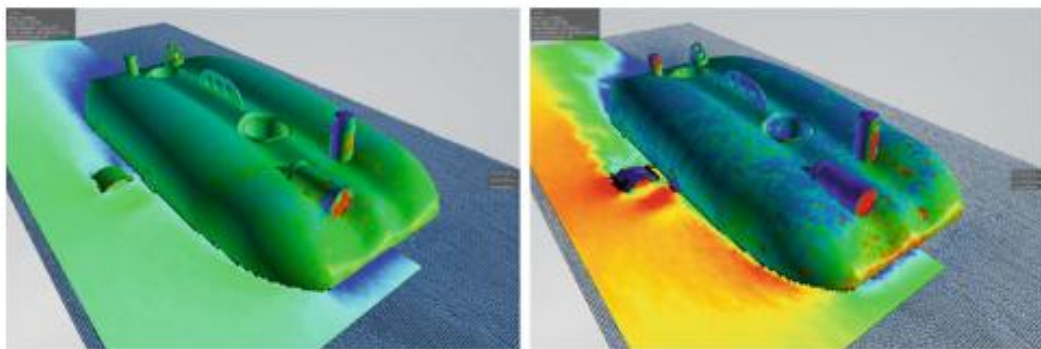
Konteks: Desain kendaraan bawah air otonom (AUV) merupakan hasil dari proses desain yang panjang yang berupaya menemukan nilai optimal sehubungan dengan berbagai tujuan optimasi. Banyak dari tujuan ini dapat diformalkan, misalnya, daya dorong efektif relatif terhadap kecepatan rotor, atau ruang kosong yang dibutuhkan oleh gripper untuk beroperasi. Namun seringkali, tujuan tersebut hanya dapat dievaluasi melalui eksperimen, baik nyata maupun simulasi. Eksperimen robot bawah air yang sesungguhnya mahal dan fleksibilitasnya terbatas. Rangkaian skenario eksperimen terbatas dan analisis eksperimennya agak sulit, karena ketersediaan data dibatasi oleh keterbatasan sensor. Selain itu, kemajuan dalam pengembangan AUV biasanya kecil, karena potensi perubahan memerlukan pembangunan ulang prototipe yang memakan waktu dan mahal.

Simulasi dapat digunakan untuk mengatasi masalah eksperimen yang sesungguhnya. Berbagai skenario dapat diuji secara fleksibel dan jenis, bentuk, dan posisi sensor virtual yang sewenang-wenang dapat diwujudkan. Potensi perubahan AUV dapat diwujudkan hanya dengan mengadaptasi model virtual seperti yang diilustrasikan pada Gambar 13.1, 13.2, 13.3, 13.4. Simulasi dapat membantu membuat desain AUV lebih efisien. Salah satu cara untuk melakukannya adalah dengan menyediakan perangkat perancang dan rantai perangkat yang dapat digunakan untuk mengevaluasi tujuan optimasi dengan cepat. Cara lain adalah dengan menyediakan perangkat yang mengeksplorasi ruang parameter desain secara otomatis. Outputnya akan menjadi subruang yang layak untuk desain atau sejumlah desain spesifik.



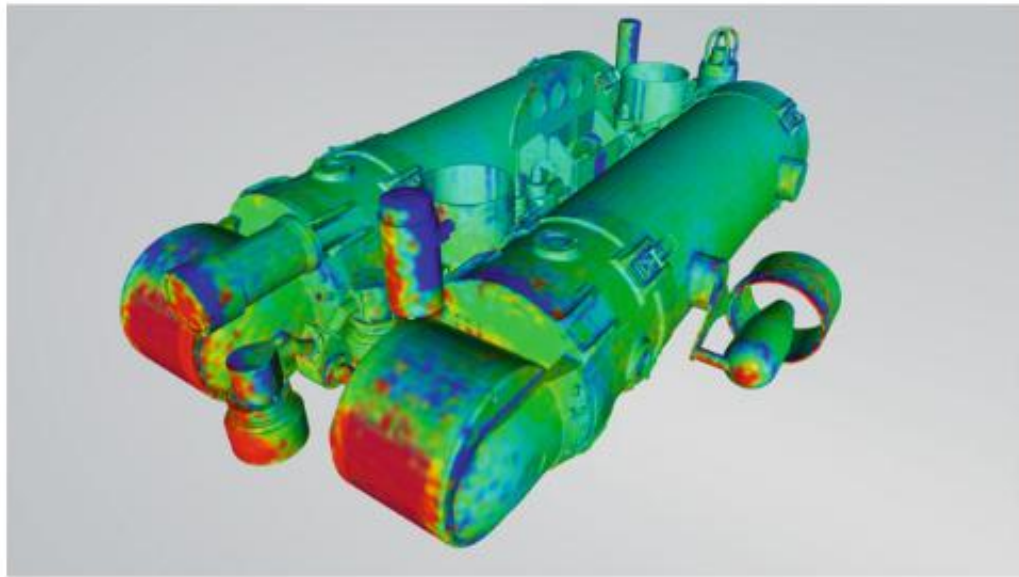


Gambar 13.1 Gambar tersebut mengilustrasikan fleksibilitas dan kegunaan kerangka simulasi fluida. Sebuah robot bawah air (disediakan oleh Marc Hildebrand, DFKI Bremen) ditempatkan dalam aliran fluida. Aliran fluida disimulasikan dengan SPH tak termampatkan. Penanganan batas mengikuti konsep pencerminan tekanan dan batas sampel dengan ukuran sampel yang tidak seragam. Pasca-pemrosesan, yaitu sensor, dan visualisasi dilakukan dengan PreonLab dari FIFTY2. Warna pada permukaan robot mengkodekan tekanan, warna pada bidang di bawah robot menunjukkan kecepatan aliran fluida di sekitarnya, dan struktur kebiruan di latar belakang menunjukkan bagian sampel fluida yang terpotong. Warna sampel fluida mengkodekan kecepatannya.



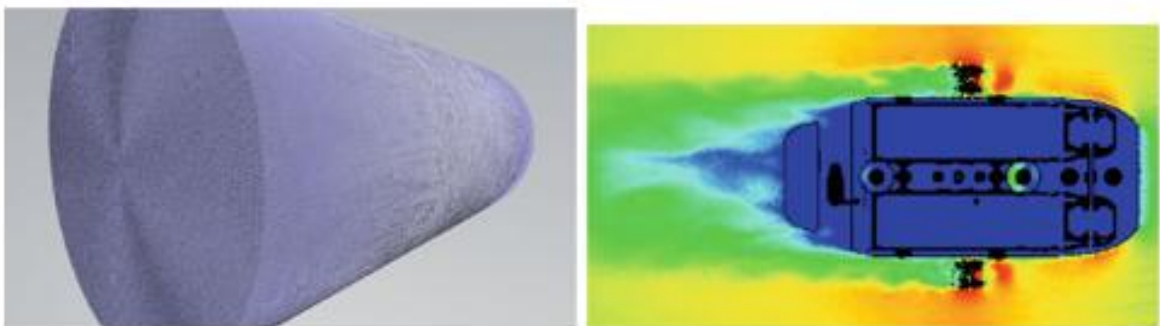
Gambar 13.2 Kedua gambar ini menunjukkan model robot yang sama dalam aliran dengan kecepatan berbeda menggunakan teknik simulasi dan visualisasi yang sama seperti pada Gambar 13.1. Pewarnaan juga sesuai dengan Gambar 13.1. Robot sepenuhnya dikelilingi oleh air. Hanya sampel fluida di bawah robot yang divisualisasikan.





Gambar 13.3 Gambar ini menunjukkan tekanan pada permukaan model robot lain (disediakan oleh Marc Hildebrand, DFKI Bremen) dalam skenario bawah air. Medan tekanan dan kecepatan dapat dianalisis untuk mengoptimalkan bentuk robot. Selain itu, proses perendaman, permukaan, akselerasi, dan deselerasi dapat disimulasikan untuk mengoptimalkan fungsionalitas robot. Lingkungan simulasi dan visualisasi yang sama seperti pada Gambar 13.1 telah digunakan.

Pertanyaan penelitian terbuka: Kami menjelaskan kemungkinan arah penelitian CS untuk memajukan teknologi terkini dalam simulasi AUV guna menyediakan alat untuk optimasi desain AUV yang efisien. Ini melibatkan simulasi fluida Lagrangian, kueri jangkauan, deteksi tabrakan, perhitungan kedekatan di antara objek yang diartikulasikan, dan pengoptimalan desain sistem semi-otomatis dengan fokus khusus pada robotika bawah air.



Gambar 13.4 Kedua gambar ini mengilustrasikan keseluruhan set sampel domain simulasi (kiri) dan medan kecepatan contoh di sekitar robot (kanan). Lingkungan simulasi dan visualisasi yang sama seperti pada Gambar 13.1 telah digunakan.

Mengenai simulasi fluida, berbagai aspek dapat diselidiki: kinerja, interaksi fluida-struktur termasuk padatan yang dapat dideformasi, kopling kuat, pengambilan sampel fluida



spasial adaptif, interaksi padatan SPH dengan kendala, atau penyelidikan alternatif SPH, misalnya MLS. Bergantung pada skenario aplikasi masing-masing, komponen simulasi lebih lanjut dapat dipertimbangkan.

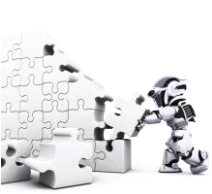
Dalam konteks kueri rentang yang sangat relevan untuk pencarian tetangga yang efisien dalam simulasi fluida Lagrangian, berbagai aspek baru dapat diselidiki. Misalnya, struktur data hibrida dapat diselidiki yang menggabungkan hierarki subdivisi ruang dan volume pembatas. Meskipun metode pencarian tetangga saat ini untuk fluida biasanya didasarkan pada subdivisi ruang, mungkin masuk akal untuk menggunakan hierarki volume pembatas untuk memindahkan batas kaku dan menggabungkan kedua konsep tersebut. Aspek baru lainnya adalah kompresi. Daftar tetangga relatif mahal untuk disimpan, dan untuk simulasi besar, menyelidiki representasi tetangga yang hemat memori tentu masuk akal.

Sehubungan dengan deteksi tabrakan dan komputasi kedekatan, struktur data akselerasi baru dapat diselidiki yang memungkinkan implementasi algoritma geometri tersebut pada GPU. Hal ini akan memungkinkan simulasi fisika benda tegar yang lebih cepat daripada waktu nyata dan simulasi atomistik pada antarmuka fluida dan benda tegar. Dengan menggunakan pengepakan bola dalam untuk benda tegar, kita akan dapat memperoleh kopling yang kuat antara fluida dan benda tegar yang terbenam di dalamnya.

Meskipun kerangka kerja simulasi terutama ditujukan untuk analisis AUV, kerangka kerja ini juga dapat digunakan untuk tujuan pelatihan. Oleh karena itu, penggabungan pemecah fluida ke dalam lingkungan realitas virtual dapat diselidiki. Sistem simulasi VR semacam itu akan memungkinkan para peneliti untuk menyelidiki desain AUV baru, atau desain subsistem baru seperti gripper, yang dapat memberikan wawasan melampaui sistem simulasi biasa karena tingkat pencelupan yang jauh lebih tinggi.

Kesimpulan

Bab ini telah membahas beberapa aspek hubungan antara CS dan CFD. Pentingnya kontribusi CS bagi bidang CFD telah dimotivasi secara umum, disertai dengan deskripsi solusi CS spesifik yang baru-baru ini berkontribusi pada kemajuan teknologi simulasi fluida. Arah yang memungkinkan untuk penelitian CS di masa mendatang telah diuraikan untuk solusi CFD khususnya dalam domain AUV.



BAB 14

NAVIGASI AUV BARU DI RUANG TERBATAS.

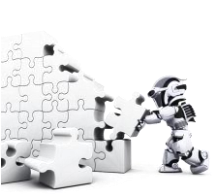
Dalam bab ini menyajikan pemikiran awal tentang bagaimana beberapa teknik dari robotika umum dapat membantu navigasi kendaraan bawah air otonom (AUV) di ruang terbatas dengan memanfaatkan khususnya batas spasial dan mempertimbangkan informasi yang tidak tersedia di perairan terbuka. Terdapat ruang terbatas alami, misalnya gua, serta ruang terbatas buatan, misalnya tripod turbin angin lepas pantai atau fasilitas minyak dan gas bawah air, yang menjadikan aplikasi ini menarik. Kami berpendapat bahwa sistem persepsi AUV umum dengan kamera pandangan depan dan/atau sonar memiliki kekurangan untuk mengukur struktur di sekitar AUV.

Namun, lingkungan ini sangat penting di ruang terbatas di mana AUV tidak dapat dilihat sebagai "titik di ruang" tetapi perluasan fisiknya perlu dipertimbangkan. Fitur lingkungan jauh yang diamati oleh sensor jarak jauh dapat dipetakan, tetapi nantinya, ketika AUV mendekat dan sensor jarak jauh tidak dapat lagi mengamatinya, fitur tersebut mungkin tidak dapat langsung digunakan untuk pelokalan menggunakan sensor tersebut. Namun, kami masih melihat peluang untuk memanfaatkannya dan, terlebih lagi, untuk menghasilkan fitur baru dengan cara lain. Bagaimana hal ini dapat dicapai adalah gagasan utama yang ingin kami sampaikan di sini.

14.1 PENDAHULUAN

Navigasi laut biasanya dikaitkan dengan perairan terbuka. Dari masyarakat Polinesia kuno yang menggunakan penunjuk jalan, bintang, dan burung untuk menavigasi Pasifik, hingga penemuan sekstan dan kronometer pada abad ke-18 hingga Sistem Pemosisian Global (GPS) di zaman modern, tantangan utamanya adalah menemukan posisi Anda di hamparan lautan terbuka yang luas.

Di sisi lain, terdapat lingkungan bawah laut yang penting di mana tantangannya adalah ukurannya yang kecil dan terbatas. Contohnya termasuk gua-gua yang memiliki minat ilmiah tertentu dan fondasi turbin angin, fasilitas minyak dan gas bawah laut, atau bahkan pipa-pipa besar (Gambar 14.1) yang relevan secara ekonomi. Dalam semua kasus, sifatnya yang terbatas membuatnya berbahaya bagi penyelam, tetapi juga sulit dinavigasi oleh AUV. Terdapat langkah besar dari navigasi permukaan ke masalah khusus navigasi terbatas. Bahkan teleoperasi pun sulit karena tali pusing dapat terlilit. Masalah ini memotivasi kami untuk menyelidiki teknik robotika umum mana yang dapat memanfaatkan karakter terbatas lingkungan yang spesifik untuk memfasilitasi lokalisasi, pemetaan, dan pada akhirnya navigasi.





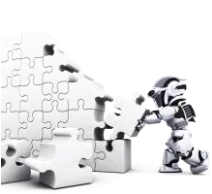
Gambar 14.1. Contoh misi di lingkungan bawah air yang terbatas. AUV Dagon sedang diturunkan ke dalam poros air pendingin pembangkit listrik. Gambar milik Marc Hildebrandt, DFKI

Makalah ini dimulai dengan karya terkait, kemudian membahas situasi persepsi untuk AUV di ruang terbatas. Kemudian, makalah ini menyajikan gagasan utama untuk menggunakan informasi ruang bebas ego, informasi yang diperoleh dari IMU selama kontak ringan dengan lingkungan, informasi yang diperoleh dari pemahaman bagian statis lingkungan, dan akhirnya penggunaan persepsi aktif untuk eksplorasi otonom sebagai suatu pandangan.

14.2 LOKALISASI DAN PEMETAAN SIMULTAN (SLAM)

Lokalisasi dan Pemetaan Simultan (SLAM) telah menjadi bidang penelitian yang aktif selama dua dekade, dengan hasil bahwa algoritma dan implementasi yang berfungsi saat ini tersedia dan misalnya digunakan untuk mengemudi otonom, navigasi UAV, atau bahkan jaminan kualitas dalam teknik sipil. Algoritma dan implementasi ini sebagian besar berbasis pada citra RGB atau RGBD dan bekerja pada titik kunci yang diekstraksi atau secara padat pada seluruh citra.

Metodologi yang paling menonjol adalah berbasis grafik dengan simpul yang sesuai dengan titik atau pose yang akan diestimasi dan tepi yang sesuai dengan pengukuran di sekitar simpul yang berdekatan yang dinyatakan sebagai kendala lunak. Algoritma optimasi, misalnya dalam pustaka seperti g2o, SLoM, atau ceres, memperoleh nilai yang paling mungkin untuk simpul yang diberikan informasi di tepi dengan minimisasi kuadrat terkecil. Dalam domain bawah air beberapa aplikasi SLAM visual telah dipublikasikan, namun sebagian besar sebagai pasca-pemrosesan dan tidak dalam loop kontrol AUV. Ini karena domain bawah air sulit terkait visibilitas dan fitur dan karenanya risiko kerusakannya tinggi. Proyek DEPTHX memberikan contoh luar biasa dari AUV yang beroperasi secara otonom di luar lab atau kompetisi terkendali menggunakan SLAM untuk lokalisasi.



Sistem ini mengeksplorasi, memetakan, dan menyelidiki sistem cenote Zacatón dalam serangkaian misi yang ditentukan secara manual dan dieksekusi secara otonom. Subsistem SLAM menggunakan IMU dan DVL untuk perhitungan mati dan tiga cincin sonar (tanpa kamera) untuk mengamati lingkungan. Algoritma SLAM adalah filter partikel Rao-Blackwellized dengan satu oktona 3D per partikel dan skema penyalinan malas yang cerdas untuk mencapai kinerja yang diperlukan. Sebagian besar algoritma SLAM menganggap robot sebagai sensor seperti titik. Pengecualiannya adalah, di mana interaksi tubuh robot dengan lingkungan digunakan dalam SLAM, dan di mana robot berkumis melakukan SLAM taktil. Keduanya menggunakan fakta bahwa ruang yang ditempati robot harus kosong.

Situasi Persepsi

Survei terbaru tentang sensor dan algoritma navigasi yang tersedia untuk navigasi terbuka (bawah air) diberikan oleh. Ikhtisar yang mudah diakses dapat ditemukan di. Pemikiran kami di sini secara khusus didasarkan pada AUV dengan sensor yang menghadap ke depan, misalnya kamera atau sonar, seperti yang mungkin lebih disukai untuk misi di ruang terbatas.

14.3 SENSOR PERHITUNGAN MATI

Sensor perhitungan mati memiliki dua karakteristik: Pertama, sensor ini mengukur kuantitas tertentu terkait kondisi internal AUV tanpa mengacu pada hal eksternal. Kedua, sensor ini mengukur perubahan kuantitas yang diinginkan, bukan kuantitas absolut itu sendiri. Perubahan-perubahan ini perlu ditambahkan (atau diintegrasikan) yang menyebabkan akumulasi kesalahan yang terus bertambah, yang disebut drift. AUV biasanya dilengkapi dengan paket "odometri" yang canggih. Girometer serat optik, yang mengukur laju belok, mengakumulasi kesalahan beberapa derajat per jam sehingga orientasi cukup dikenal untuk misi jarak pendek. Bersama dengan akselerometer, yang mengukur percepatan aktual dan gravitasi, sehingga memberikan referensi untuk "turun", pitch dan roll tidak lagi mengalami drift.

Hal yang sama berlaku untuk yaw yang diperoleh dari sumbu rotasi bumi jika giroskop pencari utara atau algoritma fusi yang sesuai digunakan. Mengenai translasi, AUV biasanya memiliki apa yang disebut Log Kecepatan Doppler (DVL) yang mengukur vektor kecepatan saat ini relatif terhadap tanah dengan mengevaluasi pergeseran doppler gema akustik dari tanah ke berbagai arah. Secara tegas, sensor ini merujuk pada sesuatu yang eksternal, yaitu tanah, tetapi dikonseptualisasikan dengan baik sebagai sensor kecepatan, yaitu padanan translasi dari girometer.

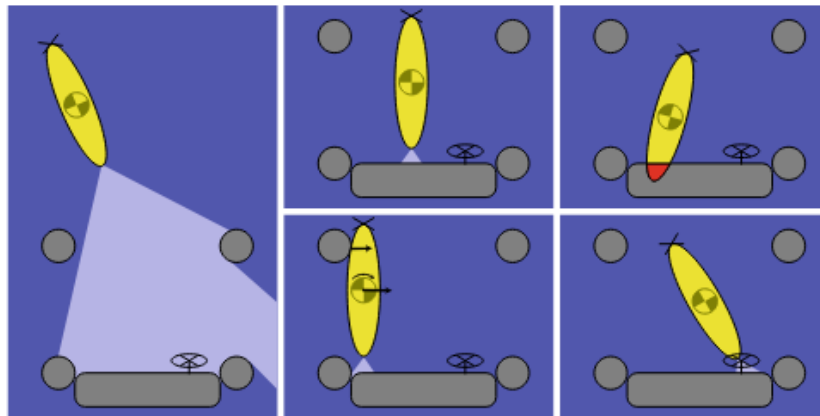
Dalam situasi normal, ini sangat tepat, misalnya 0,12% seperti yang dilaporkan oleh, namun dalam lingkungan yang sulit (misalnya terbatas), asumsi bahwa gema tersebut berasal dari tanah datar tidak berlaku lagi, sehingga menurunkan kinerja secara signifikan [7, Gambar 5.5]. Celah pendek dapat dijembatani oleh akselerometer. Namun, kesalahan sikap kecil $\theta = 0,1^\circ$ menyebabkan setelah $t = 5$ menit mengandalkan akselerometer ke kesalahan posisi $1 \sin(\theta)gt^2 \approx 785$ m. Jadi, akselerometer dapat menjembatani celah pendek tetapi tidak dapat digunakan untuk lokalisasi jangka panjang.



14.4 SENSOR BERORIENTASI DEPAN

Jika kapal semacam itu melaju melalui ruang terbatas, meskipun ruang terbatas tersebut, ia mengamati lingkungan dari jarak tertentu di depannya (Gambar 2, kiri) yang kami yakini biasanya cukup untuk memetakan lingkungan tersebut. Situasi sulit muncul ketika AUV berada dekat dengan sesuatu, baik selama navigasi maupun untuk benar-benar memanipulasi (Gambar 14.2, atas/tengah). Dalam situasi seperti itu, semua algoritma SLAM tertantang oleh ruang terbatas, karena ketika sensor berada di dekat rintangan, seringkali tidak memberikan informasi yang cukup untuk melakukan lokalisasi yang andal. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa bidang pandang sensor biasanya berbentuk kerucut dan secara absolut lebih kecil di dekat robot daripada di jauh.

Selain itu, sebagian besar sonar memiliki jangkauan minimum. Kamera juga memiliki jangkauan minimum untuk alasan fokus dan karena pencahayaan AUV seringkali menyebabkan pencahayaan berlebih atau terhalang oleh objek yang sangat dekat.



Gambar 14.2 Fenomena persepsi menarik yang terjadi pada AUV di ruang terbatas. Kiri:

Ketika AUV dengan sensor pandangan depan mendekati sesuatu, sensornya dapat mendeteksi objek dengan baik. Area yang dicakup oleh sensor ini berwarna terang dan area yang tidak tercakup berwarna biru tua. Atas/tengah: Di dekat objek, sensor pandangan depan tidak memberikan banyak informasi. Atas/kanan: AUV tidak dapat berada dalam posisi yang tumpang tindih dengan lingkungan. Bawah/tengah: Jika AUV (dengan lembut) menyentuh lingkungan, posisi kontak dapat diturunkan dari perubahan kecepatan (sudut) yang terlihat dari IMU. Ini memberikan informasi penting untuk lokalisasi. Bawah/kanan: Masalah yang sering terjadi dalam manipulasi AUV adalah AUV berputar di sekitar, misalnya, pegangan, alih-alih menggerakkan pegangan. Hal ini dapat diamati dari data IMU dan dapat digunakan dengan girometer yang cukup presisi untuk estimasi posisi yang lebih baik tanpa referensi eksternal.

Karena AUV melayang bebas dan akselerometer hanya dapat menjembatani celah ini selama beberapa detik, posisinya hilang. Log Kecepatan Doppler, yang merupakan odometri presisi saat berlayar di atas tanah, juga tidak dapat diandalkan di sini, karena penginderaannya didasarkan pada asumsi permukaan tanah datar dan sebagian besar DVL memiliki batasan



jarak minimum. Karena dalam situasi seperti itu pandangan ke depan terhalang, lingkungan sekitar robot menurut kami merupakan sumber informasi yang menjanjikan. Di bagian "Sumber Informasi yang Diusulkan dengan Sensor Pandangan ke Depan yang Terhalang", kami akan menunjukkan bagaimana hal ini dapat dimanfaatkan tanpa memasang sensor di seluruh badan AUV.

Sensor Lain untuk Navigasi

Untuk melengkapi gambaran: Kedalaman dapat diukur secara absolut oleh sensor tekanan sekitar, jadi tidak seperti aplikasi terestrial, sumbu Z tidak menjadi masalah di bawah air. Di perairan terbuka, AUV secara rutin dilokalisasi menggunakan ping akustik dari pemancar pada pelampung khusus. Sistem ini disebut sistem garis dasar panjang, pendek, atau ultra-pendek, tergantung pada jarak antar pelampung. Teknik-teknik ini tidak berfungsi di ruang terbatas karena garis pandang akustik terhalang dan paling banter dapat memberikan posisi awal saat memasuki area terbatas.

Sumber Informasi yang Diusulkan dengan Sensor Pandangan Depan yang Terblokir

Berikut ini, kami mengusulkan untuk memanfaatkan tiga jenis informasi berharga dalam situasi seperti Gambar 14.2 di atas/tengah, yang semata-mata didasarkan pada rentang fisik robot dan pengukuran dari IMU.

14.5 INFORMASI YANG DIPEROLEH DARI TUBUH ROBOT

Informasi pertama adalah bahwa AUV tidak dapat berada dalam pose yang akan tumpang tindih dengan rintangan yang diketahui di peta. Peta tersebut dapat tersedia secara apriori atau dibuat saat mendekati posisi saat ini (Gambar 14.2, kiri). Bagaimanapun, beberapa bagian peta di sekitar pose AUV saat ini dapat dianggap tersedia, sehingga "informasi ruang bebas ego" ini, yaitu batasan bahwa AUV dan rintangan di peta tidak tumpang tindih, dapat digunakan untuk lokalisasi (Gambar 14.2, atas/kanan). Informasi ini telah digunakan dalam konteks lokalisasi pejalan kaki di dalam ruangan dan ternyata sangat ampuh: melaporkan bahwa odometri pejalan kaki berbasis IMU, jika digabungkan dengan informasi bahwa orang tidak dapat berjalan menembus dinding, cukup untuk melokalisasi di gedung yang diketahui hingga $<0,7$ m 95% dari waktu. Hasil serupa telah diperoleh oleh.

Informasi ini tidak mencegah penyimpangan kecil dalam estimasi pose, karena dalam contoh Gambar 14.2, atas/tengah, selama AUV berada di antara dinding dan keempat kutub, informasi ruang bebas ego tidak menentukan di mana, tetapi hanya mencegah hipotesis untuk "melarikan diri dari area tersebut". Namun, ini merupakan informasi yang cukup berharga, misalnya untuk manuver cadangan yang aman dan percobaan kedua.

Informasi yang Diperoleh dari Kontak Lingkungan

Ide kunci di sini adalah pengamatan bahwa kontak dengan lingkungan mengubah kecepatan dan kecepatan sudut AUV, dan dari rasio dan tanda perubahan tersebut, titik kontak pada badan pesawat dapat ditentukan, serupa dengan penelitian kami sebelumnya dalam topik ini. Hal ini dapat digunakan sebagai informasi positif bahwa AUV harus memiliki pose di mana titik pada lambung ini menyentuh lingkungan (Gambar 2, bawah/tengah). Informasi kontak ini dalam beberapa hal melengkapi informasi ruang bebas ego, karena informasi ruang



bebas ego mengesampingkan hipotesis di mana seharusnya ada kontak tetapi belum teramati dan informasi kontak mengesampingkan hipotesis tanpa kontak ketika ada yang teramati.

Derivasi

Untuk melihat klaim di atas, kita mengamati bahwa sebuah kontak bekerja dengan gaya f pada AUV di titik p dan dari persamaan dinamika mengambang bebas kita memperoleh

$$\dot{v} = m^{-1} f \quad (14.1)$$

$$\dot{\omega} = I^{-1}(p \times f), \quad (14.2)$$

di mana v dan ω adalah kecepatan dan kecepatan sudut, m adalah massa AUV dan I adalah matriks inersianya, keduanya mencakup massa tambahan dari fluida di sekitarnya. Integrasi (14.1) dan (14.2) selama durasi kontak $[t_0 \dots t_1]$ (yang tentu saja perlu ditentukan) akan bermanfaat.

$$\delta v = v(t_1) - v(t_0) = m^{-1} \int_{t=t_0}^{t_1} f(t) dt \quad (14.3)$$

$$\delta \omega = \omega(t_1) - \omega(t_0) \approx I^{-1} \left(p \times \int_{t=t_0}^{t_1} f(t) dt \right) \quad (14.4)$$

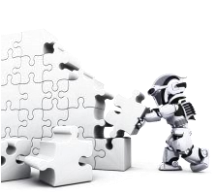
di mana $\approx$ adalah karena p dan I dapat berubah sangat sedikit selama periode kontak. $\int_{t=t_0}^{t_1} f(t) dt$ adalah impuls yang dihasilkan oleh kontak dan tidak diketahui, tetapi δv dan $\delta \omega$ dapat diperoleh dari IMU dengan mengintegrasikan akselerometer dan mengambil selisih girometer masing-masing. Jadi kita punya

$$m^{-1} I \delta \omega = p \times \delta v \quad (14.5)$$

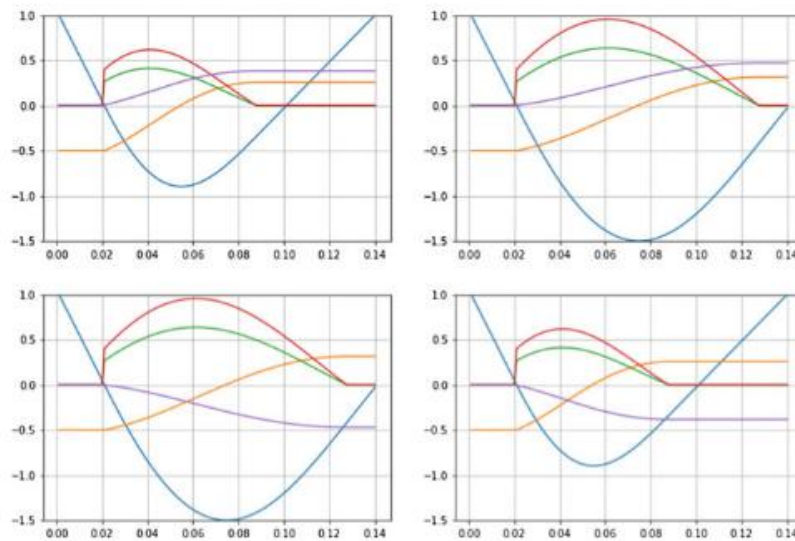
Jika ruas kiri persamaan (14.5) ortogonal terhadap δv , persamaan (14.5) menggambarkan garis arah δv dalam ruang 3D. Garis ini memotong lambung kapal sebanyak 2 kali, dengan asumsi lambung kapal cembung, di mana hanya perpotongan tersebut yang mungkin terjadi ketika δv mengarah ke AUV, karena gaya kontak hanya dapat mendorong, bukan menarik. Rangkaian argumen ini pada dasarnya mirip dengan pendekatan Haidacher untuk memperkirakan titik kontak jari robot dari pembacaan sensor gaya-torsi karena untuk kendaraan yang mengambang bebas, gaya/torsi dan percepatan/percepatan sudut bersesuaian.

Validitas

Pendekatan ini menimbulkan beberapa pertanyaan: Apakah sinyal dari kontak cukup jelas dalam pembacaan IMU sehingga kontak dapat dideteksi dan disegmentasi untuk mendapatkan δv dan $\delta \omega$? Seberapa presisi estimasi posisi kontak tersebut? Dapatkah gaya kontak merusak lingkungan atau AUV? Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ini setidaknya



sebagai pendahuluan, kami telah melakukan studi simulasi kecil yang ditunjukkan pada Gambar 14.3.



Gambar 14.3. Simulasi kontak antara AUV dan lingkungan pada berbagai posisi lambung (depan 0,85 m, depan-tengah 0,425 m, belakang-tengah -0,425 m, belakang -0,85 m dari atas/kiri ke bawah/kanan). Simulasi 2D didasarkan pada silinder berukuran 0,3 m × 1,7 m dengan massa tambahan 25% dan inersia bergeser ke samping ke arah negatif serta kontak dengan elastisitas 60 N/mm dan redaman 800 Ns/m (misalnya lambung berlapis karet).

Kurva menunjukkan jarak kontak (biru, mm, penetrasi rata-rata negatif), kecepatan v (oranye, dm/s), percepatan a (hijau, m/s^2), kecepatan sudut ω (magenta, $\times 10^\circ/s$) dan gaya kontak F (merah, $\times 100$ N) terhadap waktu (s). Terlihat bahwa kontak depan dan belakang hanya berbeda pada tanda ω . Pergerakan positif akan mengakibatkan tanda a dan ω terbalik. Dalam model sederhana, pada momen kontak (0,02 s), gaya redaman lambung karet mulai bekerja. Hal ini menyebabkan diskontinuitas pada a dan F .

Hasilnya adalah bahwa pendekatan tersebut tampak layak tetapi hanya untuk kecepatan yang sangat kecil (0,05 m/s). Dengan parameter yang wajar (termasuk lambung berlapis karet yang memungkinkan lekukan 1,5 mm) gaya kontak sekitar 100 N dan percepatan $0,6 m/s^2$ muncul yang seharusnya tidak merusak AUV. Di sisi lain, percepatan tersebut serta $\delta\omega = 5^\circ/s$ secara signifikan lebih dari kebisingan atau gangguan lainnya dan harus dapat dideteksi, khususnya karena mereka muncul sebagai puncak dengan durasi hanya sekitar 0,1 detik. Untuk misalnya batu atau struktur baja buatan manusia 100 N tampaknya juga tidak terlalu berbahaya. Tentu saja, ada lingkungan, misalnya terumbu karang yang melarang kontak. Namun, bahkan kemudian fungsi untuk mendeteksi dan mengevaluasi kontak tampaknya membantu untuk mendeteksi kecelakaan kecil dan memulihkan sebelum menjadi kecelakaan besar.

Lokalisasi Selama Manipulasi

Sumber informasi ketiga mencakup situasi khusus ketika AUV memanipulasi sesuatu (Gambar 14.2 bawah/kanan). Dalam situasi seperti itu, sering kali AUV mencoba berputar,



misalnya pada pegangan, tetapi sebenarnya berputar di sekitar pegangan tersebut. Jika lokasi hilang, misalnya karena suatu objek berada sangat dekat dengan sensor yang menghadap ke depan, situasi menjadi tidak terkendali.

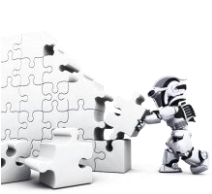
Idenya adalah, ketika sistem mengetahui bahwa suatu titik tertentu relatif terhadap AUV (di sini gripper) tetap pada posisi dunia yang tetap, karena telah mencengkeram sesuatu, posisi AUV dapat diturunkan dari orientasinya yang tersedia secara tepat dari girometer sehingga menghindari penyimpangan besar dari integrasi akselerometer. Situasi seperti itu dapat dideteksi berbasis model dengan filter multimodel yang berinteraksi, di mana satu mode mengambang bebas (termasuk gaya dorong) dan mode lainnya berputar di sekitar titik yang tetap dalam kerangka dunia dan robot (atau manipulator alternatif). Filter akan terus mencoba memperkirakan posisi tetap yang paling sesuai dengan data IMU dan menilai apakah cukup kompatibel. Karena gerakan manipulasi cukup cepat, kami yakin bahwa perputaran di sekitar situasi titik tangkap dapat diidentifikasi secara positif dari data IMU dan setelah diidentifikasi, penyimpangan lebih lanjut dapat dihindari.

14.6 PEMETAAN ARUS AIR

Tantangan khusus dalam lingkungan bawah air terbatas adalah arus air. Sementara di perairan terbuka, arus biasanya homogen dalam skala yang lebih panjang, arus di lingkungan terbatas dapat bervariasi secara drastis dan bahkan efek turbulen dapat terjadi dengan adanya geometri lingkungan statis tertentu. Tujuan kami adalah untuk mengukur arus air di sekitar AUV secara tepat dan memperkirakan peta arus lengkap yang dapat digunakan untuk meningkatkan kontrol kendaraan dan perencanaan jalur yang aman. Kami bertujuan untuk mengukur arus air terutama dengan membandingkan gerakan AUV yang diharapkan, dengan mempertimbangkan perintah motor yang dikeluarkan, dengan gerakan yang diamati yang diukur oleh sistem lokalisasi. Ini dapat dilengkapi dengan menggunakan DVL sebagai Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), yang mengukur pergeseran Doppler dalam refleksi akustik dari partikel dalam arus air dan dengan demikian memungkinkan untuk mendapatkan profil kecepatan air di sepanjang berkas DVL.

Pendekatan ini mapan untuk pemetaan arus di perairan terbuka dan produk komersial ada, misalnya. Pendekatan yang ada tersebut menganggap AUV sebagai objek seperti titik dan menurunkan arus air dari kecepatan linier 3D. Ini adalah perkiraan yang baik di perairan terbuka karena arus yang homogen. Namun, di lingkungan terbatas, perluasan AUV tidak dapat diabaikan, karena turunan arus di sepanjang lambung mungkin jauh lebih besar dari nol. Oleh karena itu, kami bertujuan untuk menggunakan kecepatan 6D penuh, termasuk yang bersudut, untuk memperoleh pengukuran arus diferensial berkenaan dengan lambung AUV.

Dengan menggunakan pendekatan ini, arus air dapat diukur di sepanjang lintasan AUV. Namun, untuk memungkinkan penggunaannya dalam perencanaan lintasan, kami perlu mengekstrapolasinya ke seluruh ruang bebas yang telah dipetakan. Di sini, kami merencanakan pendekatan dua tahap: pertama, kami akan memperluas simulasi yang dikembangkan oleh Band. untuk memperoleh peta arus, dengan menggabungkan pengukuran kami sebagai



kendala. Kedua, kami akan membangun hasil simulasi untuk melatih jaringan saraf dalam sebagai penaksir arus.

Meskipun kami berharap simulasi menghasilkan estimasi arus air yang presisi bahkan untuk geometri lingkungan yang kompleks, pendekatan ini tidak layak untuk dijalankan pada AUV secara waktu nyata (real-time) karena keterbatasan komputasi. Hal ini memotivasi pendekatan pembelajaran, yang diharapkan memberikan hasil yang lebih mendekati, tetapi dengan tuntutan komputasi yang lebih rendah. Estimasi ini sejalan dengan penelitian kami sebelumnya tentang topik ini menggunakan proses Gaussian non-stasioner.

14.7 EKSPLORASI OTONOM

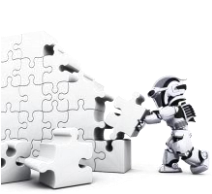
Kemampuan penting AUV untuk navigasi di lingkungan terbatas adalah eksplorasi otonom, karena komunikasi bandwidth rendah dengan pusat kendali pun dapat terblokir untuk jangka waktu yang lama. Tujuan kami adalah menggabungkan semua informasi yang dikumpulkan menggunakan pendekatan di atas ke dalam strategi eksplorasi yang andal. Secara khusus, kami berpikir bahwa akan bermanfaat untuk menggunakan kontak intensional dengan lingkungan untuk melengkapi informasi sensor untuk lokasi yang tidak pasti selama proses SLAM.

Masalah yang menantang di sini adalah optimalisasi kontak intensional ini. Di sini, kita harus mempertimbangkan waktu dan energi yang dibutuhkan untuk melakukan kontak dengan perolehan informasi dan, sebagai tambahan, dengan manuver eksploratif alternatif untuk pemetaan menggunakan modalitas sensor lainnya. Kami berencana untuk mengembangkan penelitian kami sebelumnya di bidang ini, di mana kami mengembangkan strategi optimal untuk memilih landmark.

Lebih lanjut, kami akan mempertimbangkan aspek keselamatan dari proses eksplorasi, khususnya pengembalian kendaraan yang aman. Di sini, ketidakpastian dalam proses pemetaan serta informasi yang dikumpulkan tentang arus air akan membangun fondasi untuk menentukan titik-titik untuk pelacakan balik dan titik pengembalian selama misi, memperluas pekerjaan kami sebelumnya dalam eksplorasi robot otonom.

Kesimpulan

Dalam makalah posisi ini, kami telah mengusulkan berbagai ide untuk lokalisasi bawah air di ruang terbatas: Informasi ego-freespace, yaitu AUV tidak boleh berada dalam posisi yang akan tumpang tindih dengan rintangan; informasi kontak, di mana titik kontak dihitung dari data IMU; informasi gerakan berbasis model jika terjadi manipulasi; estimasi peta arus air dan eksplorasi aktif menggunakan informasi yang dikumpulkan oleh pendekatan-pendekatan di atas. Kami yakin bahwa hasil dari ide-ide ini akan menguntungkan dalam menangani misi bawah air terbatas yang menantang.



BAB 15

VERIFIKASI UNTUK SISTEM BAWAH AIR OTONOM

Karena sistem bawah air beroperasi di luar jangkauan langsung, seringkali secara otonom, untuk jangka waktu yang lama, ketepatan perangkat lunak dan perangkat keras yang menyusun sistem ini menjadi perhatian utama. Dalam kontribusi ini, kami meninjau teknik yang ada untuk memastikan ketepatan perangkat keras dan perangkat lunak menggunakan metode formal, dan menilai penerapannya pada robotika bawah air. Kami mengidentifikasi beberapa area yang menjanjikan: pemodelan sistem, verifikasi program, dan desain algoritma untuk menjamin efisiensi dan ketepatan (algoritma sertifikasi).

15.1 PENDAHULUAN

Sistem bawah air beroperasi dengan akses internet terbatas, komunikasi yang buruk, dan di luar jangkauan langsung, di lingkungan yang sangat berbahaya dan merugikan hampir sepanjang waktu. Jika terjadi kesalahan, akan sulit untuk memperbaikinya dari luar, jadi kami perlu memastikan bahwa sistem akan beroperasi dengan benar dalam segala situasi. Terdapat seperangkat metode yang kaya yang dapat digunakan untuk mencapai tujuan ini. Banyak di antara metode tersebut didasarkan pada gagasan matematika tentang kebenaran dan pembuktian (disebut sebagai metode formal), dan berikut ini kami akan mengulas penerapannya pada robotika dan robotika bawah air.

Pertama, kita perlu memperjelas konsep "beroperasi dengan benar dalam segala kondisi". Ini mungkin berarti kita menentukan bagaimana robot bawah air berperilaku dan apa yang dilakukannya; misalnya, kita dapat menentukan bahwa robot tidak pernah melebihi batas kecepatan tertentu, atau tidak pernah menabrak rintangan. Memastikan bahwa robot (dan implementasi perangkat lunak kendali robot) memenuhi sifat-sifat ini disebut verifikasi. Untuk dapat memverifikasi bahwa suatu sistem bekerja dengan benar, kita harus dapat menyatakan sifat-sifat sistem kita secara formal. Hal ini memerlukan deskripsi formal tentang sistem, lingkungannya, dan bagaimana sistem seharusnya berperilaku. Deskripsi formal ini disebut model, dan merupakan dasar untuk verifikasi formal.

Dalam catatan singkat ini, pertama-tama kita meninjau dasar-dasar pemodelan sistem dan verifikasi perangkat keras maupun perangkat lunak, kemudian mempertimbangkan bagaimana merancang algoritma yang dapat diverifikasi. Sebagai studi kasus verifikasi dalam robotika, kami melaporkan penelitian sebelumnya tentang algoritma kendali untuk robot otonom. Kesimpulannya membahas aplikasi lebih lanjut.

15.2 MEMODELKAN SISTEM

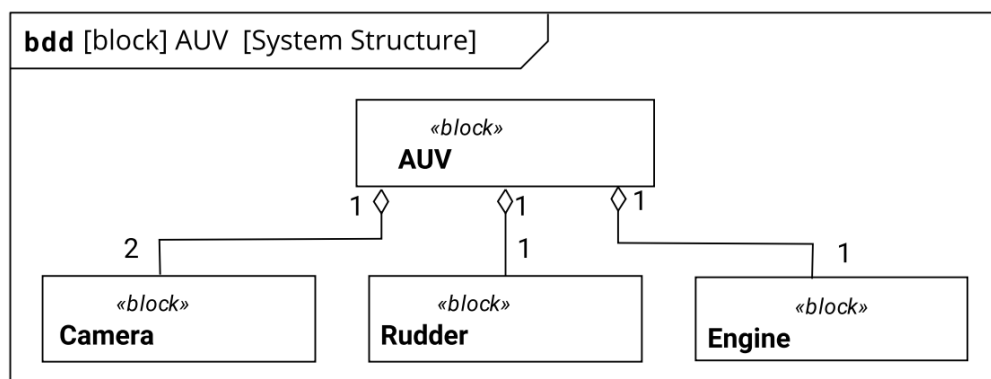
Verifikasi dimulai dengan model formal sistem yang menggambarkan perilaku yang benar (diinginkan) tanpa memperhatikan implementasi aktual. Kita dapat menghasilkan kode



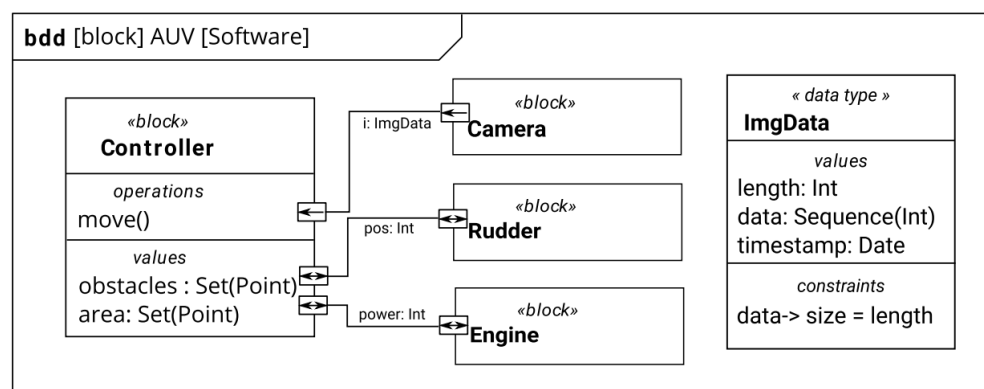
dari model tersebut dan mendapatkan sistem yang benar sejak awal, atau kita dapat mengimplementasikan sistem dan memverifikasi perilaku yang benar setelahnya.

Untuk memodelkan sistem, berbagai bahasa pemodelan telah dikembangkan. Sebagian besar bahasa pemodelan tersebut tercakup – jika tidak secara sintaksis maka secara konseptual – dalam Unified Modelling Language (UML). Profil UML yang disebut SysML secara khusus dirancang untuk pengembangan sistem, dan karenanya sangat sesuai dalam konteks ini, sehingga kita akan membahasnya di bawah ini.

SysML memungkinkan kita untuk menggambarkan struktur dan perilaku sistem menggunakan delapan jenis diagram yang berbeda. Yang terpenting, SysML menggambarkan keseluruhan sistem, bukan hanya aspek perangkat lunaknya. Untuk kendaraan bawah air otonom (AUV), strukturnya mungkin terdiri dari dua kamera untuk pengenalan gambar, sebuah mesin untuk propulsi, sebuah kemudi untuk manuver, dan sebuah pengontrol utama. Dekomposisi ini dapat dijelaskan dengan diagram definisi blok (BDD; diagram struktural terpenting dalam SysML, sebanding dengan diagram kelas dalam UML) seperti pada Gambar 15.1. Kita dapat melanjutkan dengan menjelaskan struktur perangkat lunak pengontrol utama (Gambar 15.2): ia menyediakan operasi `move()` untuk menghasilkan perintah kemudi, dan terhubung ke kamera, kemudi, dan mesin.



Gambar 15.1 Arsitektur sistem kendaraan bawah air otonom



Gambar 15.2 Struktur pengontrol utama untuk AUV

Koneksi dimodelkan oleh port SysML, yang dapat diimplementasikan oleh sistem bus (USB, Can-Bus) atau koneksi langsung (serial); diagram tidak menentukan hal itu, ia hanya



menentukan informasi dan arah yang dipertukarkan: kamera mengirimkan blok `ImgData`, dan kemudi serta mesin masing-masing mengirim dan menerima posisi kemudi dan tingkat daya mesin. Struktur `ImgData` ditentukan lebih lanjut: ia adalah blok dengan bidang panjang, urutan data gambar mentah dengan panjang yang tepat, dan stempel waktu.

Struktur yang dijelaskan dengan cara ini sebagian besar statis. Untuk menentukan properti perilaku dinamisnya, kami menggunakan bahasa kendala objek (OCL). OCL memungkinkan kami untuk merumuskan invarian dan kondisi pra-dan pasca-operasi yang harus dipenuhi. Untuk mengambil contoh yang sedang berjalan, kami ingin menentukan bahwa AUV tidak pernah menabrak rintangan. Pengontrol memiliki dua atribut, `obstacle` dan `area`, keduanya berisi kumpulan titik, yang mewakili rintangan yang terdeteksi, dan area dalam ruang yang saat ini dicakup oleh AUV. (Bagaimana ini dihitung tidak ditentukan.) Dalam OCL, invarian keamanan dirumuskan seperti ini

```
context Controller  
  inv safe: self.obstacles→forall(o|not self.area→ contains(o))
```

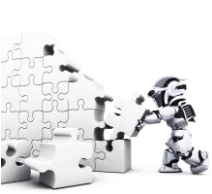
Ini menyatakan bahwa tidak ada titik rintangan di dalam area ini. Kita dapat merumuskannya secara ekuivalen sebagai berikut, dengan menyatakan bahwa kedua himpunan tersebut tidak berpotongan:

```
context Controller  
  inv safe: area→intersection(obstacles)→isEmpty()
```

Invarian ini akan memerlukan kewajiban pembuktian untuk implementasi semua metode pengendali bahwa invarian tersebut dipertahankan; dan itu berarti AUV tidak pernah mengalami rintangan yang terdeteksi.

Untuk menentukan perilaku dinamis secara lebih rinci, kita dapat menggunakan diagram aktivitas atau diagram mesin status. Diagram aktivitas adalah diagram alir, yang diperluas dengan elemen-elemen untuk memodelkan sistem konkuren dan terdistribusi. Diagram mesin status (disebut diagram status dalam UML) adalah notasi untuk menggambarkan mesin status hierarkis. Kedua diagram ini memiliki keuntungan karena kita dapat memberikan semantik formal kepada keduanya, sehingga membuktikan properti pada tingkat ini (misalnya, tidak adanya deadlock), dan kita dapat menghasilkan kode dari keduanya, yang secara otomatis akan memenuhi properti yang dibuktikan pada tingkat diagram yang lebih abstrak. Namun, cara ini bisa cukup rumit untuk mendeskripsikan algoritma yang lebih canggih.

Kita telah menjelaskan struktur dan perilaku dinamis sistem, jadi pertanyaannya adalah bagaimana kita dapat memverifikasinya, baik pada tingkat perangkat keras maupun perangkat lunak.



15.3 VERIFIKASI PERANGKAT KERAS

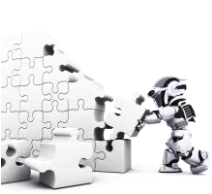
Perbedaan utama antara verifikasi perangkat keras dan perangkat lunak adalah kenyataan bahwa perangkat keras tidak dapat diubah setelah produksi, sehingga perlu diverifikasi sebelum produksi. Oleh karena itu, terdapat minat yang jauh lebih besar terhadap verifikasi di industri perangkat keras dibandingkan di industri perangkat lunak, dan selanjutnya semakin banyak perangkat lunak yang tersedia. Membuktikan kebenaran komponen perangkat keras merupakan bidang ilmu komputer yang mapan, dengan banyak metode yang digunakan untuk membuktikan bahwa suatu sistem berfungsi sebagaimana mestinya. Metode-metode otomatisasi desain elektronik (EDA) ini dapat dibagi menjadi tiga kategori sebagai berikut.

Dalam simulasi, masukan sistem ditetapkan secara eksplisit dan disebarkan melalui model sistem. Setelah itu, keluaran dibandingkan dengan nilai yang diharapkan. Teknik ini sangat matang dan didukung dengan baik oleh semua perusahaan EDA besar. Simulasi mudah diterapkan, dan merupakan metode yang sangat intuitif dengan kompleksitas komputasi yang rendah. Namun, penerapan pola masukan secara menyeluruh secara praktis sulit dilakukan dan, oleh karena itu, cakupan yang memadai tidak dapat diperoleh melalui simulasi untuk sistem kontemporer. Akibatnya, simulasi biasanya diterapkan hanya untuk mencakup skenario spesifik yang dianggap paling kritis.

Emulasi mewujudkan simulasi secara langsung dalam implementasi prototipe chip yang diinginkan sehingga memanfaatkan daya komputasi perangkat keras. Vendor alat EDA juga menyediakan dukungan yang baik di area ini. Emulasi dapat diterapkan segera setelah implementasi prototipe fungsionalitas sistem, misalnya pada perangkat keras khusus atau perangkat keras yang dapat diprogram tersedia. Meskipun hal ini memungkinkan percepatan beberapa kali lipat, emulasi yang menyeluruh menghadapi masalah yang sama seperti dalam simulasi, yaitu cakupan 100% biasanya tidak dapat dicapai dengan metode ini.

Terakhir, verifikasi formal mempertimbangkan masalah secara matematis dengan memodelkan spesifikasi dan rangkaian sebagai rumus logis, dan membuktikan bahwa chip tersebut benar, menggunakan mesin penyelesaian dan metode pembuktian yang canggih. Ini menjamin kebenaran fungsional 100%, tetapi skalabilitas tetap menjadi masalah; Verifikasi formal saat ini hanya dapat diterapkan pada sirkuit dan sistem yang relatif kecil. Semua metode verifikasi menghadapi kompleksitas masalah, sehingga fungsionalitas sistem tidak sepenuhnya terverifikasi, atau verifikasi membutuhkan banyak upaya. Untuk komponen standar (seperti mikrokontroler), versi terverifikasi tersedia (disertifikasi untuk penggunaan hingga tingkat integritas keamanan tertentu), tetapi untuk perangkat keras yang diproduksi dalam jumlah kecil atau perangkat keras yang dikustomisasi seperti FPGA, hal ini tidak berlaku.

Di sini, penelitian mandiri terbaru menunjukkan paradigma verifikasi mandiri, di mana suatu sistem memverifikasi fungsionalitasnya sendiri di lapangan setelah penerapan. Hal ini memungkinkan verifikasi lebih banyak waktu, dan khususnya lebih banyak informasi karena dapat memperhitungkan konteks operasi. Hasil awal menunjukkan bahwa dengan cara ini, sistem yang sebelumnya tidak dapat diverifikasi kini dapat dibuktikan kebenarannya.



15.4 VERIFIKASI PROGRAM

Pembuktian kebenaran program berawal dari Alan Turing, dengan karya-karya penting Hoare dan Floyd yang menjadi cikal bakal bidang ini. Awalnya, kebenaran program ditetapkan sebagai *tripel Hoare* $\{P\} c \{Q\}$, di mana P dan Q adalah predikat keadaan, dan c adalah program. Pendekatan-pendekatan terbaru lebih memilih menggunakan gagasan terpadu, di mana kita memiliki satu predikat atas dua keadaan, yang satu adalah keadaan sebelum dan yang lainnya adalah keadaan setelah program c dijalankan. Untuk memverifikasi bahwa suatu program memenuhi kondisi-kondisi kebenaran ini, kita dapat mendeskripsikan komputasi program secara simbolis (penalaran maju), atau menerapkan aturan-aturan yang mereduksi kondisi kebenaran menjadi tautologi (penalaran mundur).

Baik penalaran maju maupun mundur mengharuskan loop untuk dianotasi secara manual dengan invarian; keduanya mereduksi program yang dianotasi dengan kondisi kebenaran dan invarian menjadi sekumpulan proposisi bebas keadaan yang disebut kondisi verifikasi yang harus dibuktikan untuk menunjukkan bahwa program tersebut benar. Kondisi verifikasi sebagian besar bersifat sepele dan mudah dibuktikan, sehingga teknik pembuktian otomatis baru-baru ini (termasuk pembuktian otomatis penuh dan pembuktian teorema interaktif) telah diterapkan pada verifikasi program untuk menangani pembuktian yang besar dan sebagian besar bersifat teknis. Pendekatan ini memberi anotasi pada kode sumber:

```
/*@
  requires \valid(out) && \ array (ps ,ps_len)
  ensures \forallall int i; 0 < i < ps_len ==>
    out->x < ps[i].x &&
    (out->x = ps[i].x ==> out->y <= ps[i].y)
  assigns out->x , out->y
*/
void select_min_xy(Point *ps , int ps_len , Point *out);
```

Anotasi tersebut menetapkan perilaku fungsi `select_min_xy` sebagai sebuah kontrak: prasyarat mengharuskan `out` menjadi penunjuk yang sah (yaitu menunjuk ke lokasi tempat sebuah Titik dapat dibaca) dan `ps` merupakan larik dengan panjang `ps_len` (yaitu `ps + i` merupakan penunjuk yang sah untuk $i = 0, \dots, n - 1$); dan pasca-syarat memastikan bahwa komponen-`x` dari titik yang dikembalikan dalam `out` lebih kecil atau sama dengan semua komponen-`x` dari titik-titik dalam `ps`, dan bahwa komponen-`y`-nya lebih kecil daripada komponen-`y` dari salah satu titik tersebut dalam `ps` di mana komponen-`x` sama; secara geometris, ini menetapkan bahwa `out` adalah titik paling kiri bawah dalam `ps`. Spesifikasi tersebut juga menyatakan bahwa ia hanya memodifikasi komponen-`x` dan `y` dari tempat `out` menunjuk (`assigns`); Ini disebut kondisi bingkai (dan sangat penting dalam C, karena jika tidak, kita tidak dapat memastikan fungsi tersebut tidak mengubah bagian lain dari status global).

Alat seperti Frama-C/Why3, VCC/Boogie, atau alat SAMS mereduksi notasi tersebut menjadi kondisi verifikasi, yang kemudian diselesaikan menggunakan pembuktian teorema



otomatis atau interaktif. Kisah sukses pendekatan ini mencakup verifikasi hypervisor, kompiler C, atau kernel sistem operasi. Dalam karya terbaru kami, kami telah memverifikasi secara formal algoritma kontrol untuk robot otonom, yang kami bahas secara rinci di bagian "Studi Kasus tentang Verifikasi Algoritma Robotika".

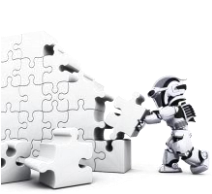
15.5 MERANCANG ALGORITMA

Dalam praktiknya, teknik verifikasi program yang diulas di bagian sebelumnya dapat menangani program berukuran sedang. Namun, dalam AUV umum, kita mungkin memerlukan algoritma kompleks dalam fungsi yang kritis terhadap keamanan; misalnya, untuk perencanaan rute, kita perlu menjamin bahwa AUV selalu dapat kembali ke ruang pengisian ulang dan tidak terombang-ambing tanpa daya di laut (atau di bawah air). Sebagian besar masalah relevan tersebut sulit dipecahkan secara komputasi, artinya, kita tidak dapat berharap untuk menemukan solusi optimal secara efisien (dalam waktu berjalan polinomial), jika $P \neq NP$, yang merupakan asumsi yang diyakini secara luas dalam teori kompleksitas. Karena efisiensi sangat penting dalam aplikasi bawah air dengan sumber daya komputasi yang sangat terbatas, kita harus menggunakan solusi suboptimal dengan jaminan matematis, dalam gagasan terkuat jaminan kasus terburuk, pada kualitas solusi.

Algoritma semacam itu bisa sangat canggih, dan karenanya tidak mudah diakses untuk verifikasi formal. Tanpanya, tidak ada jaminan bahwa mereka memberikan solusi yang benar dalam semua kasus; desain algoritma menyediakan metode solusi sebagai kotak hitam tanpa jaminan bahwa solusinya benar. Untuk mengurangi kompleksitas masalah verifikasi, kita memerlukan pemisahan perhatian. Pencarian solusi sangat kompleks (dan membutuhkan waktu superpolinomial), tetapi terdapat metode yang efisien (waktu polinomial) untuk memeriksa kebenaran solusi yang diberikan. Untuk memverifikasi algoritma yang kompleks, kita melakukan hal berikut: alih-alih memverifikasi pencarian solusi, kita memeriksa solusi yang telah ditemukan, dan memverifikasi prosedur pemeriksaan (yang lebih sederhana daripada pencarian itu sendiri, sehingga lebih mudah diimplementasikan dan diverifikasi). Hal ini menimbulkan tugas tambahan bagi perancang algoritma karena mereka tidak hanya perlu merancang algoritma untuk mencari solusi, tetapi juga cara untuk memeriksa kebenaran solusi tersebut. Algoritma ini disebut algoritma sertifikasi.

15.6 ALGORITMA DENGAN JAMINAN KASUS TERBURUK YANG KUAT

Jaminan kasus terburuk adalah ukuran paling ketat untuk kinerja suatu algoritma. Di sini, kami meminta deviasi relatif maksimum solusi algoritma dari solusi optimal atas semua (kemungkinan tak terhingga banyaknya) contoh masukan yang layak. Dalam AUV, persyaratan kinerja yang kuat seperti itu tampaknya krusial untuk menjamin fungsi. Area penelitian algoritma efisiensi dan aproksimasi menyediakan metode yang kuat dan efisien dengan jaminan kasus terburuk yang kuat untuk berbagai masalah yang relevan dengan sistem bawah air seperti penjadwalan, pencocokan, manajemen sumber daya, serta perutean dan eksplorasi. Kami berkontribusi pada pengembangan algoritma tersebut juga dalam konteks



parameter masukan yang tidak pasti, misalnya penjadwalan daring dan stokastik, penjadwalan periodik dan waktu nyata, serta algoritma perutean dan eksplorasi.

Dalam dua dekade terakhir, manajemen energi dan suhu menjadi kendala desain utama untuk perangkat komputasi modern. Hal ini menarik penelitian, khususnya tentang penskalaan kecepatan (atau penskalaan frekuensi/tegangan) sebagai teknik utama manajemen daya. Penelitian penjadwalan dengan penskalaan kecepatan dinamis diinisiasi oleh Yao. dan menarik penelitian tentang penjadwalan dengan batasan tenggat waktu yang ketat dengan tujuan meminimalkan konsumsi energi, untuk ikhtisar. Namun, tujuan penjadwalan lain seperti meminimalkan beban maksimum atau waktu penyelesaian pekerjaan rata-rata juga telah dipelajari dalam konteks energi.

15.7 ALGORITMA SERTIFIKASI

Algoritma sertifikasi adalah algoritma yang menghasilkan sertifikat atau bukti pada setiap keluaran yang menyatakan bahwa keluaran tersebut benar; Dengan memeriksa (memeriksa) bukti, pengguna dapat memeriksa apakah keluaran tersebut benar, atau menolak keluaran tersebut karena cacat. Prosedur pemeriksaan seharusnya jauh lebih sederhana daripada algoritma yang menghasilkan bukti dan karenanya jauh lebih mudah untuk teknik verifikasi. Secara matematis, diberikan suatu algoritma yang menghitung suatu fungsi $f : X \rightarrow Y$, versi algoritma sertifikasi dari algoritma ini terdiri dari suatu fungsi $fC : X \rightarrow Y \times W$, bersama-sama dengan suatu fungsi pengecekan $c : X \times Y \times W \rightarrow \text{Bool}$, sehingga fC menghitung hasil yang sama dengan f , dan fungsi pengecekan tersebut benar jika hasilnya benar, yaitu jika $fC(x) = (y, w)$ dan $c(x, y, w)$ maka $f(x) = y$.

Pengguna tidak lagi bergantung pada program sebagai kotak hitam tetapi dapat memverifikasi apakah solusinya benar. Algoritma sertifikasi telah diusulkan oleh Blum dan Kannan. Lebih dari 100 algoritma sertifikasi telah diketahui dan banyak algoritma buku teks telah diimplementasikan, misalnya dalam LEDA, suatu Library of Efficient Data types and Algorithms.

Contoh: Mencari Bidang Geometris

Sebagai contoh dari aplikasi robotik, pertimbangkan masalah menemukan titik dasar dalam pengukuran sensor lidar 3D. Kita dapat merumuskan kembali masalah ini secara matematis: diberikan himpunan titik $M \subseteq R^3$ (pengukuran sensor lidar), temukan bidang $\theta(n, d)$ yang diberikan oleh vektor normal n dan jarak $d \in R$ ke titik asal, sehingga setidaknya ρ titik memiliki jarak kurang dari δ dari bidang ini:

$$\#\{P \mid P \in M, |n \cdot P - d| \leq \delta\} \geq \rho \quad (15.1)$$

di mana $\# X$ adalah kardinalitas himpunan X . Masalahnya adalah kita harus menentukan bidang dan himpunan bagian titik pengukuran yang berpotensi termasuk dalam bidang ini secara bersamaan. Pendekatan umum untuk masalah seperti ini adalah algoritma maksimisasi ekspektasi: kita mulai dengan estimasi awal, dan mengulangi dua langkah penyempurnaan untuk menentukan titik mana yang termasuk dalam tebakan saat ini untuk



suatu bidang (yaitu titik mana yang memiliki jarak kurang dari δ ke bidang), dan bidang mana yang memaksimalkan jumlah titik yang termasuk di dalamnya. Algoritma ini didasarkan pada model probabilistik, di mana titik-titik yang diukur didistribusikan secara normal di sekitar bidang sebenarnya (yang ditentukan oleh algoritma EM); argumentasi bahwa ia menghasilkan bidang yang memenuhi (1) menggunakan penalaran stokastik yang cukup canggih. Sebaliknya, diberikan bidang (n, d) , Persamaan (1) mudah untuk diperiksa untuk sekumpulan titik – kita hanya mengulangi titik-titik P di M dan menghitung jarak $n \cdot P$. Ini adalah prosedur pemeriksaan kita, dan saksi diberikan oleh bidang.

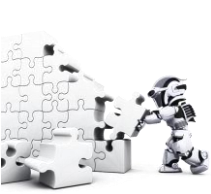
15.8 STUDI KASUS VERIFIKASI ALGORITMA ROBOTIKA

Sebagai studi kasus, kami mempertimbangkan karya kami sebelumnya pada proyek SAMS (Komponen Keselamatan untuk Sistem Bergerak Otonom). Proyek ini secara formal memverifikasi implementasi C dari algoritma penghindaran tabrakan untuk kendaraan darat otonom menggunakan pembukti teorema interaktif logika orde tinggi Isabelle. Berdasarkan pembuktian tersebut, implementasinya disertifikasi oleh TÜV-Süd sesuai dengan EN 61508-SIL 3.



Gambar 15.3 Demonstran SAMS yang sedang melaju di tikungan kanan dan zona aman bebas tabrakan pada pergerakan tersebut. Jika terdapat halangan di dalam zona aman, AGV akan berhenti. Masukan ke algoritma adalah kecepatan dan kecepatan sudut (panah kuning), yang ditentukan dengan interval ketidakpastian. Keluaran adalah zona aman (hijau) sebagai array jarak ke berbagai arah relatif terhadap kendaraan.

Gambar 15.3 menunjukkan fungsionalitas keselamatan yang disediakan oleh algoritma tersebut. Algoritma ini menerima masukan berupa kecepatan v dan kecepatan sudut ω kendaraan, yang ditentukan dengan ketidakpastian sebagai interval $[v_{min} \dots v_{maks}]$ dan $[\omega_{min} \dots \omega_{maks}]$. Keluarannya adalah zona aman (hijau) sebagai larik jarak dalam berbagai arah relatif terhadap kendaraan. Larik ini dapat dibandingkan secara langsung dengan



pembacaan sensor jarak lidar yang menghentikan kendaraan jika jaraknya di bawah jarak yang mewakili zona aman. Gambar 15.4 menunjukkan langkah inti komputasi.

Kami telah membuktikan secara formal pernyataan keselamatan berikut: Jika kendaraan memiliki kecepatan sejati v dan kecepatan sudut ω dalam interval masukan yang sesuai dan mulai mengerem pada siklus berikutnya, seluruh bodinya akan tetap berada di dalam zona aman yang dihitung. Ini berarti bahwa jika zona aman bebas, kendaraan dapat terus melaju pada siklus ini. Pernyataan keselamatan ini tentu saja didasarkan pada asumsi fisik tentang perilaku pengereman kendaraan.

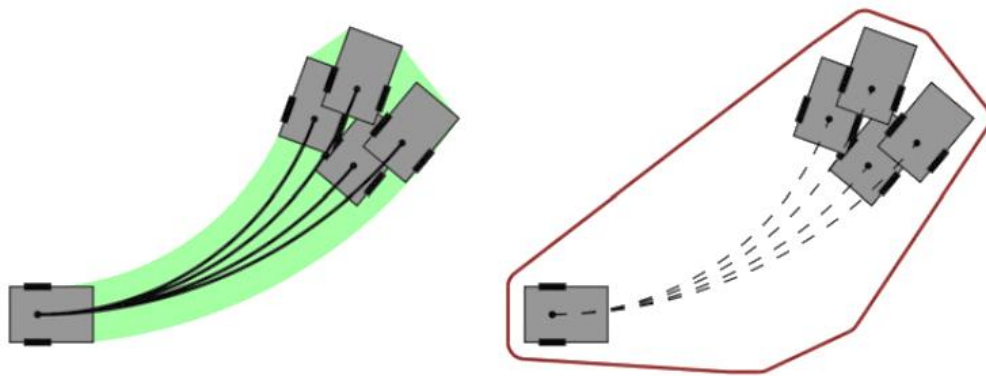
15.8 TANTANGAN YANG DIHADAPI

Pembuktian ini mengandung sejumlah tantangan yang kami yakini umum terjadi pada perangkat lunak robotika:

- **Aliasing pointer:** C, seperti banyak bahasa pemrograman imperatif lainnya, memungkinkan nama yang berbeda merujuk ke lokasi memori yang sama. Oleh karena itu, tidaklah mudah untuk menyimpulkan bahwa setelah penugasan, semua hal lainnya tetap tidak berubah. Sebagian besar pembuktian terkait implementasi adalah menyimpulkan kondisi kerangka seperti ini.
- **Ketidakpastian:** Besaran yang diukur selalu tidak pasti, yang perlu diperhitungkan, dalam contoh SAMS sebagai interval nilai yang mungkin.
- **Geometri dan fisika:** Algoritma robotika sering kali membahas pertanyaan geometris atau fisika dan pembuktian kebenarannya memerlukan teorema domain yang substansial. Misalnya, untuk SAMS, teori himpunan cembung dan transformasi benda tegar diperlukan.
- **Teorema domain:** Seringkali pertimbangan geometris dan fisika bermuara pada teorema domain turunan. Membuktikannya dalam pembukti teorema bisa sangat membosankan bahkan untuk perhitungan yang tampak sederhana bagi seorang insinyur manusia. Untuk SAMS, contohnya adalah rumus yang memberikan batasan jarak antara convex hull dari empat ekstrem (v, ω) pada Gambar 4 dan himpunan lengkung sejati yang muncul dari semua (v, ω) . Pada dasarnya, rumus ini merupakan batasan selisih antara fungsi non-linier dan ruas garis yang menghubungkan dua titik pada fungsi tersebut.

Untuk mengatasi tantangan ini, kami menggunakan pembuktian teorema interaktif Isabelle, di mana pengguna harus menulis skrip pembuktian yang menerapkan serangkaian taktik pembuktian. Pengembangan skrip ini memakan waktu 30 bulan kerja, yang merupakan waktu yang cukup lama. Namun, banyak waktu dihabiskan untuk bagian-bagian yang agak membosankan, khususnya terkait aliasing pointer dan rumus. Hal ini dapat ditingkatkan di masa mendatang dengan mengembangkan taktik pembuktian khusus untuk tugas ini. Namun, perlu ditegaskan bahwa alasan utama di balik tantangan ini adalah pendekatan formal ini tidak memungkinkan adanya jalan pintas; setiap kasus dan asumsi harus diperhatikan. Tingkat detail yang sangat tinggi ini menghasilkan lebih banyak pekerjaan, tetapi juga tingkat keyakinan yang jauh lebih tinggi terhadap hasil.





Gambar 4. Langkah sentral Algoritma SAMS: Zona aman harus mencakup semua titik kendaraan pada semua momen waktu (selama pengereman) untuk setiap kecepatan v dan kecepatan sudut ω dalam interval masukan $[v_{min} \dots v_{max}]$ dan $[\omega_{min} \dots \omega_{max}]$. Untuk gabungan ini (hijau) poligon pembatas (merah) dihitung sebagai lambung cembung dari empat kasus ekstrem (v_{min}, ω_{min}) , (v_{min}, ω_{max}) , (v_{max}, ω_{min}) , (v_{max}, ω_{max}) (abu-abu) dan menambahkan penyangga yang membatasi nonlinier dalam persamaan gerak melingkar

Tantangan Lebih Lanjut

Meskipun algoritma yang dipilih merupakan contoh realistis dan non-trivial, perangkat lunak robotika pada umumnya mengandung beberapa tantangan yang tidak terjadi di sana:

- **Presisi terbatas:** int dan float diabstraksikan ke Z dan R, sehingga pembuktiannya tidak mencakup luapan dan aritmatika floating point, dua tantangan yang sangat sulit. Luapan sebagian besar dapat ditangani secara otomatis dengan interpretasi abstrak, aritmatika floating point lebih rumit.
- **Ukuran:** Dengan 2804 baris kode, algoritma ini tergolong kecil untuk standar robotika.
- **Pembelajaran:** Sepengetahuan kami, belum ada pendekatan untuk memverifikasi algoritma secara formal berdasarkan pembelajaran mesin atau jaringan saraf tiruan.
- **Tugas yang tidak dapat diformalkan:** Ada banyak tugas dalam robotika yang secara eo ipso tidak dapat diformalkan. Contoh terpenting adalah pengenalan objek dalam gambar, di mana tantangan utamanya adalah kita tidak dapat mendefinisikan secara matematis bagaimana suatu objek akan muncul dalam gambar.

15.9 KESIMPULAN

Titik awal pertimbangan kami adalah bahwa verifikasi dan jaminan yang kuat sangat penting bagi robotika bawah air. Untungnya, ada banyak metode dan alat yang dapat membantu upaya kami, seperti yang telah kami tunjukkan sebelumnya.

Namun, verifikasi tidak akan pernah menjadi solusi yang sempurna kami juga perlu memastikan bahwa spesifikasinya sendiri sudah benar dan memadai. Masalah ini disebut validasi, dan melengkapi verifikasi. Misalnya, bagaimana kami menentukan kemungkinan rintangan? Harus ada ukuran minimum rintangan, jika tidak, setiap rumput laut yang kecil pun dapat menjadi rintangan yang tak teratasi. Lebih lanjut, spesifikasi rintangan perlu melengkapi sensor yang digunakan untuk mendeteksinya. Misalnya, sensor lidar biasanya mengukur awan

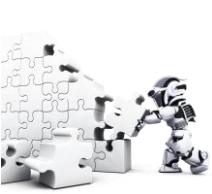


titik. Jika kami hanya menentukan rintangan sebagai awan titik, maka mudah untuk mengimplementasikan deteksi menggunakan pemindai lidar, tetapi menentukan ukuran minimum rintangan bukanlah hal yang mudah. Oleh karena itu, model proses yang umum untuk mengembangkan sistem kritis-keselamatan mengamankan proses terstruktur, dimulai dengan daftar persyaratan keselamatan, dipecah menjadi spesifikasi pada tingkat modul dan fungsi sebelum diimplementasikan, dan dilengkapi oleh proses V&V (verifikasi dan validasi) pada semua tingkatan.

Ada banyak proses pengembangan yang mapan untuk sistem kritis-keselamatan, khususnya norma DO-178B untuk sistem udara yang juga digunakan di sektor luar angkasa. Jika kita menganggap analogi bawah air ke luar angkasa dengan serius, kita harus menyelidiki sejauh mana kita ingin menerapkan proses pengembangan ini di bidang pengembangan perangkat lunak untuk sistem bawah air, mengingat bahwa menggunakan model pengembangan ini akan meningkatkan waktu dan biaya. Lebih umum, perangkat lunak robotika sering menggunakan teknik heuristik, probabilistik atau subsymbolic yang sulit diverifikasi, atau terkadang bahkan sulit untuk ditentukan sejak awal (misalnya pengenalan gambar). Oleh karena itu, kita perlu memilih "titik optimal" yang sesuai dengan spesifikasi dan verifikasi formal, dan merancang sistem kita sedemikian rupa sehingga idealnya subsistem yang dapat diverifikasi ini membentuk bagian operasional dari sistem.

Misalnya, kita dapat merancang pengontrol AUV kita sedemikian rupa sehingga kita memiliki lapisan kontrol bawah yang menjamin bahwa tidak ada perintah kemudi yang menyebabkan robot menabrak rintangan, yang kita verifikasi secara formal; dan sebagai tambahan, terdapat lapisan atas yang mengimplementasikan penghindaran rintangan dalam hal perintah kemudi yang diteruskan ke lapisan kontrol bawah, yang kemudian tidak perlu kita verifikasi, karena jika lapisan atas menghasilkan perintah yang akan menyebabkan robot menabrak rintangan, lapisan kontrol bawah akan memblokirnya. Pertanyaan tentang merancang sistem dengan cara yang dapat diverifikasi ini berkaitan erat dengan merancang algoritma dengan cara yang dapat diverifikasi, yaitu merancang algoritma yang efisien dengan jaminan yang kuat dan algoritma sertifikasi untuk domain robotika.

Secara keseluruhan, kami yakin bahwa verifikasi dapat dan akan memainkan peran penting dalam mengembangkan sistem robotika bawah air yang aman dan andal. 1Dalam bentuk di atas, tidak sepenuhnya: yang kurang adalah persyaratan bahwa `out` sebenarnya merupakan salah satu poin dalam `ps`.



BAB 16

SISTEM MANAJEMEN MISI KOLABORATIF MANUSIA-ROBOT

Untuk memungkinkan perencanaan tugas dan koordinasi kooperatif antara operator manusia dan tim robot, diperlukan jenis antarmuka baru. Kami menyajikan sistem manajemen misi strategis interaktif (ISMMS) untuk eksplorasi bawah air yang dilakukan oleh tim gabungan robot dan peneliti manusia yang memungkinkan perencanaan tugas dan koordinasi kooperatif antara operator manusia dan tim robot. Tujuan utama ISMMS adalah untuk memungkinkan robot "menjelaskan" maksud, masalah, dan situasi mereka dengan cepat dan intuitif kepada manusia, untuk memungkinkan perpaduan yang mulus antara perilaku otonom dan kendali manusia, untuk menyediakan antarmuka cerdas untuk kendali eksternal wajib, dan untuk memungkinkan pembagian tugas adaptif sekaligus dioptimalkan sehubungan dengan penggunaan dan interaksi intuitif yang diukur berdasarkan data perilaku dan fisiologis manusia.

16.1 PENDAHULUAN

Sistem otonom yang bekerja sama dengan sensor eksternal untuk membangun jaringan sensor, komputasi, kendali, dan mesin yang terdistribusi didefinisikan sebagai sistem siber-fisik (CPS). Mereka menunjukkan kemampuan tinggi untuk aktivitas yang dinamis dan kompleks yang sering mengungguli manusia terutama di lingkungan yang tidak bersahabat atau ketika penginderaan dan tindakan manusia dibatasi seperti di bawah air. Namun, manusia dapat mengatasi ambiguitas, model yang tidak lengkap, dan data yang salah dengan lebih baik daripada sistem otonom. Menggabungkan kemampuan sistem yang sangat gesit dan otonom dengan kecerdasan yang luar biasa dan fleksibilitas yang lebih tinggi secara keseluruhan menjadi agensi yang terdistribusi atau hibrida antara manusia dan teknologi memerlukan pengembangan antarmuka dua arah yang intuitif yang mendukung penugasan alami, mekanisme untuk mencapai transparansi tentang perilaku rekan satu tim, dan status keyakinan umum.

Pengembangan antarmuka ini untuk diterapkan pada, misalnya, sekelompok atau beberapa kelompok AUV serta robot yang mampu berjalan di atas dasar laut untuk memanipulasi di bawah air dalam tugas jangka panjang, misalnya, memantau dan menyelidiki organisme bentik atau epi-bentik di dasar laut atau manuver di kolom air atau dekat dengan permukaan air memerlukan solusi baru dan membuka bidang pertanyaan dan tantangan penelitian yang luas. Salah satu tujuan penting antarmuka antara manusia dan robot adalah memberikan gambaran umum yang cepat dan mudah dipahami kepada peneliti manusia tentang situasi lingkungan serta sistem robotik untuk memungkinkan interaksi intuitif.

Robot harus "kognitif" dalam arti persyaratan Brachman bahwa mereka "tahu apa yang mereka lakukan". Lebih lanjut, umpan balik dari sistem robotik kepada manusia harus tersedia, terutama dalam situasi di mana intervensi operator dapat memperburuk kinerja otonom. Hal ini sangat penting karena intervensi manusia berisiko menghambat keberhasilan pelaksanaan



rencana misi. Oleh karena itu, antarmuka harus memberikan umpan balik kepada manusia tentang kemungkinan konsekuensi dari intervensi manusia. Lebih lanjut, umpan balik juga sangat relevan dalam kasus di mana sistem robotik mungkin memerlukan bantuan operator. Untuk memungkinkan aliran informasi yang kaya namun juga mudah dipahami, antarmuka harus menggunakan model 4D lingkungan berdasarkan data sensor nyata, termasuk perubahan kelimpahan dan distribusi ukuran-frekuensi organisme dalam massa air dan habitat yang dipantau.

Antarmuka berbasis Realitas Virtual sangat relevan di sini karena mereka membenamkan pengguna ke dalam situasi dan jika dikombinasikan dengan simulasi memungkinkan wawasan yang merata ke dalam situasi jika data sensor buruk, yaitu, visibilitas yang buruk. Dikombinasikan dengan alat interaksi yang sesuai, interaksi manusia-mesin tidak hanya menjadi intuitif tetapi juga akan menghasilkan pengurangan jumlah kesalahan interaksi. Pada saat yang sama antarmuka ini harus memungkinkan pakar untuk campur tangan saat dibutuhkan atau bahkan mengambil alih kendali dengan mudah.

Ketika mengembangkan antarmuka multimoda kompleks yang memungkinkan interaksi yang begitu intens, harus dipastikan bahwa kelebihan beban kognitif operator dicegah. Hal ini penting untuk memanfaatkan sepenuhnya kemampuan sistem robotik untuk melakukan persisten dan dapat diprediksi serta kemampuan manusia yang luar biasa untuk mengatasi ambiguitas, model yang tidak lengkap, dan data yang salah. Meskipun mudah dilacak bahwa kelebihan beban kognitif harus dihindari, tidaklah mudah untuk mengukur kelebihan beban kognitif manusia karena penelitian intensif yang sudah sangat awal menunjukkan bahwa banyak sumber daya memungkinkan otak manusia untuk menangani dan mendistribusikan beban kerja dengan sangat efisien di satu sisi, sementara di sisi lain tugas-tugas spesifik, misalnya, modalitas yang sama dapat menghabiskan sumber daya yang tersedia dengan cepat.

Meskipun pengetahuan yang diperoleh harus diperhitungkan selama perancangan antarmuka, perlu ditekankan bahwa adaptasi antarmuka sangat relevan untuk mengatasi perubahan beban mental atau kognitif atau perhatian pengguna. Namun, untuk adaptasi daring, ukuran daring harus ditemukan. Di sini, data psikofisiologis merupakan pilihan yang baik karena memungkinkan wawasan permanen ke dalam keadaan manusia tanpa perlu ekspresi aktif dari pengguna dan bahkan dapat digunakan untuk menangkap kurangnya perilaku terbuka. Terutama aktivitas otak yang tertanam ke dalam data manusia atau sistem lain dan konteks interaksi sebagaimana diterapkan oleh Brain Reading yang tertanam menyediakan pendekatan yang siap diterapkan untuk membuka jendela ke dalam pikiran manusia berdasarkan aktivitas otak. Oleh karena itu, aktivitas otak seperti yang direkam oleh elektroensefalogram (EEG) dapat digunakan untuk meningkatkan antarmuka interaksi luring maupun daring.

Selain dukungan yang dijelaskan oleh alat VR adaptif, antarmuka hanya dapat mendukung perencanaan misi dengan penyebutan sebelumnya ketika terkait erat dengan sistem representasi dan penalaran pengetahuan. Basis pengetahuan semacam itu akan mendukung berbagai tujuan seperti spesifikasi tujuan keseluruhan misi bawah air dan

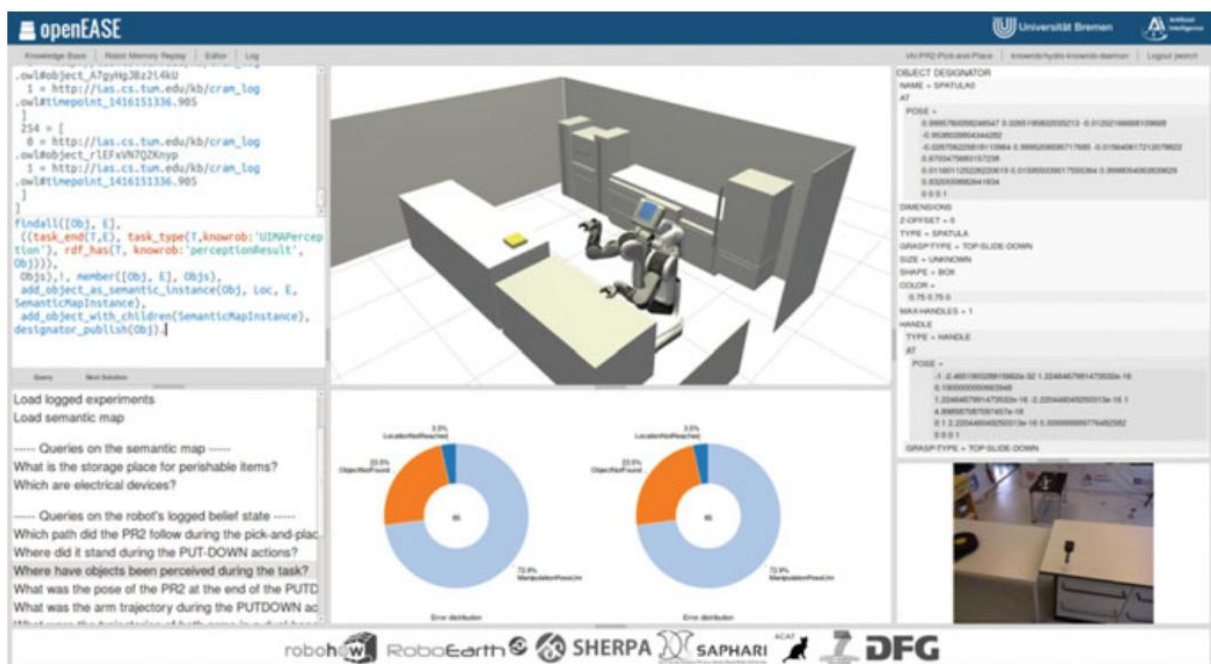


subtugasnya, pemilihan peralatan yang sesuai (jenis AUV dasar, konfigurasi spesifik misi, dan pengaturan parameter), penentuan prioritas tujuan, distribusi subtugas kepada anggota tim, penanganan kegagalan, dll. Berkat basis pengetahuan yang terhubung, sistem dapat mendukung perencanaan misi dengan menyediakan, misalnya, pemeriksaan konsistensi.

Namun, ketika intervensi manusia memerlukan adaptasi rencana misi, antarmuka semacam itu harus adaptif terhadap konteks dan perubahan dalam misi jangka panjang yang sedang berjalan. Singkatnya, untuk mengembangkan antarmuka bagi manajemen misi strategis yang interaktif, perencanaan misi daring yang adaptif, strategi untuk penanganan masalah dan kegagalan, pola interaksi prototipe untuk tim manusia-robot, simulasi ringan, dan antarmuka manusia-robot yang cerdas diperlukan untuk mendukung berbagai tingkat otonomi secara optimal.

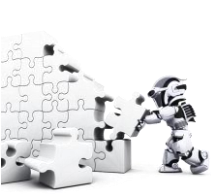
16.2 PENALARAN PENGETAHUAN UNTUK MISI BAWAH AIR JANGKA PANJANG

Kemampuan alami untuk "mengetahui apa yang mereka lakukan" difasilitasi melalui kerangka kerja representasi pengetahuan dan penalaran (KRR) baru yang memungkinkan robot bawah air otonom untuk berperan sebagai asisten sains (penyelam) dalam misi sains jangka panjang di bidang biologi kelautan.



Gambar 16.1 openEASE adalah layanan pengetahuan berbasis web yang menyediakan data aktivitas robot dan manusia. Layanan ini berisi data mentah yang dianotasi secara semantik, menyediakan bahasa kueri dan mesin inferensi yang canggih, serta alat visualisasi.

Kerangka kerja KRR harus mampu merepresentasikan robot dan kapabilitasnya, ekosistem bawah air termasuk hewan dan tumbuhan, misi penelitian, serta pengetahuan buku teks dan penelitian dari ilmu kelautan, termasuk data dari layanan data penelitian (Gambar



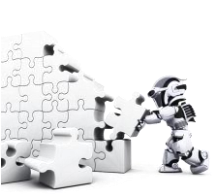
16.1), seperti Pangea. Melaksanakan misi sains kelautan menghadirkan kombinasi tantangan unik bagi kapabilitas KRR agen robotik otonom:

- merepresentasikan dan menalar tentang evolusi jangka panjang ekosistem bawah air, termasuk perilaku dan populasi melalui hewan;
- mendasarkan pengetahuan abstrak dan pakar dalam ilmu kelautan ke dalam siklus persepsi-aksi robot bawah air;
- menerjemahkan pengamatan menjadi model spasio-temporal ekosistem bawah laut yang dapat dipahami mesin;
- menggali hipotesis penelitian dari model spasio-temporal ekosistem bawah laut dan mengusulkan tugas observasi untuk mengumpulkan bukti untuk menyelidikinya; dan
- manajemen yang berpengetahuan dan pelaksanaan misi penelitian bawah laut secara otonom dalam jangka panjang.

Kerangka kerja KRR akan dibangun di atas replikasi digital ekosistem yang diamati secara detail dan dapat dipahami mesin, yang kami sebut basis pengetahuan kembaran digital (dtKB). Anda dapat membayangkan dtKB sebagai animasi ekosistem (foto-)realistik, di mana setiap tumbuhan, hewan, dan wilayah yang dianimasikan memiliki nama simbolis yang dikombinasikan dengan pengetahuan ontologis dan latar belakang dari ensiklopedia simbolis ilmu kelautan. Pengetahuan ensiklopedis, pengetahuan buku teks, serta data penelitian yang relevan disediakan dan disusun secara konseptual oleh ilmuwan kelautan yang juga akan mendukung pembuatan animasi ekosistem yang realistis. Tantangan penelitian kedua adalah memodelkan sumber data penelitian yang ada sebagai basis pengetahuan web semantik untuk mengotomatiskan pekerjaan dengan layanan data ini menggunakan penalaran simbolik dan metode pembelajaran mesin.

Kerangka kerja KRR akan didasarkan pada sistem representasi dan penalaran pengetahuan KnowRob. KnowRob sejauh pengetahuan kami adalah sistem pengetahuan yang paling banyak digunakan untuk agen robotik. Ekstensi baru dari kerangka kerja tersebut mencakup rekonstruksi rasional yang disebut KnowRob2 dan ekstensi menuju representasi dan penalaran pengetahuan yang mendukung mesin permainan. Aktivitas penelitian eksploratif pertama menuju kemampuan untuk merepresentasikan lingkungan luar ruangan alami dan mengintegrasikan informasi dari sistem informasi geografis ke dalam representasi pengetahuan robot telah dilakukan dalam proyek Sherpa yang menyelidiki tim robot manusia campuran yang mencari korban setelah longsor salju.

Persyaratan terkait ketahanan dan fleksibilitas basis pengetahuan dasar dalam proyek Sherpa serupa dengan yang diadopsi dalam skenario misi bawah air jangka panjang di sini, termasuk kemampuan untuk bertindak di lingkungan yang tidak dikenal, dan untuk menangani keadaan yang sangat sulit bagi rutinitas persepsi robot. Mirip dengan skenario penyelamatan pegunungan Sherpa, basis pengetahuan harus mendukung interaksi yang kompleks antara anggota tim yang heterogen, masing-masing dengan kemampuan dan peran misi yang berbeda. Komunikasi yang terbatas selama misi karena kendala waktu dan bandwidth merupakan paralel lain dari kedua skenario tersebut.



Kerangka kerja KRR juga akan didasarkan pada openEASE, layanan pengetahuan berbasis web akses terbuka yang berbasis pada KnowRob (lihat Gambar 1). openEASE khususnya akan membantu mengakses basis pengetahuan menggunakan bahasa kueri berbasis logika. OpenEASE menawarkan berbagai visualisasi konten KB, termasuk visualisasi 3D robot, lingkungannya, lintasan yang mereka lakukan, serta lapisan logika interval untuk menunjukkan hubungan temporal antara berbagai peristiwa. Selain itu, openEASE dilengkapi dengan visualisasi standar untuk pola statistik yang lebih abstrak dalam data, dan antarmuka untuk mengimpor dan mengeksport pengetahuan dari/ke basis pengetahuan lain. openEASE juga akan berfungsi sebagai antarmuka antara basis pengetahuan robot dan operator manusia, dan juga mendukung pertukaran pengetahuan langsung antar robot.

16.3 ANTARMUKA VR-OTAK INTUITIF YANG DIOPTIMALKAN

Meskipun manusia sangat lincah dalam interaksi dan pengambilan keputusan, diketahui bahwa mereka memiliki keterbatasan dalam kapasitas memori kerja dan sangat terbatas dalam mendistribusikan perhatian, yang seringkali menyebabkan penyaluran perhatian dan penyempitan kesadaran situasional. Oleh karena itu, wajar untuk berasumsi bahwa representasi lingkungan robot yang kompleks dan sangat bervariasi yang disajikan oleh kerangka kerja KRR dapat menimbulkan stres pada operator manusia. Stresor dapat berupa kecemasan, tekanan waktu, alur kerja mental, atau luapan informasi, yang semuanya akan membahayakan pengambilan keputusan manusia. Karena alasan-alasan ini, kami akan mengembangkan lebih lanjut antarmuka yang harus:

- transparan, yaitu, memungkinkan wawasan yang mudah dan jelas bagi manusia tentang interaksi kompleks antara parameter sistem dan perubahan lingkungan,
- fleksibel terhadap perubahan cepat yang didorong oleh pengguna dalam tujuan, tergantung pada kendala lingkungan dan sistem,
- adaptif terhadap kondisi mental atau emosional manusia,
- dan memberikan umpan balik yang mudah dipahami kepada manusia tentang kemungkinan konsekuensi dari intervensi manusia

Meskipun informasi yang akurat dan kesadaran situasional sangat penting bagi keberhasilan misi, penyajian informasi dinamis kompleks yang dikumpulkan oleh KRR kepada operator sistem harus sedemikian rupa sehingga memandu dan mendukung proses pengambilan keputusan dan kesadaran situasionalnya serta mendukung transparansi tanpa menyebabkan kelebihan beban kognitif. Untuk mencapai hal ini, parameter desain tertentu perlu dipertimbangkan untuk mendukung aktivitas pemecahan masalah tingkat tinggi dan meningkatkan kesadaran situasional sekaligus memungkinkan akses ke fitur tingkat rendah atau tingkat abstraksi yang lebih rendah.

Hal yang terakhir ini dapat relevan ketika terdapat ketidaksesuaian antara model internal operator dan representasi eksternal. Meningkatnya ketersediaan informasi ini membawa beberapa tantangan. Untuk menghindari limpahan informasi, yang hampir tak terbatas mengingat kendali atas sistem atau sekelompok sistem yang kompleks yang menyediakan banyak informasi dengan berbagai tingkat daya tarik bersama dengan informasi



tentang tugas atau misi yang dilakukan, strategi harus dikembangkan untuk menentukan dan menampilkan relevansi dalam kelimpahan informasi. Berbagai pendekatan dapat diimplementasikan untuk menghindari kelebihan kognitif, seperti penyaringan, strategi isyarat, atau strategi peringatan, serta umpan balik. Lebih lanjut, realitas virtual (VR) dapat dimanfaatkan oleh operator untuk menciptakan kohesi yang mendalam antara operator dan sistem yang dioperasikan jarak jauh dan dalam lingkungan kerja yang kompleks dengan meningkatkan imersi dan perasaan berada di lokasi.

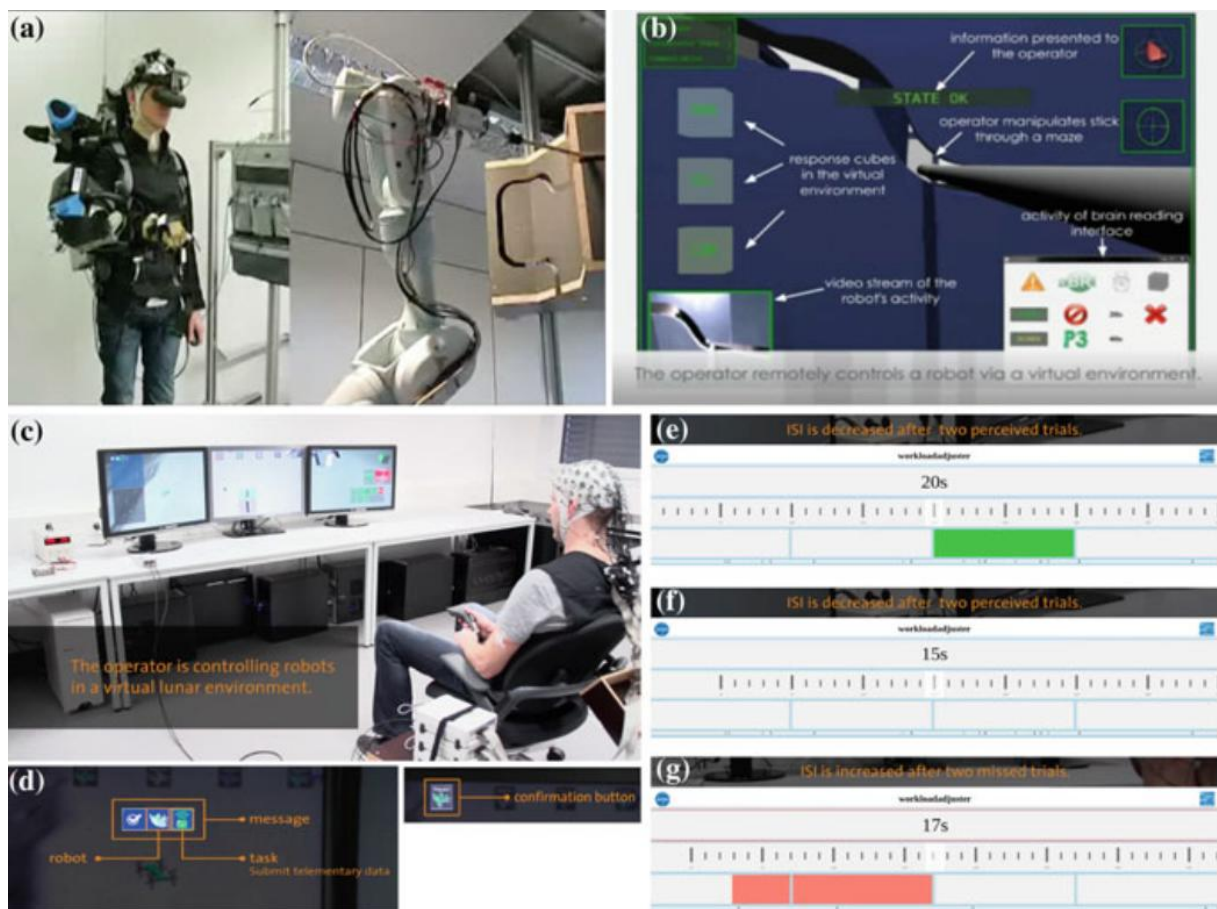
VR dapat membantu meningkatkan persepsi, pemahaman, dan peramalan operator terhadap suatu sistem dengan mengintegrasikan data yang dikumpulkan oleh sistem serta sensor di sekitarnya yang menampilkannya kepada operator dengan cara yang bermakna. Ini mungkin paling cocok untuk berfungsi sebagai citra real-time dari lingkungan sekitar, status sistem, rencana, atau tugas saat ini dan dapat memberikan wawasan yang terperinci maupun tingkat tinggi tentang situasi di lokasi sesuai permintaan. VR dapat berfungsi sebagai media antara kognisi manusia dan otomatisasi serta kontrol sistem untuk berinteraksi dengan data kompleks, yang biasanya membebani pikiran pengguna, untuk menyoroti relevansi tindakan untuk meminta permintaan interaksi dan untuk memberikan umpan balik yang mudah dipahami kepada manusia tentang kemungkinan konsekuensi dari intervensi manusia yang didukung oleh domain perencanaan.

Untuk mengoptimalkan ISMMS sehubungan dengan kondisi mental pengguna hanya sebagian dimungkinkan oleh hal-hal yang disebutkan di atas dan dengan menerapkan model pada sistem kognitif manusia, yang jarang dan sulit diterjemahkan ke dalam spesifikasi untuk antarmuka berbasis VR. Sebaliknya, pendekatan eksperimental harus dipilih yang mengukur stresor untuk mengidentifikasi kelemahan antarmuka. Pola perilaku manusia seperti pose kepala, arah pandangan atau ekspresi wajah dapat diidentifikasi yang berkorelasi dengan kondisi mental untuk menentukan misalnya tingkat kelelahan, stres, kebosanan, frustrasi, minat atau kebingungan menggunakan metode pembelajaran mesin. Hasil penelitian pada data perilaku menunjukkan bahwa pendekatan multimoda mengungguli penggunaan modalitas tunggal, sementara analisis rinci yang melemahkan temuan ini masih jarang.

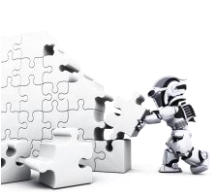
Selain data perilaku yang jelas, aktivitas otak adalah sumber yang baik untuk mendapatkan wawasan tentang keadaan manusia. Evaluasi keadaan kognitif subjek telah dianalisis dalam beberapa karya. Misalnya, telah diverifikasi bahwa elektroensefalogram (EEG) manusia dapat mencerminkan beban kerja mental. Perubahan yang berbeda dalam pola EEG dapat diamati yang mengubah keadaan mental. Ketika meningkatkan beban kerja (misalnya, dengan melakukan banyak tugas sekaligus), potensial terkait peristiwa (ERP) P300 menurun amplitudonya. Perubahan karena perubahan tingkat beban kerja juga diamati dalam pita frekuensi EEG, misalnya, alfa menurun dan theta meningkat dalam sebagian besar penelitian ketika meningkatkan beban kerja mental. Penelitian lain telah menunjukkan perubahan aktivitas alfa, beta, dan theta yang terkait dengan kelelahan pengguna (misalnya, peningkatan daya alfa dan theta ketika meningkatkan kelelahan mental). Selain itu, tingkat stres operator dapat dievaluasi dari aktivitas EEG. Bahkan keadaan emosional dapat dibuktikan dapat dideteksi berdasarkan sinyal EEG.



Meskipun pengukuran perilaku terbuka lebih mudah dikumpulkan, data fisiologis tertutup seperti EEG menyediakan akses permanen ke keadaan manusia yang paling relevan untuk mengadaptasi antarmuka demi kolaborasi manusia-mesin yang optimal. Misalnya, keadaan kognitif menawarkan informasi tambahan yang dapat bermanfaat untuk adaptasi atau kontrol antarmuka, mesin, atau program komputer. Bukan hanya karena alasan ini, tetapi untuk lebih memahami dan mendeskripsikan konteks interaksi, masuk akal untuk menggabungkan data tertutup dan terbuka guna meningkatkan wawasan ke dalam pikiran manusia dan untuk lebih mendukungnya dalam situasi tertentu.



Gambar 16.2 Dua contoh antarmuka berbasis VR daring yang diadaptasi oleh eBR: **a** Teleoperasi nyata lengan robot yang didukung oleh **b** Lingkungan VR yang memberikan informasi 3D kepada pengguna, memungkinkan peralihan antara kontrol robot dan respons terhadap peringatan atau informasi lainnya, sementara eBR menyimpulkan keterlibatan tugas dan apakah operator akan merespons peringatan ketika peringatan tersebut dikenali atau tidak jika tidak dikenali. Jika eBR menyimpulkan bahwa operator mengenali peringatan yang diizinkan, waktu respons ditingkatkan. **c** Antarmuka berbasis VR untuk teleoperasi tim multi-robot. **d** Informasi disajikan secara simbolis yang mudah dikenali. Dengan merespons representasi gambar robot, antarmuka memeriksa pemahaman tugas yang benar dan langsung menampilkan robot yang dipilih di layar pusat ke fokus operator. **e**: Waktu antar peringatan (interstimulus interval (ISI)) berkurang d ketika eBR menyimpulkan keterlibatan



tugas operator yang tinggi. g Waktu antar peringatan bertambah jika eBR menyimpulkan keterlibatan tugas berkurang.

Untuk alasan ini, Embedded Brain Reading (eBR) dikembangkan yang memungkinkan prediksi daring tentang keadaan mental manusia (lihat Gambar 16.2) atau niat yang akan datang. Kami ingin menerapkan eBR tidak hanya untuk mengoptimalkan ISMMS yang akan dikembangkan sehubungan dengan transparansinya dan untuk menghindari beban kognitif atau emosional yang tidak perlu pada pengguna tetapi juga untuk mengevaluasi secara online, tugas mana yang sangat menuntut pada manusia dan di satu sisi dapat didukung dengan lebih baik oleh sistem yang berinteraksi atau di sisi lain harus dibawa ke kesadaran operator untuk menghindari keputusan yang salah oleh manusia yang disebabkan oleh stresor. Selain itu, potensi terkait kesalahan (ErrPs) harus digunakan sebagai umpan balik implisit manusia untuk meningkatkan perilaku robot berdasarkan pendekatan pembelajaran (misalnya pembelajaran penguatan).

Faktanya, ErrPs sebagai umpan balik manusia sangat berharga dalam pembelajaran robotik. Terutama, dalam situasi tugas yang kompleks, tidak selalu mudah untuk menggambarkan seluruh situasi robot (perilaku dan lingkungan) dan untuk memperhitungkan semua kemungkinan situasi tak terduga sebelumnya. Oleh karena itu, sulit atau tidak mungkin untuk menentukan fungsi penghargaan dalam pembelajaran penguatan dalam situasi tugas yang kompleks seperti itu. Namun, ErrP secara intrinsik dibangkitkan dalam otak manusia dan tidak memerlukan evaluasi situasi secara eksplisit. Dalam sebuah studi terbaru, penggunaan ErrP secara daring dalam aplikasi robotik dunia nyata telah berhasil ditunjukkan dalam kendali robot berbasis gestur, di mana robot sungguhan tidak hanya mempelajari gestur tetapi juga strategi perilakunya (kebijakan kendali), yaitu pemetaan antara gestur dan tindakan secara waktu nyata berdasarkan umpan balik manusia yang dibangkitkan secara intrinsik (ErrP) dalam pembelajaran penguatan.

16.4 KESIMPULAN

Kontrol robot berbasis kognisi dan AI, bersama dengan antarmuka dua arah yang intuitif, akan menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk mewujudkan manajemen misi yang kompeten bagi tim manusia-robot dalam misi laut dalam. Dalam makalah ini, kami mengusulkan untuk menggunakan kerangka kerja representasi dan penalaran pengetahuan KnowRob sebagai dasar penerapan sistem kontrol robot "yang tahu apa yang mereka lakukan" dan robot yang dapat ditugaskan secara alami. Kerangka kerja representasi dan penalaran pengetahuan ini dikombinasikan dengan teknologi antarmuka terdepan yang disesuaikan dengan persyaratan tugas atau misi yang sedang dikerjakan serta kondisi operator yang diinferensi oleh eBR. Teknologi ini mentransfer informasi kepada operator secara intuitif dan mudah dipahami melalui teknik VR dalam berbagai tingkat detail, tergantung pada tugas atau permintaan operator.

Kombinasi keduanya memungkinkan operator untuk dengan mudah memahami apa yang sedang dilakukan robot kapan saja, didukung oleh kerangka kerja KnowRob dan



divisualisasikan oleh lingkungan VR. Hal ini mengintensifkan kerja sama antara sistem manusia dan robot serta mendukung pembagian kendali. Hal tersebut juga didukung oleh umpan balik aktif kepada manusia mengenai hasil yang diprediksi dari intervensi manusia dan memungkinkan manusia untuk mempertimbangkan kembali intervensi tersebut berdasarkan kemungkinan implikasi yang dikomunikasikan. Dengan demikian, ISMMS tidak hanya dapat dianggap sebagai antarmuka yang intuitif dan sangat efektif untuk pengendalian robot, tetapi juga memfasilitasi kerja sama manusia-mesin yang mendalam.



DAFTAR PUSTAKA

- Ababneh, A. (2024). Review future technologies in underwater cultural heritage. *Journal of the General Union of Arab Archaeologists*, 9(2), 1-19.
- Ai, X., Kang, S., & Chou, W. (2018, September). System design and experiment of the hybrid underwater vehicle. In *2018 International Conference on Control and Robots (ICCR)* (pp. 68-72). IEEE.
- Bartsch, S., Kolesnikov, A., Büskens, C., & Echim, M. (2019). Modular underwater manipulators for autonomous underwater intervention. In *AI Technology for Underwater Robots* (pp. 95-103). Cham: Springer International Publishing.
- Bogue, R. (2015). Underwater robots: a review of technologies and applications. *Industrial Robot: An International Journal*, 42(3), 186-191.
- Chaithra, N., Jha, J., Sayal, A., Priya, M. S., Allagari, N., Chandana, K., & Aggarwal, N. (2024). Enhancing Underwater Imagery with AI/ML and IoT in ROV Technology. In *Artificial Intelligence and Edge Computing for Sustainable Ocean Health* (pp. 311-342). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Chi, P., Wang, Z., Liao, H., Li, T., Wu, X., & Zhang, Q. (2024). Application of artificial intelligence in the new generation of underwater humanoid welding robots: a review. *Artificial Intelligence Review*, 57(11), 306.
- Choi, H. T., Lee, C. M., Kim, K., Jeong, S. Y., & Lee, J. W. (2010). New project and new underwater robot for new missions. In *The Abstracts of the international conference on advanced mechatronics: toward evolutionary fusion of IT and mechatronics: ICAM 2010.5* (pp. 93-97). The Japan Society of Mechanical Engineers.
- Christensen, L., de Gea Fernández, J., Hildebrandt, M., Koch, C. E. S., & Wehbe, B. (2022). Recent advances in ai for navigation and control of underwater robots. *Current Robotics Reports*, 3(4), 165-175.
- Cong, Y., Gu, C., Zhang, T., & Gao, Y. (2021). Underwater robot sensing technology: A survey. *Fundamental Research*, 1(3), 337-345.
- Das, P., & Engineer, C. CASE STUDIES IN ROV DEVELOPMENT: INNOVATIONS IN UNDERWATER EXPLORATION TECHNOLOGY.
- de Gea Fernández, J., Ott, C., & Wehbe, B. (2019). Machine learning and dynamic whole body control for underwater manipulation. In *AI Technology for Underwater Robots* (pp. 107-115). Cham: Springer International Publishing.
- Eruvaram, V. K., Gopi, B., Epsiba, P., Indumathi, G. S., Srinivasan, C., & Philo, A. (2025, June). Exploring the Potential of Underwater Robotics Monitoring Enhanced By Saab Seaeye's Next-Generation AI And Sensor Integration. In *2025 11th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)* (pp. 1241-1246). IEEE.



- Fischer, P. (2019). Intelligent sensor technology: A 'must-have' for next-century marine science. In *AI Technology for underwater robots* (pp. 19-36). Cham: Springer International Publishing.
- Ge, W., Sun, J., Xu, Y., & Zheng, H. (2021, October). Real-time object detection algorithm for Underwater Robots. In *2021 China Automation Congress (CAC)* (pp. 7703-7707). IEEE.
- Gu, S., Zhang, L., Guo, S., Zheng, L., An, R., Jiang, T., & Xiong, A. (2022). Communication and cooperation for spherical underwater robots by using acoustic transmission. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 28(1), 292-301.
- Hu, Q., Wang, K., Ren, F., & Wang, Z. (2024). Research on underwater robot ranging technology based on semantic segmentation and binocular vision. *Scientific Reports*, 14(1), 12309.
- Huang, X. R., & Chen, L. B. (2023). An underwater explorer remotely operated vehicle: Unraveling the secrets of the ocean. *IEEE potentials*, 42(3), 31-36.
- Iyengar, S. S., Govindarajan, G., Chaudhary, N. K., & Hariprasad, Y. (2024). AI-enhanced smart materials and sensor optimization for underwater soft robots. *ACM Trans. Autonom. Adapt. Syst*, 1(1).
- Kampmann, P., Christensen, L., Fritsche, M., Gaudig, C., Hanff, H., Hildebrandt, M., & Kirchner, F. (2018, April). How AI and robotics can support marine mining. In *Offshore Technology Conference* (p. D031S034R001). OTC.
- Kamsani, N. (2019). Frame design and optimization of AI-enabled underwater robot.
- Kirchner, E. A., Langer, H., & Beetz, M. (2019). An interactive strategic mission management system for intuitive human-robot cooperation. In *AI Technology for Underwater Robots* (pp. 183-193). Cham: Springer International Publishing.
- Köser, K., & Frese, U. (2019). Challenges in underwater visual navigation and SLAM. In *AI technology for underwater robots* (pp. 125-135). Cham: Springer International Publishing.
- Kundu, S. (2015). *Navigational Strategies for Control of Underwater Robot using AI based Algorithms* (Doctoral dissertation).
- Lee, M. F. R., & Chien, T. W. (2020, August). Artificial intelligence and internet of things for robotic disaster response. In *2020 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Li, X., Feng, Y., Huang, R., Zhang, X., Liu, S., & Ai, J. (2017, October). The application of square-root cubature Kalman filter in SLAM for underwater robot. In *2017 Chinese Automation Congress (CAC)* (pp. 2183-2187). IEEE.
- Liu, X., & Xie, S. (2025). Innovative Strategy and Practice of Using Underwater Robot for Marine Cable Inspection and Operation and Maintenance. *Cognitive Robotics*.



- Mishra, J. P., Singh, K., & Chaudhary, H. (2023). Recent advancement of AI technology for underwater acoustic communication. *Emerging Technologies; Micro to Nano: Proceedings of ETMN-2021*, 2752(1), 050001.
- Motta, D., Andrade, L., Mascarenhas, L. B., & Beal, V. E. (2019). Challenges for deepwater operations: an industry perspective. In *AI Technology for Underwater Robots* (pp. 37-48). Cham: Springer International Publishing.
- Nauert, F., & Kampmann, P. (2023). Inspection and maintenance of industrial infrastructure with autonomous underwater robots. *Frontiers in Robotics and AI*, 10, 1240276.
- Poongundran, M., Agnes, J. S., Das, S., Anusha, D. J., & Amandykova, D. (2022, May). Role of underwater robots in ocean exploration research. In *2022 International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC)* (pp. 1789-1794). IEEE.
- Qi, H., & Tang, Y. (2022, February). Autonomous underwater rescue technology. In *OCEANS 2022-Chennai* (pp. 1-4). IEEE.
- Sasi, J. P., Pandagre, K. N., Royappa, A., & Walke, S. (2023, December). Deep Learning Techniques for Autonomous Navigation of Underwater Robots. In *2023 10th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)* (Vol. 10, pp. 1630-1635). IEEE.
- Shen, T., Guo, J., Liang, H., Li, Y., Li, K., Dai, Y., & Ai, Y. (2023, November). Research on a Blue-Green LED Communication System Based on an Underwater Mobile Robot. In *Photonics* (Vol. 10, No. 11, p. 1238). MDPI.
- Shibuya, T., Watanabe, S., & Shintake, J. (2024). Silicone-layered waterproof electrohydraulic soft actuators for bio-inspired underwater robots. *Frontiers in Robotics and AI*, 11, 1298624.
- Wang, R., Wang, S., Wang, Y., Cheng, L., & Tan, M. (2020). Development and motion control of biomimetic underwater robots: A survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 52(2), 833-844.
- Wei, W., & Lin, Q. (2020, June). Research on intelligent tourism town based on AI technology. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1575, No. 1, p. 012039). IOP Publishing.
- Wong, K. J. T. (2019). Design of a navigation and localization system for an AI-enabled underwater robot.
- Wu, Q., Liu, Y., & Wu, C. (2018). An overview of current situations of robot industry development. In *ITM Web of Conferences* (Vol. 17, p. 03019). EDP Sciences.
- Wübben, D., Könsgen, A., Udugama, A., Dekorsy, A., & Förster, A. (2019). Challenges and opportunities in communications for autonomous underwater vehicles. *AI technology for underwater robots*, 83-93.
- Xie, K., Yang, J., & Qiu, K. (2022). A dataset with multibeam forward-looking sonar for underwater object detection. *Scientific Data*, 9(1), 739.



- Xue, L., & Lekkas, A. M. (2020, October). Comparison of ai planning frameworks for underwater intervention drones. In *Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast* (pp. 1-9). IEEE.
- Yamamoto, I., Morinaga, A., & Lawn, M. (2020). Agile ROV for underwater surveillance. *Journal of Marine Science and Technology*, 28(5), 3.
- Yuh, J. (2000). Design and control of autonomous underwater robots: A survey. *Autonomous Robots*, 8(1), 7-24.
- Zhang, C., Chen, Z., & Jiao, P. (2024). Protocol for developing an explosion-propeller hybrid driving underwater robot for AI-based concrete overhaul in real marine environments. *STAR protocols*, 5(4), 103325.



TEKNOLOGI AI

untuk

ROBOT BAWAH AIR

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

BIO DATA PENULIS



Penulis memiliki berbagai disiplin ilmu yang diperoleh dari Universitas Diponegoro (UNDIP) Semarang. dan dari Universitas Kristen Satya Wacana (UKSW) Salatiga. Disiplin ilmu itu antara lain teknik elektro, komputer, manajemen dan ilmu sosiologi. Penulis memiliki pengalaman kerja pada industri elektronik dan sertifikasi keahlian dalam bidang Jaringan Internet, Telekomunikasi, Artificial Intelligence, Internet Of Things (IoT), Augmented Reality (AR), Technopreneurship, Internet Marketing dan bidang pengolahan dan analisa data (komputer statistik).

Penulis adalah pendiri dari Universitas Sains dan Teknologi Komputer (Universitas STEKOM) dan juga seorang dosen yang memiliki Jabatan Fungsional Akademik Lektor Kepala (Associate Professor) yang telah menghasilkan puluhan Buku Ajar ber ISBN, HAKI dari beberapa karya cipta dan Hak Paten pada produk IPTEK. Sejak tahun 2023 penulis tercatat sebagai Dosen luar biasa di Fakultas Ekonomi & Bisnis (FEB) Universitas Diponegoro Semarang. Penulis juga terlibat dalam berbagai organisasi profesi dan industri yang terkait dengan dunia usaha dan industri, khususnya dalam pengembangan sumber daya manusia yang unggul untuk memenuhi kebutuhan dunia kerja secara nyata.



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK
Jl. Majapahit No. 605 Semarang
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-634-7227-56-0 (PDF)



9

786347

227560