

SEMIOTIKA DESAIN



Sarwo Nugroho, S.Kom., M.Kom.



SEMIOTIKA DESAIN

Sarwo Nugroho, S.Kom., M.Kom.



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

SEMIOTIKA DESAIN

Penulis :

Sarwo Nugroho, S.Kom., M.Kom

ISBN : 9 786239 608903

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 Yudianto

Penebit :

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

Redaksi :

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. (024) 6723456

Fax. 024-6710144

Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

Distributor Tunggal :

Universitas STEKOM

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. (024) 6723456

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 tertulis dari penerbit

Kata Pengantar

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena dengan rahmat, karunia, serta taufik dan hidayah-Nya kami dapat menyelesaikan penyusunan buku berjudul **SEMIOTIKA DESAIN** dengan harapan untuk dapat dipergunakan oleh kalangan para akademisi.

Tujuan utama penyusunan buku ini adalah untuk memudahkan mahasiswa dalam memahami dan menguasai dasar-dasar ilmu mengenai seni desain grafis. Buku teks ini memberikan gambaran tentang pemahaman lebih dalam mengenai desain, sehingga memudahkan para mahasiswa untuk memahami apa yang disampaikan pada buku ini serta bagi pendidik dapat menunjang untuk proses kegiatan belajar mengajar.

Semoga buku ini dapat dipahami bagi siapapun yang membacanya. Sekiranya buku yang telah disusun ini dapat berguna bagi kami sendiri maupun orang yang membacanya. Sebelumnya kami mohon maaf apabila terdapat kesalahan kata-kata yang kurang berkenan dan kami memohon kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa depan.

Semarang, Januari 2021

Sarwo Nugroho, S.Kom., M.Kom

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
1. SENSITOMETRI	1
1. Pengantar.....	1
2. Subyek.....	1
3. Eksposur.....	1
4. Densitas/Densitas dan ukuran relevan lainnya	2
5. Transmisi.....	2
6. Opacity/Tingkat kegelapan	3
7. Densitas/Massa jenis.....	3
8. Pengaruh hamburan cahaya negatif	3
9. Koefisien callier	5
10. Densitas dalam praktiknya.....	5
11. Kurva Karakteristik (H dan D)	7
12. Wilayah utama dari kurva karakteristik negatif.....	7
13. Variasi kurva karakteristik dengan material	9
14. Kurva gamma-time	10
15. Variasi gamma dengan panjang gelombang	11
16. Menempatkan subjek pada kurva karakteristik.....	11
17. Pengaruh variasi pada eksposur negatif.....	12
18. Gradien rata-rata dan G.....	13
19. Indeks kontras	13
20. Pengaruh variasi pada perkembangan negatif.....	13
21. Garis lintang eksposur.....	14
22. Kurva respons dari kertas foto	15
23. Hitam maksimal	16
24. Rentang eksposur kertas	17
25. Variasi kurva karakteristik cetak dengan jenis emulsi.....	18
26. Variasi kurva karakteristik cetak dengan perkembangan	18
27. Persyaratan dalam mencetak.....	19
28. Kontras kertas	20

29. Kegagalan hukum timbal balik	21
30. Efek praktis dari kegagalan timbal balik	22
31. Efek intermittency.....	23
31.1. Sensitometer.....	23
31.2. Densitometer.....	24
31.3. Mikrodensitometer.....	24
31.4. Densitometer warna.....	25
2. SISTEM VISUAL MANUSIA	27
32. Pengantar	27
33. Struktur fisik mata manusia	27
34. Tunik.....	28
35. Kornea.....	28
36. Konjungtiva.....	29
37. Iris dan Pupil.....	29
38. Lensa Kristal	30
39. Tubuh siliaris	30
40. Rongga vitreous dan humour vitreous	30
41. Retina dan koroid.....	31
42. Saraf optik.....	31
43. Struktur retina	32
44. Batang dan kerucut	34
45. Lapisan sel ‘non-Pencitraan	37
46. Bidang reseptif.....	38
47. Adaptasi gelap.....	40
48. Penglihatan warna dasar	41
48.1. Teori Young-Helmholtz tentang penglihatan warna.....	41
48.2. Teori lawan dari penglihatan warna.....	42
48.3. Visi warna penglihatan anomali.....	42
49. Movement/Gerakan dan Fokus	43
49.1. Fokus dan koreksi penglihatan.....	43
49.2. Movement/Gerakan.....	45
49.3. Jalur visual.....	45
49.4. Korteks visual.....	47
49.5. Penglihatan binokular.....	47

50. Performa mata.....	49
50.1. Diskriminasi luminasi.....	49
50.2. Fungsi sensitivitas kontras.....	50
50.3. Sharpness visual.....	51
50.4. Visi Animal.....	51
3. NOISE, SHARPNESS, RESOLUSI DAN INFORMASI.....	54
51. Pengantar.....	54
52. Image Noise	54
53. Noise Fotografi	56
53.1. Graininess (Bintik-Bintik).....	56
53.2. Faktor Yang Mempengaruhi Bintik Pada Cetakan.....	58
53.3. Granularitas.....	58
53.4. Faktor Yang Mempengaruhi Granularitas Negatif.....	59
54. Variasi Granularitas Dengan Densitas	60
55. Mengukur Noise Gambar.....	61
56. Spektrum Daya Noise	63
57. Hubungan Antara Ukuran Noise.....	64
58. Pertimbangan Praktis Untuk Fungsi Autokorelasi Dan Spektrum Daya Noise.....	64
59. Penggunaan Fungsi Autokorelasi	65
60. Transformasi Fourier Langsung Dari Sampel Noise	66
61. Rasio Signal-To-Noise.....	67
62. Noise Sistem Elektronik	69
63. Resolusi, Sharpness dan MTF.....	72
64. Kekuatan Resolving (Penyelesaian) Sistem Fotografi.....	72
65. Mengukur Fungsi Transfer Modulasi	75
65.1. Perekaman Gelombang - Metode Gelombang Sinus.....	76
65.2. Perekaman Gelombang - Metode Gelombang Persegi.....	77
65.3. Metode Input Edge.....	77
65.4. Metode Slanted Edge.....	78
66. Koreksi MTF.....	81
67. Kekuatan Resolving (Penyelesaian) Dan MTF Untuk Sistem Optik.....	82
68. Sharpness, MTF Dan Kualitas Gambar	84
69. DQE (Detective Quantum Efficiency).....	85
69.1. Pertimbangan Umum.....	85

69.2. DQE Untuk Proses Fotografi.....	88
69.3. DQE Untuk Pencitraan Array CCD Atau CMOS.....	89
69.4. DQE Dan Rasion Signal-To-Noise.....	90
70. Teori Informasi	92
71. Kapasitas Informasi pada Gambar	93
4. PEMROSESAN GAMBAR SPASIAL.....	96
72. Pengantar.....	96
73. Background.....	96
73.1. Struktur Gambar Digital.....	96
73.2. Implementasi Pemrosesan Domain Spasial.....	97
74. Teori Sistem Linear.....	98
75. Konvolusi Diskrit.....	99
76. Proses Operasi Titik : Transformasi Intensitas	99
77. Perubahan Brightness dan Kontras menggunakan fungsi transformasi linier	99
78. Fungsi Linear Piecewise	101
79. Peningkatan Menggunakan Operasi Aritmatika	105
80. Peningkatan Menggunakan Operasi Logis	106
81. Pemrosesan titik: Operasi statistikal	107
82. Fungsi Densitas Probabilitas dan Fungsi Distribusi Probabilitas	107
83. Slide histogram dan perentangan	110
84. Ekuasi Histogram.....	110
85. Pemrosesan Titik : Transformasi Geometri	113
86. Pemrosesan Lingkungan: Teknik Penyaringan Spasial	114
87. Pemfilteran Linier	114
88. Properti Filter Linier	116
89. Jenis Filter Linier dan Pengaplikasiannya	116
90. Filter Spasial Smoothing.....	117
91. Deteksi Edge Dan Mempertajam Filter Spasial.....	119
92. Filter Spasial Non-Linier	123
93. Filter Median.....	123
94. Filter Minimum Dan Maksimum	126

1. SENSITOMETRI

1. Pengantar

Studi objektif tentang respons sistem pencitraan terhadap cahaya atau radiasi lain disebut sensitometri. Ini berkaitan dengan pengukuran eksposur yang diterima material dan jumlah gambar yang dihasilkan. Sensitometri dalam fotografi berbasis perak yang merupakan subjek dari bab ini dinilai dari banyaknya penggelapan, pembentukan gambar perak yang terjadi. Dalam sensor gambar digital, hal itu dinilai dengan tegangan keluaran, atau nilai piksel keluaran. Foto dapat dihasilkan tanpa pengetahuan tentang sensitometri, tetapi untuk mendapatkan kinerja terbaik dari sistem fotografi, dalam semua kondisi, pemahaman tentang prinsip-prinsip yang mengatur respons sistem pencitraan sangat berharga.

Karena kepekaan berkaitan dengan pengukuran kinerja bahan fotografi dan sistem peka cahaya lainnya, maka perlu menggunakan terminologi yang tepat dalam menentukan kuantitas yang diukur. Kesan yang ditimbulkan oleh sebuah foto pada kita bergantung pada faktor fisiologis dan psikologis serta fisik, dan karena alasan ini, keberhasilan gambar semacam itu tidak dapat ditentukan dari serangkaian pengukuran sederhana. Ini berarti bahwa ada keterbatasan bantuan yang dapat diberikan oleh sensitometri kepada kita.

2. Subyek

Sejauh menyangkut kamera, subjek terdiri dari sejumlah area dengan pencahayaan dan warna yang bervariasi. Dengan cara yang sama, cetakan foto terdiri dari area pencahayaan yang bervariasi dan terkadang warna (pencahayaan diukur dalam candle per meter persegi). Variasi luminansi dalam subjek disebabkan oleh karakteristik refleksi dari area yang berbeda, dan sudut pandang yang berbeda. Mungkin juga ada variasi yang signifikan dalam iluminasi yang diterima subjek. Rasio pencahayaan maksimum ke minimum dalam subjek didefinisikan sebagai kisaran pencahayaan subjek.

Mungkin pada awalnya kita terkejut saat menyadari bahwa matahari terbenam, atau riak angin di atas air, dapat direduksi menjadi area dengan pencahayaan yang bervariasi. Namun demikian halnya di kamera, dan di mata Anda juga melihat cetakan hitam-putih, dengan perbedaan bahwa pikiran tidak hanya menarik kesan visual, tetapi juga pengalaman masa lalu. Jadi, saat melihat gambar apel, misalnya, kita melihat lebih dari sekadar cahaya dan bayangan. Pengalaman masa lalu kita membantu mata dalam memberikan gambaran tentang sebutir apel kepada pikiran.

Tujuan akhir kami dalam sensitometri adalah menghubungkan pencahayaan cetakan dengan pencahayaan subjek. Ini melibatkan studi, pertama, respon dari materi negatif, kemudian respon dari materi positif, dan terakhir hubungan antara keduanya. Kami akan mempertimbangkan masing-masing secara bergantian. Kami merujuk ke area terang subjek sebagai sorotan dan area gelap sebagai bayangan. Untuk menghindari kebingungan, istilah yang sama harus diterapkan ke area terkait baik di negatif maupun di cetakan, meskipun di highlight negatif pekat dan bayangannya jelas.

3. Eksposur

Saat sebuah foto diambil, cahaya dari berbagai area subjek jatuh pada area film yang sesuai. Pencahayaan fotografis, H (efek yang dihasilkan pada emulsi), dalam batas-batas,

sebanding dengan produk pencahayaan - dan waktu pencahayaan t . Kami mengungkapkan ini dengan ekuasi:

Ekuasi 8.1

$$H = Et$$

Sebelum standarisasi simbol internasional, ekuasi dituliskan sebagai $H = It$ (E adalah eksposur, I adalah iluminansi) dan penggunaan ini terkadang masih ditemukan.

Satuan SI untuk penerangan adalah lux (lx). Karenanya eksposur diukur dalam lux detik ($lx s$). Perlu dicatat bahwa lux didefinisikan dalam istilah pengamat manusia, yang tidak dapat melihat radiasi baik di daerah spektrum ultraviolet atau inframerah. Oleh karena itu, penyertaan salah satu pita ini dalam eksposur pencitraan dapat menghasilkan hasil yang salah dengan beberapa sistem pencitraan.

Karena pencahayaan subjek bervariasi dari area ke area, maka iluminasi pada emulsi juga bervariasi, sehingga film tidak menerima satu eksposur di seluruh permukaan tetapi sejumlah energi cahaya yang bervariasi, yaitu rentang eksposur. Sebagai aturan umum, durasi pemaparan adalah konstan untuk semua area film, variasi pemaparan di atas film semata-mata disebabkan variasi pencahayaan yang diterimanya.

Perlu diperhatikan bahwa penggunaan kata 'eksposur' seperti yang kami gunakan di sini sangat berbeda dari penggunaan sehari-hari seperti: 'Saya memberikan eksposur 1/60 detik pada f 8'. Kita dapat menghindari kebingungan dengan menetapkan eksposur kamera terakhir.

4. Densitas/Densitas dan ukuran relevan lainnya

Jika film telah diproses, area gambar yang telah menerima nilai iluminasi berbeda terlihat memiliki derajat penggelapan yang berbeda, sesuai dengan jumlah perak yang dikembangkan, atau pewarna gambar, yang terbentuk. Kegelapan negatif, yaitu kekuatan penghentian cahayanya, dapat diekspresikan secara numerik dalam beberapa cara berbeda. Cara-cara berikut ini menarik.

5. Transmisi

Transmitansi, τ , dari area negatif didefinisikan sebagai rasio cahaya yang ditransmisikan I_t ke insiden cahaya pada I_i negatif. Ini dapat dinyatakan secara matematis sebagai:

Ekuasi 8.2

$$\tau = \frac{I_t}{I_i}$$

Transmisi selalu kurang dari 1, kecuali dinyatakan sebagai persentase. Jadi, jika 10 unit cahaya jatuh pada negatif dan 5 ditransmisikan, negatif memiliki transmitansi $5/10 = 0.5$, atau 50%. Sayangnya transmitansi bukanlah konsep yang paling berguna dalam sensitometri karena ia menurun seiring bertambahnya kegelapan, dan perubahan yang sama dalam transmitansi tidak muncul sebagai perubahan yang sama dalam kegelapan.

6. Opacity/Tingkat kegelapan

Opasitas, O , didefinisikan sebagai rasio insiden cahaya pada negatif, I_i , terhadap cahaya yang ditransmisikan, I_t . Itu hanyalah kebalikan dari transmisi dan dapat diekspresikan:

Ekuasi 8.3

$$O = \frac{I_i}{I_t} = \frac{1}{\tau}$$

Opasitas selalu lebih besar dari 1 dan meningkat dengan meningkatnya kegelapan. Dari sudut pandang ini, ini adalah unit yang lebih logis untuk digunakan dalam kepekaan daripada transmisi, tetapi perubahan yang sama dalam keburaman masih tidak mewakili perubahan yang sama dalam kegelapan yang dirasakan.

7. Densitas

Densitas transmisi, DT , didefinisikan sebagai logaritma ke basis 10 dari opasitas. Karenanya:

Ekuasi 8.4

$$Dr = \text{Log}_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) = \text{Log}_{10} \left(\frac{I_i}{I_t} \right)$$

Densitas adalah satuan warna hitam yang digunakan hampir secara eksklusif dalam sensitometri. Seperti opacity, ia meningkat dengan bertambahnya kegelapan, tetapi memiliki keuntungan praktis berikut:

1. Densitas yang diukur kira-kira berhubungan secara linier dengan jumlah perak atau pewarna gambar yang ada; misalnya jika jumlah yang ada dalam gambar dengan densitas 1.0 digandakan, densitas dinaikkan menjadi 2.0. Opasitas, bagaimanapun, meningkat dari 10 menjadi 100, yaitu sepuluh kali lipat.
2. Tujuan akhir dalam sensitometri adalah untuk menghubungkan corak gambar dengan subjeknya. Keggelapan dalam reproduksi tergantung pada cara mata menilai, dan pada dasarnya bersifat fisiologis. Hukum yang mengaitkan efek visual dengan stimulasi tidaklah sederhana, tetapi pada berbagai kondisi penglihatan, respons mata kira-kira logaritmik. Jika kita melihat sejumlah bercak di mana densitas meningkat dengan langkah yang sama, mata menerima langkah-langkah tersebut sebagai peningkatan yang sama dalam kegelapan. Dalam hal ini, oleh karena itu, unit logaritmik adalah ukuran yang memuaskan dari kehitaman. Tabel 8.1 menghubungkan densitas transmisi, opacity dan transmitansi. Densitas gambar pada basis transparan dan buram disebut masing-masing sebagai densitas transmisi dan refleksi.

8. Pengaruh hamburan cahaya negatif

Saat cahaya melewati gambar fotografis, cahaya itu tersebar sebagian. Salah satu akibatnya adalah bahwa nilai numerik densitas bergantung pada distribusi spasial cahaya datang, dan pada metode yang diadopsi untuk pengukuran cahaya ini dan cahaya yang ditransmisikan. Tiga jenis kerapatan telah ditentukan menurut sudut kerucut penerangan dan kumpulan cahaya; ini diilustrasikan pada Gambar 1.1 dan dijelaskan dalam Tabel 8.2. *Densitas Spekular atau Langsung*. Ini ditentukan dengan menggunakan iluminasi paralel,

normal ke sampel, dan mengukur hanya kemunculan normal, sinar langsung, sejajar dengan sumbu.

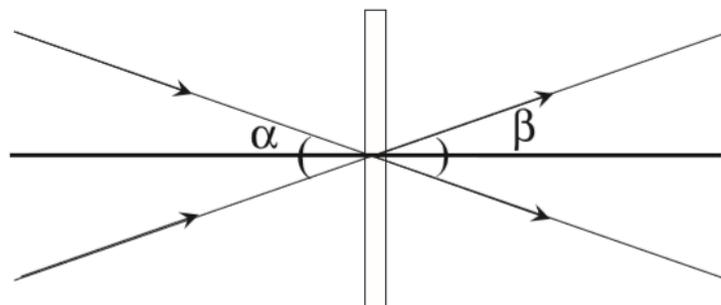
1. *Densitas menyebar*. Ini dapat ditentukan dengan salah satu dari dua cara:
 - a. Dengan menggunakan iluminasi paralel, normal (mis. Pada 90°) ke sampel, dan mengukur kemunculan total (apakah normal atau tersebar), atau
 - b. Dengan menggunakan iluminasi difus dan hanya mengukur kemunculan normal.

Nilai numerik kerapatan difus sama dengan kedua metode pengukuran.

2. *Densitas difusi ganda (atau densitas difus ganda)*. Ini ditentukan dengan menggunakan iluminasi difus dan mengukur kemunculan total.

Tabel 1.1 Densitas, Opacity dan transmisi					
DENSITY	OPACITY	TRANSMISI (%)	DENSITY	OPACITY	TRANSMISI (%)
0.0	1.00	100.00	1.2	15.85	6.31
0.1	1.26	79.43	1.4	25.12	3.98
0.2	1.58	63.10	1.6	39.81	2.51
0.3	2.00	50.12	1.8	63.10	1.58
0.4	2.51	39.81	2.0	100.00	1.00
0.5	3.16	31.62	2.2	158.49	0.63
0.6	3.98	25.12	2.4	251.19	0.40
0.7	5.01	19.95	2.6	398.11	0.25
0.8	6.31	15.85	2.8	630.96	0.16
0.9	7.94	12.59	3.0	1000.00	0.10
1.0	10.00	10.00	4.0	10,000.00	0.01

Pengukuran praktis dari salah satu jenis massa jenis ini didasarkan pada rasio pembacaan yang dilakukan oleh fotosel saat sampel tidak ada (diambil sebagai I_i) dengan pembacaan pada fotosel yang sama saat sampel berada di tempatnya (I_t). Perbedaan antara kerapatan difus dan kerapatan difus ganda biasanya cukup kecil, tetapi kerapatan spekular selalu lebih besar dari keduanya.



Gambar 1.1 Geometri pengukuran massa jenis.

Tabel 1.2 Geometri pada ukuran density		
α	β	Tipe Density
0	0	Spekular atau langsung
0	180	Menyebar
180	0	Menyebar
180	180	Menyebar ganda

9. Koefisien callier

Rasio kerapatan spekuler terhadap kerapatan difus disebut koefisien Callier, atau faktor Callier Q, dan dapat dinyatakan sebagai:

Ekuasi 8.5

$$Q = \frac{\text{Densitas spekular}}{\text{Densitas Difusi}}$$

Rasio ini, yang tidak pernah kurang dari 1,0, bervariasi dengan ukuran butiran, bentuk perak yang dikembangkan dan jumlah deposit. Sejauh menyangkut grain, fennitis, semakin rendah resultan hamburan dan semakin dekat ke kesatuan adalah koefisien Callier.

Faktor-faktor di atas, yang mempengaruhi nilai Q, sangat bervariasi dengan tingkat dan jenis pengembangan yang digunakan. Akibatnya, koefisien Callier bervariasi dengan densitas dan kontras dengan cara yang rumit. Pada tingkat perkembangan yang rendah, dengan satu kombinasi tertentu dari film dan pengembang, nilai Q kira-kira konstan pada densitas di atas sekitar 0,3; untuk pengembangan yang lebih lengkap, bagaimanapun, tidak ada nilai tunggal dari Q yang dapat diadopsi.

Salah satu hasil dari variasi koefisien Callier dengan kerapatan adalah bahwa distribusi nada pada cetakan yang dihasilkan dengan pembesar kondensor cenderung berbeda dari pada cetakan yang dihasilkan dengan menggunakan pembesar diffuser. Gambar fotografi berwarna, bagaimanapun, pada dasarnya tidak tersebar, sehingga mereka memiliki koefisien Callier yang mendekati satu. Jadi, dalam pencetakan negatif warna jarang ada perbedaan yang dapat diukur antara hasil dari pembesar diffuser atau kondensor.

10. Densitas dalam praktiknya

Jenis kerapatan yang terkait dengan praktik fotografi ditunjukkan pada Tabel 1.3.

Tabel 1.3 Density efektif dalam aktivitas fotografi yang berbeda	
APLIKASI	DENSITY EFEKTIF
Kontak printing	
(a) Dalam kotak, dengan sumber tersebar	Diffuse ganda
(b) Dalam frame, gunakan bohlam bening atau pembesar sebagai iluminan	Diffuse (kumpulan total iluminasi paralel)
Memperbesar	
(a) Pembesar kondensor (sumber titik, tanpa diffuser)	Specular
(b) Pembesar difus (terutama jenis katoda dingin)	Diffuse (diffuse iluminasi, normal (koleksi 0))
Proyeksi foto atau gambar bergerak	
Semua tipe	Specular

Beberapa jenis iluminasi menghadirkan jenis densitas menengah, seperti, misalnya, saat bohlam opal atau layar difusi digunakan dalam pembesar kondensor. Terlepas dari pembesar dan proyektor kondensor sejati, kerapatan efektif dalam semua contoh yang dikutip adalah berdifusi atau berdifusi ganda. Karena perbedaan antara bentuk massa jenis yang terakhir kecil, massa jenis negatif dinyatakan sebagai massa jenis difus.

Jika gambar dalam negatif atau cetakan tidak bernada netral, kerapatan yang diukur tidak hanya akan bergantung pada optik yang digunakan untuk mengukurnya, tetapi juga pada warna cahaya yang digunakan dan respons terhadap warna perangkat yang digunakan untuk mengukurnya. . Mempertimbangkan dua faktor terakhir ini, kita dapat mempertimbangkan densitas sebagai empat jenis utama menurut spesifikasi spektral yang terlibat:

1. *Densitas pada setiap panjang gelombang tertentu, densitas spektral* - ditentukan dengan menerangi spesimen dengan radiasi monokromatik
2. *Densitas visual* - ditentukan dengan mengukur spesimen yang diterangi dengan penerima yang memiliki respons spektral yang serupa dengan mata manusia fotopik normal, mata berfungsi dalam pencahayaan terang. Jenis densitas ini distandarisasi sebagai Status V dan digunakan dalam studi reproduksi nada oleh bahan monokrom dan warna.
3. *Densitas pencetakan* - ditentukan dengan menerangi spesimen dengan cahaya tungsten dan menggunakan penerima dengan respons aspek yang serupa dengan kertas foto.
4. *Densitas Arbitrari* - ditentukan dengan menerangi spesimen dengan cahaya tungsten dan menggunakan sensor foto komersial tanpa filter, atau bahkan tersaring, sebagai detektor, kombinasi tersebut memiliki sensitivitas spektral yang sewenang-wenang dan terkadang tidak ditentukan.

Klasifikasi ini berlaku sama untuk ketiga jenis massa jenis utama: spekulat, difus, dan difus ganda. Untuk sebagian besar tujuan fotografi monokrom digunakan densitas visual yang tersebar.

Densitas warna juga biasanya diukur dengan menggunakan densitometer difus. Gambar berwarna terdiri dari tiga pewarna, masing-masing mengontrol salah satu warna utama cahaya: merah, hijau, atau biru. Oleh karena itu, dalam praktiknya, gambar berwarna dijelaskan dalam istilah densitasnya terhadap cahaya red, green, dan blue, densitometer dilengkapi dengan filter untuk memilih setiap warna primer secara bergantian.

Filter warna yang dipilih untuk densitometer biasanya memilih pita spektral merah, biru, dan biru dan mengukur efek terintegrasi dari ketiga absorpsi pewarna dalam pita tersebut. Massa jenis yang diukur dengan cara ini disebut densitas integral arbitrer dan paling umum digunakan dalam pengukuran kontrol kualitas sederhana. Untuk hasil yang lebih berguna, filter densitometer dan sensitivitas sel dipilih dengan cermat sehingga densitas yang diukur mewakili efek gambar pada mata atau kertas cetak berwarna. Pengukuran tersebut sesuai dengan kategori densitas (2) dan (3) untuk gambar hitam-putih, dan masing-masing disebut sebagai densitas kolorimetri dan pencetakan. Dalam praktiknya, densitas kolorimetri jarang diukur karena densitas tiga filter yang sesuai (Status A) dapat digunakan untuk menggambarkan respons mata terhadap nada visual netral dan nada hampir netral. Biasanya hanya ini yang dibutuhkan. Densitas tiga filter pencetakan (Status M), bagaimanapun, diterapkan secara luas dalam penilaian negatif warna untuk tujuan pencetakan, meskipun pengukuran jenis ini biasanya hanya dapat merujuk pada

beberapa sistem ‘khas ‘ yang didefinisikan. Mereka juga umumnya ditentukan untuk kontrol pemrosesan negatif warna dan untuk penilaian negatif warna untuk pencetakan.

11. Kurva Karakteristik (H dan D)

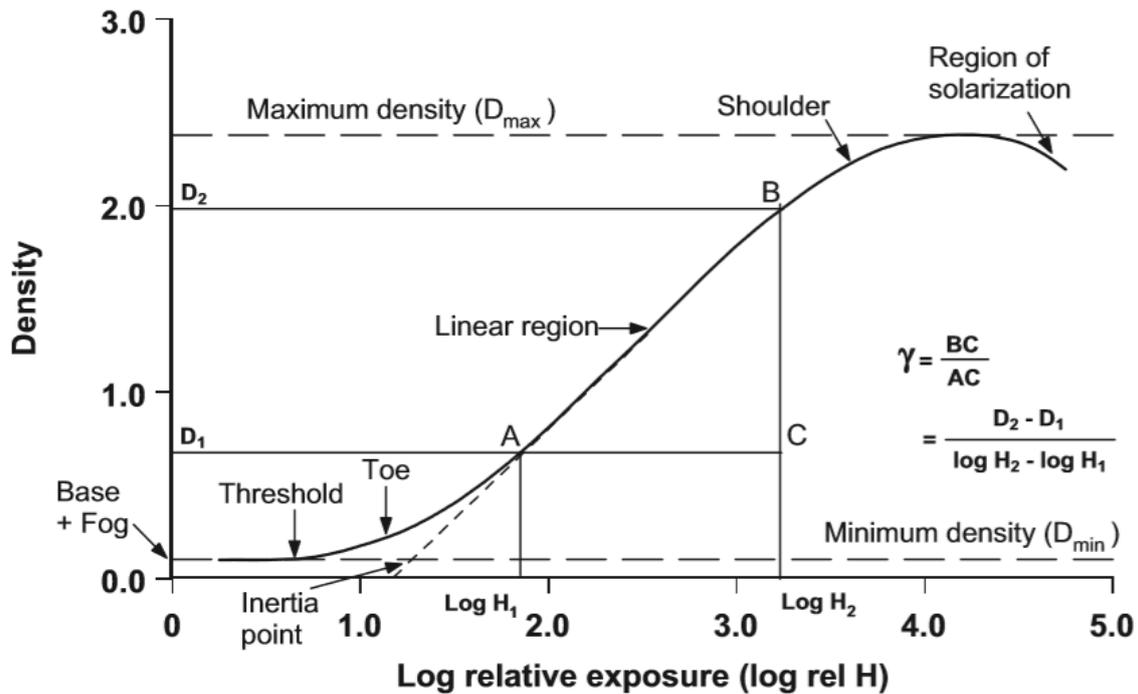
Jika densitas diplot terhadap eksposur, kurva respons untuk film dapat diperoleh. Meskipun kurva jenis ini terkadang memiliki nilai, kurva yang jauh lebih berguna untuk sebagian besar tujuan diperoleh dengan memplot densitas terhadap logaritma umum (logaritma ke basis 10) dari eksposur. Ini memberikan kurva bentuk yang ditunjukkan pada Gambar 1.2 (bersama dengan beberapa fitur penting), jenis kurva respons yang khas pada fotografi biasa. Ini disebut sebagai kurva karakteristik atau kurva H dan D, setelah F. Hurter dan V.C. Driffield, yang membentuk kurva jenis ini. Kurva H dan D adalah diagram yang menunjukkan efek pada emulsi dari setiap derajat eksposur dari kekurangan eksposur kotor menjadi kelebihan eksposur kotor untuk waktu pengembangan tunggal dan pengembang tertentu. Variabel-variabel ini harus ditentukan karena kurva karakteristik bervariasi dengan kondisi pemrosesan dan bahkan, pada tingkat yang lebih kecil, dengan intensitas dan durasi paparan. Bentuk kurva karakteristik yang serupa dapat diperoleh untuk kamera digital dengan memplot nilai piksel output log terhadap eksposur log.

Penggunaan $\log_{10}H$ sebagai pengganti H sebagai unit untuk sumbu horizontal kurva respons dari bahan fotografi menawarkan beberapa keuntungan:

1. Dalam praktiknya, kami mempertimbangkan perubahan dalam eksposur kamera dalam kaitannya dengan faktor yang mengubahnya; perkembangan alami dari eksposur adalah geometris, bukan aritmatika. (Saat meningkatkan waktu pencahayaan dari 1/60 menjadi 1/30 detik, misalnya, kita berbicara tentang menggandakan pencahayaan, bukan meningkatkannya sebesar 1/60 detik.) Oleh karena itu, kurva logaritmik memberikan representasi paling masuk akal tentang bagaimana densitas meningkat saat eksposur diubah. Rangkaian waktu pencahayaan kamera 1/500, 1/250, 1/125, dll. Adalah deret logaritmik, seperti halnya waktu pencahayaan pencetakan 2, 4, 8, 16 s.
2. *Kurva D vs. log H* menunjukkan, pada skala yang jauh lebih besar daripada kurva keterpaparan densitas, porsi kurva yang sesuai dengan kehitaman yang hanya terlihat, yaitu dengan nilai keterpaparan yang kecil. Kecepatan film biasanya dinilai dari segi keterpaparan yang diperlukan untuk menghasilkan nilai densitas yang cukup kecil.
3. Penggunaan unit logaritmik untuk sumbu horizontal dan vertikal memungkinkan nilai kerapatan dalam negatif fotografi untuk segera ditransfer ke sumbu eksposur log dari kurva karakteristik cetakan. Ini menyederhanakan tugas untuk menghubungkan kecerahan pemandangan asli, densitas transmisi negatif dan densitas refleksi cetakan.

12. Wilayah utama dari kurva karakteristik negatif

Kurva karakteristik material negatif dapat dibagi menjadi empat wilayah utama: jari kaki atau kaki, bagian yang kira-kira linier, bahu dan wilayah solarisasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2 Kurva karakteristik fotografi konvensional dari bahan negatif - kurva respons yang diperoleh dengan memplot densitas terhadap eksposur log.

Hanya pada porsi linier perbedaan kerapatan dalam negatif berbanding lurus dengan perbedaan visual dalam pemandangan. Untuk alasan ini bagian linier pada satu waktu disebut sebagai wilayah eksposur yang benar, kaki sebagai wilayah kekurangan eksposur dan bahu sebagai wilayah overexposure. Akan tetapi, seperti yang akan kita lihat nanti dalam bab ini, deskripsi seperti itu menyesatkan. Nilai densitas yang dicapai di bagian atas bahu kurva disebut sebagai D_{max} , densitas maksimum yang dapat diperoleh dalam kondisi perkembangan tertentu.

Asalkan sumbu horizontal dan vertikal memiliki skala yang sama, nilai numerik dari garis singgung sudut yang dibuat oleh bagian linier dari kurva dengan sumbu log H disebut gamma (γ). Jadi, saat sudut itu = 45, $\gamma = 1$.

Gamma dapat didefinisikan lebih ketat dalam hal nilai densitas dan eksposur log yang sesuai dengan dua titik yang terletak pada bagian garis lurus dari kurva. Pada Gambar 1.2:

Ekuasi 8.6

$$\gamma = \frac{BC}{AC} = \left(\frac{D_2 - D_1}{(\text{Log } H_2 - \text{Log } H_1)} \right)$$

Definisi γ ini tidak bergantung pada kurva karakteristik sama sekali, hanya pada kuantitas: eksposur log, yang diketahui, dan densitas, yang diukur. Namun, data yang diperlukan harus sesuai dengan titik-titik pada bagian linier dari kurva karakteristik.

Gamma mengukur kontras sensitometrik, yaitu laju di mana densitas meningkat saat eksposur log meningkat di bagian linier kurva. Perlu dicatat, bagaimanapun, bahwa gamma memberikan informasi hanya tentang bagian linier; itu tidak memberi tahu kita tentang bagian lainnya. Lebih lanjut, seperti yang akan kita lihat nanti, kontras negatif tidak ditentukan oleh gamma saja: faktor-faktor lain memainkan peran penting, dan dengan emulsi modern tidak ada bagian kurva yang dapat benar-benar linier. Dalam kasus di mana

tidak ada bagian linier, perhitungan g direduksi menjadi penentuan nilai maksimum gradien, secara teknis pada titik refleksi.

Istilah ' γ ' juga digunakan dalam evaluasi fungsi transfer sistem digital dan komponennya. Karakteristik sistem gambar digital, yang mencakup pertimbangan persyaratan reproduksi nada dari berbagai sistem pencitraan. Ini sering ditandai dengan ' γ '. parameter yang diturunkan dari fungsi konversi opto-elektronik (OECF) dari perangkat yang terlibat.

Kontras sensitometri merupakan aspek penting dari kinerja dan, dengan pengalaman, dengan mudah dapat dilihat dari pemeriksaan superfisial dari kurva H dan D (asalkan sumbu absis dan ordinat memiliki skala yang sama). Wilayah solarisasi, atau pembalikan, menjadi perhatian ketika pertama kali diamati dengan emulsi yang agak sederhana. Emulsi modern membutuhkan eksposur yang sangat besar untuk menunjukkan efek ini- umumnya urutan 1000 kali lebih besar dari eksposur normal maksimum. Secara umum, semakin efisien suatu material dalam membentuk gambar laten, semakin kecil kemungkinan terjadinya solarisasi.

Di bawah jari kaki, kurva menjadi sejajar dengan sumbu H log, dengan densitas minimum atau D_{min} . Nilai densitas di wilayah ini adalah jumlah densitas karena film atau dasar kertas yang mendukung emulsi, gelatin dari emulsi, perak yang dihasilkan dari butiran emulsi yang tidak terpapar, 'kabut'. dan noda kimia sisa yang ada setelah pembuatan dan pemrosesan film. Densitas ini, biasanya kecil, terkadang disalahartikan sebagai massa jenis dasar. Deskripsi yang paling umum digunakan adalah tingkat kabut, meskipun D_{min} lebih akurat. Ini adalah densitas minimum yang dapat diperoleh dengan proses yang digunakan. Densitas dasar adalah densitas penyangga film atau kertas, sedangkan kabut dihasilkan dari pengembangan silver halida yang tidak terpapar. Titik yang berhubungan dengan densitas terlihat pertama di atas D_{min} disebut ambang batas.

Perpotongan bagian garis lurus yang diekstrapolasi dari kurva dengan D_{min} adalah titik inersia, dan nilai eksposur pada titik ini adalah inersia. Pada kurva karakteristik yang dipublikasikan, sumbu eksposur log dapat ditandai dengan 'Relative log exposure'. sering disingkat menjadi 'Rel log H' atau, lebih tepatnya, 'Log relative exposure'. disingkat menjadi 'Log rel H'. Penggunaan skala relatif daripada log absolut H tidak memengaruhi bentuk kurva, tetapi nilai absolut kecepatan emulsi tidak dapat ditentukan langsung dari kurva.

13. Variasi kurva karakteristik dengan material

Kurva karakteristik bahan individu berbeda dalam bentuk dan posisinya relatif terhadap sumbu H log. Posisi kurva terhadap sumbu H log tergantung pada sensitivitas atau kecepatan material. Semakin cepat materialnya, semakin jauh ke kiri kurva berada. Kerapatan ambang terjadi pada eksposur terendah dengan emulsi cepat. Kecepatan film itu sendiri. Variasi utama dalam bentuk kurva karakteristik adalah panjang bagian linier dan kemiringannya (γ).

Bahan fotografi berbeda dalam hal kemiringan maksimum yang dapat dicapai dan dalam kecepatan kenaikan nilai kemiringan. Bahan negatif modern biasanya dibuat untuk menghasilkan γ 0,7 atau lebih dengan perkembangan normal. Jari kaki panjang dan garis lurus mungkin pendek atau bahkan tidak ada. Beberapa bahan cepat memiliki lengkungan kaki bengkok atau kaki anjing, yang memiliki efek dua bagian garis lurus dari lereng yang berbeda. Bagian bawah kurva cukup curam, tetapi pada densitas yang lebih

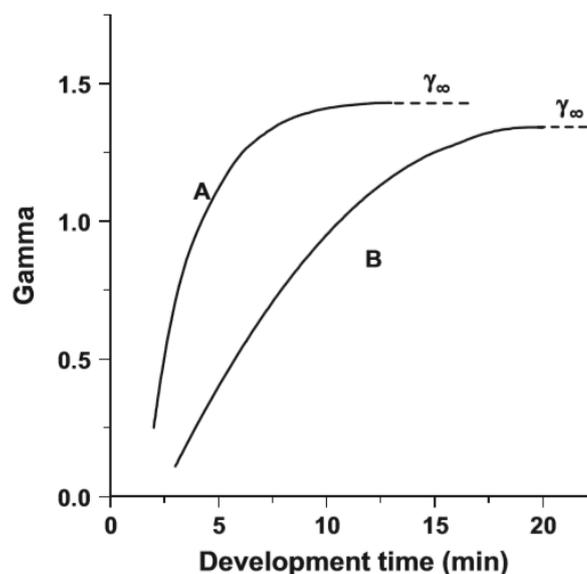
tinggi kemiringan menjadi lebih rendah. Bentuk kurva ini mungkin memiliki keuntungan apabila memotret subjek dengan sorotan yang intens, mis. adegan malam.

Bahan untuk penyalinan biasanya dirancang memiliki kaki pendek, yang menyatu menjadi bagian linier dengan kerapatan rendah, dan bagian linier panjang, yang kemiringannya bergantung pada aplikasi yang dimaksudkan bahan tersebut. Bahan yang mampu menghasilkan gamma dari di bawah 1 hingga 10, atau lebih, tersedia.

Dalam duplikasi negatif, perlu menggunakan bahan yang memiliki bagian linier panjang, yang kemiringannya dapat dengan mudah dikontrol dalam pemrosesan. Eksposur harus dibatasi ke bagian linier, dan itu menguntungkan untuk mengembangkan gamma kesatuan. Kurva karakteristik untuk bahan tertentu diterbitkan oleh produsen film.

14. Kurva gamma-time

Kurva karakteristik bukanlah fungsi tetap dari emulsi, tetapi berubah bentuk dengan kondisi eksposur, misalnya warna dan intensitas sumber cahaya, dan dengan kondisi pemrosesan; khususnya, kontras sangat dipengaruhi oleh waktu pengembangan. Dengan memplot gamma sebagai ordinat terhadap waktu pengembangan sebagai absis kita memperoleh kurva, yang bentuk umumnya diilustrasikan pada Gambar 1.3.



Gambar 1.3 Kurva waktu-gamma untuk materi yang sama di dua pengembang yang berbeda.

Kontras sensitometri, gamma, meningkat dengan sangat cepat saat perkembangan dimulai, dan kemudian pada kecepatan yang lebih bertahap sampai suatu titik tercapai di mana perkembangan yang meningkat tidak menghasilkan peningkatan lebih lanjut dalam gamma. Nilai gamma pada titik ini disebut gamma infinitas (γ^∞). Ini bervariasi dari emulsi ke emulsi dan tergantung pada tingkat tertentu pada solusi pengembangan yang digunakan. Bahan yang mampu menghasilkan nilai γ^∞ yang tinggi disebut sebagai bahan dengan kontras tinggi. Jarang diinginkan untuk berkembang menjadi gamma yang tak terbatas, karena perkembangan yang berkepanjangan meningkatkan kabut dan bintik, salah satu atau keduanya mungkin menjadi tidak dapat diterima sebelum sharpness gamma tercapai. Karena kabut kimiawi (perkembangan butiran emulsi yang tidak terpapar), gamma dapat menurun seiring dengan perkembangan yang melampaui batas gamma, karena efek densitas kabut lebih besar pada densitas rendah daripada tinggi.

Kurva waktu-gamma menunjukkan nilai gamma yang dapat diperoleh dengan bahan dan pengembang tertentu. Ini juga menunjukkan waktu pengembangan yang diperlukan untuk mencapai nilai ini atau nilai gamma yang lebih rendah. Kita telah melihat bahwa jarang diinginkan untuk menggunakan bagian paling atas dari kurva waktu gamma. Biasanya juga tidak bijaksana untuk menggunakan bagian paling bawah, di mana sedikit peningkatan waktu pengembangan memberikan peningkatan besar dalam gamma, karena di wilayah ini setiap sedikit ketidaksetaraan dalam tingkat pengembangan di seluruh film akan ditekankan, dengan kemungkinan tidak merata densitas atau bintik.

Gambar 1.3 menunjukkan kurva waktu gamma untuk sebuah film di dua pengembang yang berbeda. Kurva A diproduksi di pengembang MQ-karbonat dan kurva B di pengembang MQ-boraks. Perbandingan kurva seperti itu membantu dalam pemilihan pengembang yang sesuai ketika gamma yang diinginkan diketahui. Misalnya, jika gamma 0,5 diinginkan, pengembang MQ-boraks akan lebih disukai daripada yang lain, karena, dengan yang terakhir, kontras berubah dengan cepat dengan waktu pengembangan pada gamma yang dibutuhkan. Tetapi, untuk mencapai gamma 1.1, pengembang MQ-karbonat akan lebih cocok, yang lain membutuhkan waktu pengembangan yang terlalu lama untuk mencapai nilai ini.

Kurva waktu-gamma untuk masing-masing bahan dalam kondisi pengembangan yang dinyatakan diterbitkan oleh produsen film. Kurva seperti itu bisa sangat membantu dalam pemilihan bahan dan pengembang untuk tugas tertentu. Kondisi kerja mungkin, bagaimanapun, berbeda dari yang ditentukan dan untuk mendapatkan nilai terbesar, kurva waktu gamma untuk material tertentu harus ditentukan oleh pengguna di bawah kondisi kerja tertentu.

Saat memplot parameter seperti D_{min} , kecepatan atau kontras terhadap waktu pengembangan, seringkali berguna untuk mengadopsi skala logaritmik untuk waktu pengembangan. Ini memampatkan wilayah waktu pengembangan yang lama dan terkadang memungkinkan hasil yang lebih menarik untuk mendekati grafik garis lurus. Ini lebih mudah untuk ditarik dan digunakan daripada kurva

15. Variasi gamma dengan panjang gelombang

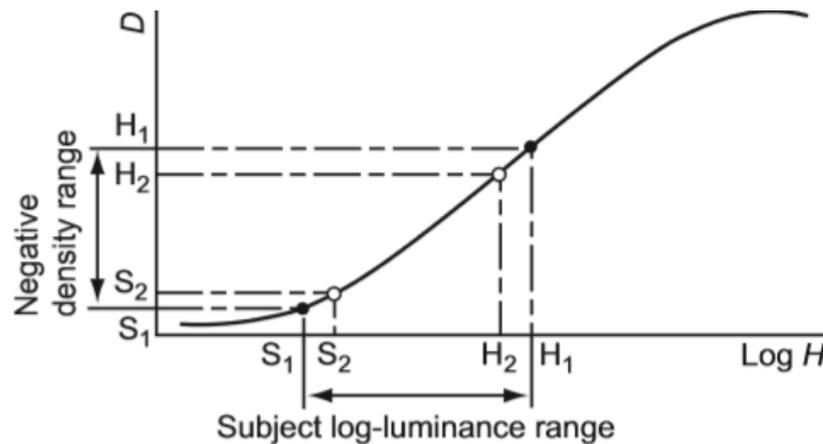
Selain bergantung pada perkembangan, gamma juga bergantung pada warna cahaya yang terbuka. Variasi dalam spektrum yang terlihat tidak besar, tetapi menjadi cukup besar di daerah ultraviolet. Kecenderungan umum adalah gamma menjadi lebih rendah saat panjang gelombang berkurang. Variasi gamma ini sebagian besar dapat diabaikan dalam fotografi biasa, tetapi harus diperhitungkan saat pencitraan langsung dengan radiasi ultraviolet (tanpa bantuan dari fluoresensi yang terlihat).

16. Menempatkan subjek pada kurva karakteristik

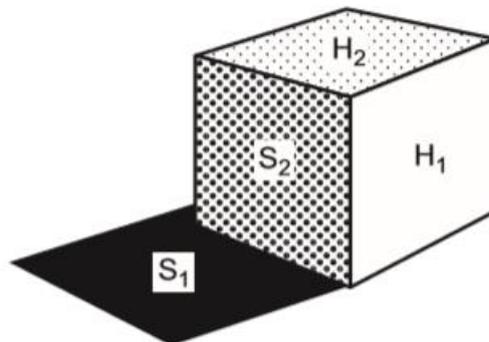
Kurva karakteristik menunjukkan respons material di bawah berbagai eksposur. Hanya sebagian dari kurva ini yang digunakan dalam satu negatif. Tingkat porsi yang digunakan tergantung pada rasio pencahayaan subjek; posisinya tergantung pada pencahayaan aktual dalam pemandangan dan pada eksposur kamera yang digunakan. Sebenarnya, rasio iluminasi gambar pada film yang menjadi perhatian kita di sini dan, jika ada suar, rasio iluminasi akan kurang dari rasio pencahayaan subjek. Dalam konteks sekarang kita akan berasumsi bahwa flare tidak ada.

Kami telah mengamati (Gambar 8.2) bahwa kurva karakteristik material negatif memiliki ujung yang panjang. Bagian kurva yang digunakan oleh negatif yang ‘terekspose dengan benar’ mencakup bagian dari jari kaki ini dan bagian bawah dari bagian garis lurus. Ini diilustrasikan pada Gambar 8.4.

Pertimbangkan untuk memotret kubus yang ditunjukkan pada Gambar 8.5, di mana S_1 adalah area paling gelap dalam subjek, S_2 paling gelap berikutnya, H_1 sorotan tertinggi dan H_2 tertinggi berikutnya. Pada eksposur normal, negatif berkembang normal, eksposur dan densitas yang sesuai dengan area ini akan mendekati seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.4.



Gambar 1.4 Bagian dari kurva karakteristik yang digunakan oleh negatif yang ‘diekspos dengan benar’ dan ‘dikembangkan dengan benar’. terletak di antara S_1 dan H_1 .



Gambar 1.5 Nada subjek.

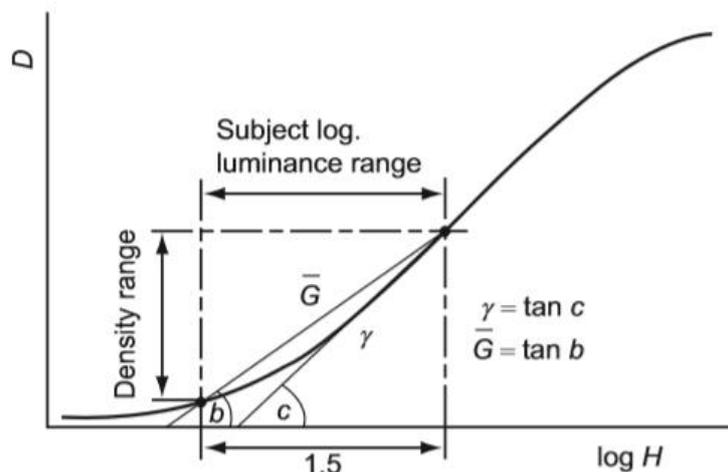
17. Pengaruh variasi pada eksposur negatif

Gambar 1.4 menunjukkan posisi nada, yang diilustrasikan pada Gambar 8.5, pada kurva karakteristik dari negatif yang diekspos dengan benar dan diproses. Jika eksposur yang diberikan terlalu sedikit, semua nada akan direkam lebih rendah pada kurva dan S_1 dan S_2 akan memiliki pemisahan densitas yang jauh lebih rendah di negatif, dan dalam cetakan, detail bayangan akan hilang. Namun, nada sorotan H_1 dan H_2 akan terletak pada bagian yang hampir linier dari kurva karakteristik, dan nada sorotan akan dibedakan dengan baik. Kurang pencahayaan sedang dari negatif dapat dikompensasikan dengan menggunakan kertas cetak bermutu tinggi, tetapi jika S_1 dan S_2 memiliki kerapatan yang identik pada negatif, tidak ada pemisahan nada bayangan pada cetakan. Dalam negatif pencahayaan berlebih, mengingat perkembangan normal, bayangan dan nada sorotan yang dipilih semuanya akan terekam pada bagian kontras tinggi dari kurva karakteristik. Densitas

keseluruhan negatif lebih tinggi dari biasanya dan kisaran kerapatan diperluas. Secara khusus, pemisahan nada dalam bayangan ditingkatkan. Dalam kasus yang jarang terjadi pada eksposur berlebih bruto, bahu kurva karakteristik dapat dicapai, kisaran densitas negatif akan dikurangi dan detail sorotan dikompresi atau hilang seluruhnya.

18. Gradien rata-rata dan G

Karena negatif biasanya menempati bagian ujung kurva serta bagian dari garis lurus, gamma sendiri memberikan gambaran yang tidak lengkap tentang kontras emulsi. Pengukuran yang lebih baik diperoleh dengan mengambil kemiringan garis yang menghubungkan dua titik pembatas dari porsi kurva karakteristik yang digunakan (Gambar 8.6). Ini disebut sebagai gradien rata-rata. Itu selalu lebih rendah dari gamma. Beberapa titik pembatas pada kurva ditentukan dalam standar yang berkaitan dengan bahan fotografi khusus. Untuk film negatif normal, kuantitas G (\bar{G}) didefinisikan oleh Ilford Ltd sebagai kemiringan garis yang menghubungkan titik dengan densitas 0,1 di atas D_{min} dengan titik pada kurva karakteristik 1,5 unit log H ke arah eksposur yang lebih besar .



Gambar 1.6 Gradien rata-rata.

19. Indeks kontras

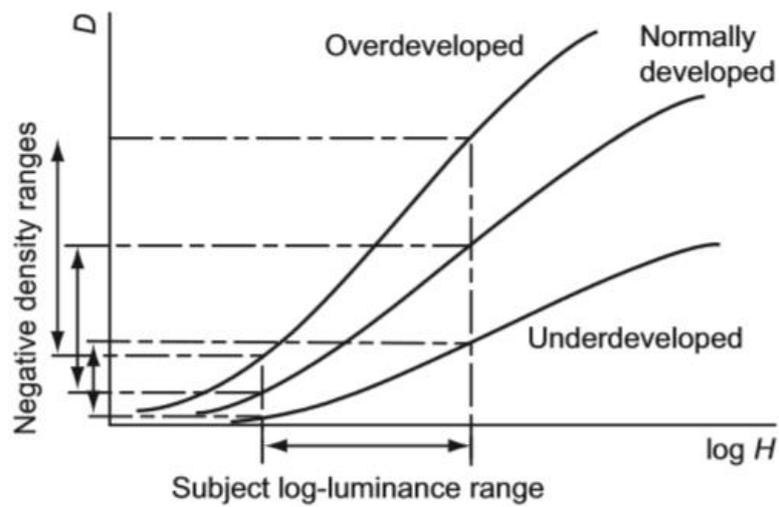
Ukuran kontras yang dibuat oleh Kodak adalah indeks kontras, yang, seperti G, memperhitungkan ujung kurva karakteristik. Penentuannya melibatkan penggunaan skala transparan yang agak rumit yang dilapisi pada kurva karakteristik, meskipun metode perkiraannya adalah menggambar busur sebesar 2,0 unit yang memotong kurva karakteristik dan berpusat pada titik 0,1 unit di atas D_{min} . Ini membutuhkan eksposur log dan sumbu densitas yang sama-sama diskalakan. Kemiringan garis lurus yang menghubungkan kedua titik ini adalah indeks kontras. Kurva karakteristik bahan mungkin berbeda dalam gamma tetapi memiliki indeks kontras yang identik, atau memang G. Negatif dari indeks kontras yang identik atau G dapat diharapkan untuk menghasilkan cetakan yang dapat diterima dengan menggunakan kertas cetak kelas yang sama.

20. Pengaruh variasi pada perkembangan negatif

Negatif yang diwakili oleh kurva pada Gambar 8.6 diberi perkembangan normal. Jika kita membuat dua eksposur identik lainnya dari subjek yang sama, dan memberikan lebih banyak pengembangan pada satu dan lebih sedikit pengembangan pada yang lain, kita akan mendapatkan dua kurva lebih lanjut seperti itu, bersama dengan kurva 'berkembang secara

normal ' (Gambar 1.7). Eksposur kamera sama di ketiga kasus, sehingga bagian kurva yang digunakan, diukur terhadap sumbu log H, sama untuk ketiganya.

Akan terlihat bahwa perkembangan yang berlebihan meningkatkan densitas negatif dalam bayangan sedikit dan dalam sorotan untuk sebagian besar. Akibatnya, negatif yang berkembang berlebihan secara keseluruhan lebih padat dan, yang lebih penting, kisaran densitasnya meningkat. Dalam pengembangan memiliki efek sebaliknya. Ini mengurangi kerapatan pada bayangan dan sorotan, pada sorotan lebih luas daripada dalam bayangan, dan rentang kerapatan negatif berkurang, seperti kerapatan keseluruhannya. Dengan demikian, pengaruh utama variasi dalam derajat perkembangan adalah pada kisaran densitas, sering digambarkan sebagai kontras negatif.



Gambar 1.7 Pengaruh negatif variasi dalam pembangunan

21. Garis lintang eksposur

Garis lintang eksposur adalah faktor di mana eksposur kamera minimum yang diperlukan untuk memberikan negatif dengan detail bayangan yang memadai dapat dikalikan, tanpa kehilangan detail sorotan.

Kita dapat menyebut jarak di sepanjang sumbu log H antara titik terendah dan tertinggi yang dapat digunakan pada kurva sebagai rentang eksposur yang berguna. Hal ini terutama bergantung pada emulsi dan tingkat perkembangannya. Kedua faktor ini juga mengatur garis lintang, tetapi ini juga bergantung pada rentang pencahayaan log subjek. Dalam praktiknya, hilangnya detail sorotan (menyetel batas atas ke eksposur) sering kali diakibatkan oleh hilangnya resolusi karena graininess dan iradiasi, sebelum bahu tercapai. Karena resolusi yang diperlukan biasanya bergantung pada ukuran negatif dan tingkat pembesaran akibatnya dalam membuat cetakan, kami dapat menambahkan 'format negatif' ke faktor praktis yang mengatur rentang eksposur dan garis lintang yang berguna. Secara umum, garis lintang eksposur dengan format kecil lebih sedikit dibandingkan dengan format yang lebih besar.

Kisaran pencahayaan log dari subjek rata-rata kurang dari kisaran eksposur log yang berguna dari film, dan biasanya ada cukup lintang dalam eksposur. Namun, jika kita memiliki subjek dengan rentang pencahayaan log yang sama dengan rentang eksposur log berguna dari film, hanya satu level eksposur yang diizinkan. Dengan subjek luar biasa yang memiliki rentang pencahayaan lebih besar daripada rentang eksposur berguna film, tidak

ada level eksposur yang memberikan hasil yang sempurna; detail bayangan atau sorotan atau keduanya akan hilang. Hal ini paling sering muncul dengan bahan kontras tinggi, seperti film pembalikan warna (slide), ketika detail bayangan biasanya dikorbankan untuk mempertahankan informasi sorotan.

Jika rentang subjek di bawah rata-rata, kami memiliki garis lintang ekstra. Dalam praktiknya, bagaimanapun, ini dibatasi pada sisi kekurangan eksposur oleh fakta bahwa eksposur yang terlalu dekat dengan minimum akan ditempatkan seluruhnya di kaki dan dapat menghasilkan negatif lunak yang tak dapat dicetak. Biasanya lebih disukai untuk menempatkan subjek pada kurva karakteristik sedemikian rupa sehingga setidaknya sebagian berada pada bagian linier. Dengan cara ini kontras negatif yang lebih baik dan kualitas cetak yang lebih memuaskan dapat dicapai.

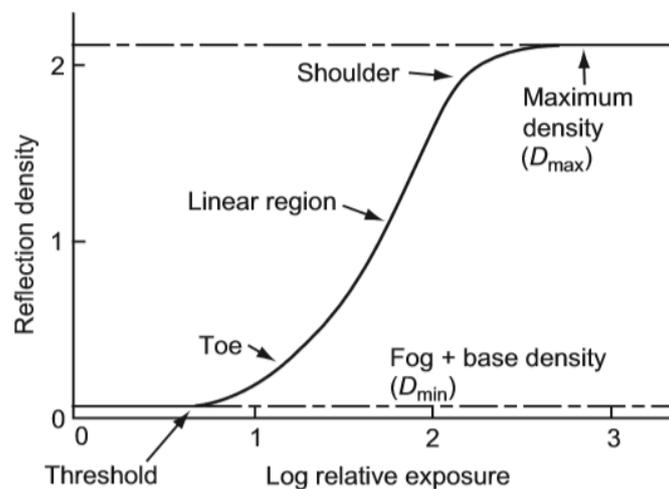
22. Kurva respons dari kertas foto

Kurva karakteristik kertas diperoleh dengan cara yang sama seperti film, dengan memplot densitas terhadap eksposur log. Massa jenis dalam hal ini adalah kerapatan refleksi dan ditentukan dengan ekuasi:

Ekuasi 87

di mana ρ (huruf Yunani rho) mewakili pantulan, yang merupakan rasio cahaya yang dipantulkan oleh gambar ke cahaya yang dipantulkan oleh alas atau putih 'standar' yang ditentukan. Definisi ini analog dengan densitas transmisi.

Gambar 1.8 mengilustrasikan bentuk umum kurva karakteristik sebuah kertas. Kurva ini, seperti yang ada pada material negatif, dapat dibagi menjadi empat wilayah utama: kaki, garis lurus (atau wilayah linier), bahu dan wilayah solarisasi, meskipun yang terakhir ini jarang ditemui dalam praktik.



Gambar 1.8 'Geografi' dari kurva karakteristik kertas cetak fotografi

Perbedaan utama antara kurva kertas dan kurva film adalah:

1. Bahu dicapai pada densitas yang lebih rendah dan berbelok tajam, kurva menjadi sejajar dengan sumbu log H pada nilai D_{max} jarang melebihi nilai 2.1.
2. Jari kaki meluas ke densitas yang cukup tinggi.
3. Bagian garis lurus pendek dan, di beberapa makalah, tidak ada

4. Kemiringan bagian linier umumnya lebih curam daripada kemiringan emulsi film kamera.
5. Kabut (dalam kondisi perkembangan normal dengan cahaya aman yang benar) hampir tidak ada, meskipun densitas minimum mungkin sedikit melebihi bahan dasar kertas saja, karena noda yang diperoleh selama pemrosesan.

Perbedaan (2) dan (4) muncul dari fakta bahwa ketika bayangan perak pada dasar difusi buram dilihat oleh cahaya yang dipantulkan (berlawanan dengan yang ditransmisikan), densitas efektifnya meningkat, karena pada densitas sedang, cahaya harus melewati gambar setidaknya dua kali.

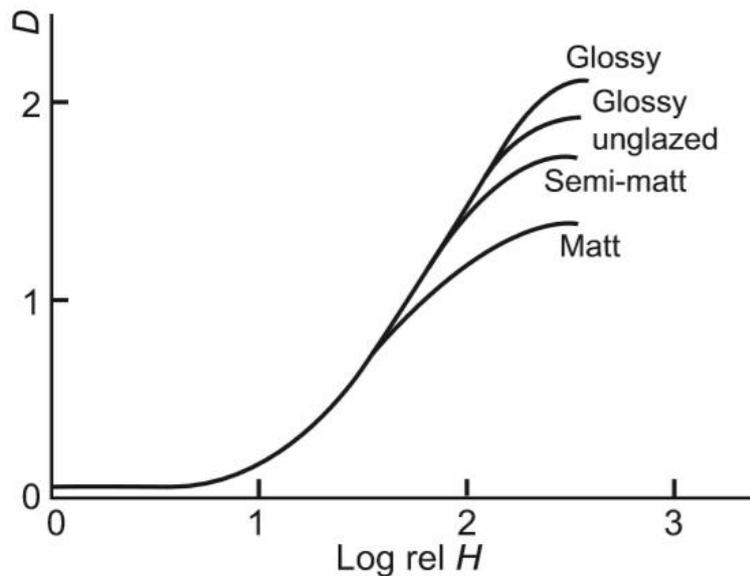
23. Hitam maksimal

Konsekuensi praktis dari (1) di atas adalah bahwa densitas maksimum yang dapat diperoleh pada kertas apa pun terbatas, betapapun lama pemaparan atau perkembangannya. Nilai densitas tertinggi yang dapat diperoleh untuk kertas tertentu, dengan eksposur penuh dan pengembangan, disebut hitam maksimum kertas. Densitas maksimum yang diperoleh pada kertas tertentu tergantung pada jenis permukaannya. Insiden ringan pada cetakan mengalami tiga jenis refleksi:

1. Sebagian direfleksikan oleh permukaan lapisan gelatin tempat butiran perak tertanam.
2. Sebagian direfleksikan oleh butiran perak itu sendiri.
3. Sisanya direfleksikan oleh baryta atau lapisan resin pada dasar kertas.

Jumlah refleksi ini menentukan refleksi dan densitas cetakan. Dengan meningkatkan eksposur yang diterima oleh kertas, dan dengan demikian jumlah perak dalam gambar yang dikembangkan, kita dapat menghilangkan sepenuhnya refleksi dari dasar kertas, tetapi refleksi dari permukaan gelatin emulsi dan dari butiran individu itu sendiri tidak dapat dikurangi dengan cara ini. Refleksi ini membatasi hitam maksimum yang dapat diperoleh.

Tabel 1.4 Hitam maksimal kertas cetak dengan permukaan berbeda	
PERMUKAN	REFLEKSI DENSITY (MAKSIMUMM)
Glossy, glazed	2.10
Glossy, unglazed	1.85
Semi-matt	1.65
Matt	1.30



Gambar 1.9 Karakteristik kertas cetak dengan permukaan berbeda.

Refleksi dari permukaan emulsi tergantung pada sifat permukaan ini. Sebuah cetakan biasanya akan dilihat sedemikian rupa sehingga pantulan langsung, spekuler, dari permukaannya tidak masuk ke mata. Oleh karena itu kami hanya mementingkan refleksi difus. Sekarang, refleksi dari permukaan kertas glossy hampir seluruhnya langsung, sehingga jumlah cahaya yang dipantulkan dari permukaan kertas semacam itu, yang masuk ke mata saat melihat cetakan, sangat kecil. Dalam keadaan ini, batas densitas maksimum diatur, pada prinsipnya, oleh cahaya yang dipantulkan oleh bayangan perak itu sendiri. Ini biasanya sedikit kurang dari 1%, sesuai dengan densitas maksimum lebih dari 2.0. Namun, refleksi dari permukaan kertas matt hampir seluruhnya tersebar, sehingga sejumlah cahaya yang cukup (katakanlah 4%) dari permukaan kertas mencapai mata, selain cahaya yang dipantulkan dari bayangan perak. (Mungkin juga terdapat pantulan cahaya dari bahan partikulat, termasuk dalam emulsi banyak kertas matt.) Oleh karena itu, hitam maksimum kertas matt relatif rendah. Kertas semi-matt dan 'stipple' memiliki nilai antara hitam maksimum antara kertas matt dan glossy. Tabel 1.4 menunjukkan nilai tipikal hitam maksimum yang dapat diperoleh pada kertas dari tiga jenis permukaan utama.

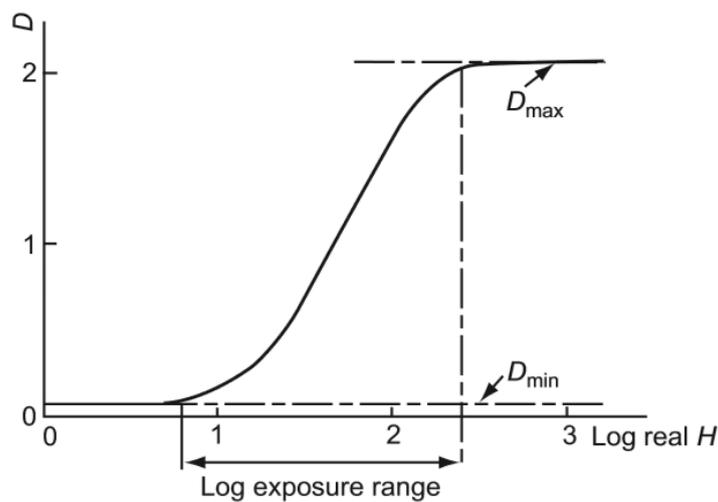
Kertas cetak berlapis resin tidak mengkilap setelah diproses tetapi memiliki kilap alami yang tinggi dan dapat mencapai D_{max} lebih dari 2.0 tanpa glazur. Hasil cetak warna glossy memiliki sedikit bahan yang memantulkan selain dasar kertas, dan nilai setinggi 2,5 tidak jarang. Pengaruh variasi hitam maksimum pada kurva karakteristik sebagian besar terbatas pada bahu kurva, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.9.

24. Rentang eksposur kertas

Rasio eksposur yang sesuai dengan titik tertinggi dan terendah pada kurva yang digunakan dalam cetakan normal disebut rentang eksposur kertas (Gambar 1.10) dan dinyatakan dalam unit eksposur atau unit eksposur log. Ini mewakili rentang eksposur yang dapat digunakan dari kertas dan sesuai dengan rentang densitas negatif terbesar, yang dapat diakomodasi sepenuhnya.

25. Variasi kurva karakteristik cetak dengan jenis emulsi

Makalah fotografi menggunakan emulsi yang mengandung berbagai proporsi silver chloride dan perak bromida. Emulsi lambat yang ditujukan untuk pencetakan kontak secara tradisional mengandung proporsi silver chloride yang tinggi, sementara kertas pembesar mengandung perak bromida dalam proporsi yang lebih besar. Kertas nama 'klorobromida' dan 'bromida' menunjukkan proporsi berbeda dari perak bromida yang ada dan kurva karakteristik kertas ini bentuknya agak berbeda. Efek praktis dari bentuk kurva yang berbeda adalah untuk mengubah hubungan tonal dalam cetakan, masalah yang memiliki kepentingan subjektif. Perbedaan halus seperti itu memberikan kontrol tambahan pada pencetakan.



Gambar 1.10 Kisaran eksposur kertas cetak.

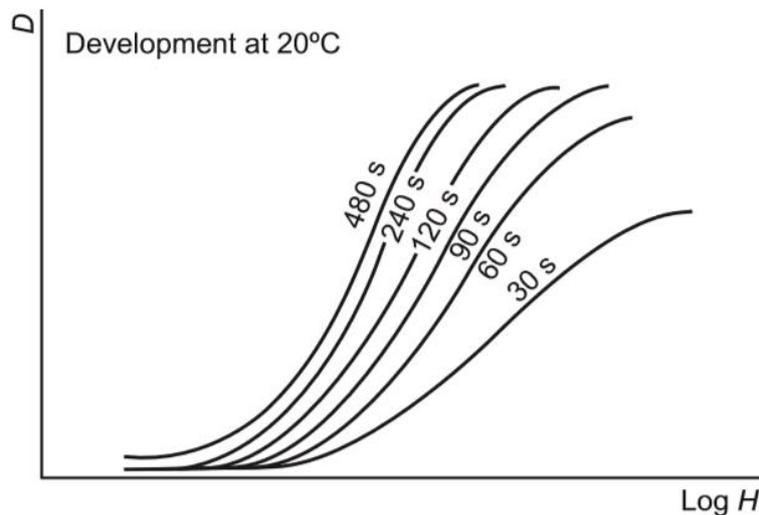
26. Variasi kurva karakteristik cetak dengan perkembangan

Dengan kertas kurva karakteristik bervariasi dengan perkembangan, tetapi agak berbeda dari film negatif. Gambar 1.11 menunjukkan keluarga kurva untuk kertas bromida. Waktu pengembangan yang biasanya direkomendasikan untuk makalah ini (dalam pekerjaan pengembang) adalah 2 menit pada 20°C. Dengan kertas cetak yang lebih modern, pengembangan biasanya membutuhkan waktu minimal sekitar 1 menit. Pada waktu pengembangan yang lebih lama, kurva dapat dipindahkan ke tingkat eksposur yang lebih rendah tetapi, tidak seperti kurva kertas klorida, slopemay mungkin sedikit meningkat. Dengan kata lain, baik kecepatan dan kontras kertas bromida dapat meningkat pada perkembangan yang lama. Peningkatan kontras biasanya tidak terlalu besar, tetapi dapat menjadi nilai praktis. Pengaruh utama variasi waktu pengembangan di atas kertas dari semua jenis adalah pada kecepatan pengembangan efektif kertas.

Situasi ini mungkin diperumit oleh komposisi kertas 'bromida' yang mungkin mengandung silver chloride dalam proporsi yang signifikan. Ini memodifikasi perilaku pengembangan sehingga tidak ada peningkatan kontras yang terdeteksi setelah hitam maksimum tercapai.

Dengan kertas dari semua jenis, ada garis lintang pengembangan antara dua ekstrim keterbelakangan dan pembangunan berlebihan. Dengan kertas yang ditunjukkan pada Gambar 1.11, ini memanjang dari sekitar 1,5 hingga 4 menit. Di antara waktu-waktu ini, hitam maksimum dicapai tanpa peningkatan kabut. Rasio waktu eksposur yang diperlukan

pada waktu pengembangan terpendek dan terpanjang yang dapat diterima disebut sebagai garis lintang eksposur pencetakan. Lintang pengembangan dan lintang keterpaparan saling terkait dan keduanya tidak dapat digunakan pada waktu yang sama. Jadi, setelah eksposur dibuat, hanya ada satu waktu pengembangan yang akan memberikan cetakan densitas yang dibutuhkan. Dalam pemrosesan piring, garis lintang pengembangan dapat dikurangi dalam kertas cetak modern dengan sensitivitas hijau yang diperluas, yang dapat membuat emulsi bertanggung jawab terhadap eksposur aktinik, eksposur yang menghasilkan gambar laten, dengan lampu aman kuning atau oranye. Efeknya mungkin terlihat, pada level rendah, sebagai pengurangan kontras tonal pada cetakan yang dibuat. Mungkin tidak ada peningkatan level kabut, tetapi pengurangan kontras mungkin terlihat.



Gambar 8.11 Kurva karakteristik kertas cetak bromida tradisional untuk waktu pengembangan yang berbeda.

27. Persyaratan dalam mencetak

Secara umum disepakati bahwa, dalam cetakan:

1. Semua nada negatif yang penting akan muncul di cetakan.
2. Hasil cetak harus memiliki rentang warna yang lengkap, dari hitam hingga putih, yang dapat dihasilkan pada kertas yang digunakan. (Bahkan dalam foto-foto high-key dan low-key biasanya diinginkan bahwa cetakan harus menunjukkan beberapa putih dan sebagian hitam, betapapun kecil area ini.)

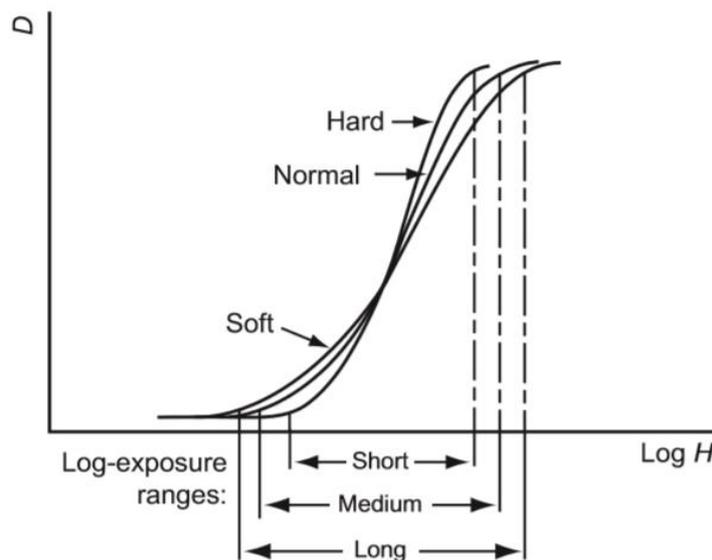
Dalam pencetakan, eksposur kertas di area mana pun diatur oleh densitas negatif di area yang sesuai: semakin besar densitas area negatif, semakin sedikit eksposur, dan sebaliknya. Untuk memenuhi persyaratan di atas, eksposur melalui area highlight (paling gelap) dari negatif harus sesuai dengan ujung kurva kertas cetak, dan eksposur melalui area bayangan (paling terang) dari negatif harus sesuai dengan bahu kurva ini. Dinyatakan secara sensitif, ini berarti bahwa kisaran pemaparan log kertas harus sama dengan kisaran densitas negatif.

Sekarang, tidak semua negatif memiliki rentang densitas yang sama, yang bervariasi dengan rentang pencahayaan log subjek, emulsi yang digunakan, pencahayaan, dan tingkat perkembangan. Oleh karena itu, tidak ada satu kertas pun yang cocok untuk semua negatif karena, seperti yang telah kita lihat, kisaran eksposur log dari sebuah kertas memiliki karakteristik tetap tanpa-atom, hanya dipengaruhi sedikit (jika sama sekali) oleh pengembangan. Sebuah kertas tunggal dengan rentang eksposur log yang cukup panjang

akan memungkinkan persyaratan (1) dipenuhi dalam semua kasus, tetapi tidak persyaratan (2). Oleh karena itu, kertas cetak diproduksi dalam serangkaian nilai kontras yang berbeda atau rentang eksposur yang dapat digunakan.

28. Kontras kertas

Pada Gambar 1.12 ditunjukkan kurva karakteristik rangkaian kertas bromida. Semua kertas ini memiliki permukaan yang sama dan hanya berbeda dalam kontrasnya, atau rentang eksposur yang dapat digunakan, masing-masing dijelaskan sebagai soft, normal dan hard. Ini biasanya ditandai dengan nilai mulai dari 0 dengan kontras sangat rendah hingga 5 dengan kontras sangat tinggi. Ketiga makalah telah dikembangkan untuk waktu yang sama. Perlu diperhatikan bahwa ketiga kurva menunjukkan hitam maksimum yang sama, tetapi kecuraman kurva meningkat, dan rentang eksposur menurun, seiring dengan kemajuan kita dari kertas 'lunak' ke 'keras'. Kertas lembut dengan rentang eksposur log panjang dimaksudkan untuk digunakan dengan negatif pada rentang densitas tinggi. Sebaliknya, kertas 'keras' dengan rentang keterpaparan log pendek, dimaksudkan untuk digunakan dengan negatif dengan rentang kerapatan rendah.



Gambar 1.12 Kontras kertas.

Kertas kontras variabel terdiri dari dua emulsi dengan kontras yang berbeda dan memiliki sensitivitas spektral yang berbeda. Kontrasnya divariasikan dengan menyaring pembesar yang sesuai pada eksposur; biasanya, nilai tertinggi dicapai dengan menggunakan filter kelas 5, yaitu magenta, dan terendah dengan menggunakan filter kelas 0, yang berwarna kuning. Kontras menengah dicapai dengan menggunakan satu set filter warna yang dirancang dengan tepat, atau dengan menggunakan kepala pembesar khusus untuk memvariasikan distribusi spektral dari iluminasi pencetakan. Sensitometri kertas semacam itu akan membutuhkan filtrasi yang serupa ditambah, biasanya, filter koreksi untuk menaikkan suhu warna ke pembesar biasa jika sumber 2856K digunakan dalam sensitometer. Kurva karakteristik yang sesuai dengan nilai kontras akan mendekati yang ditemukan untuk kertas bertingkat tradisional.

Jika negatif dari subjek yang sama, hanya berbeda kontrasnya, masing-masing dicetak pada kertas dengan kisaran eksposur yang sesuai, hasil cetakan akan hampir sama. Namun, jika percobaan dilakukan untuk mencetak pada kertas dengan rentang eksposur log yang

terlalu pendek, dan eksposur disesuaikan untuk memberikan densitas yang benar, katakanlah, sorotan, maka bayangan akan terlalu terang, detail bayangan akan hilang di beberapa area hitam maksimal, dan hasilnya akan tampak terlalu kontras. Sebaliknya, jika kertas dengan rentang eksposur log yang terlalu panjang digunakan (yaitu tingkatan yang terlalu lembut) dan eksposur kembali disesuaikan untuk sorotan, area bayangan cetakan akan menjadi kurang terang dan hasilnya akan tampak 'datar'.

Semakin halus nilai kertas, yaitu semakin panjang rentang eksposur log, semakin besar garis lintang eksposur (seperti yang dijelaskan sebelumnya) dalam pencetakan. Namun, secara umum tidak bijaksana untuk bertujuan menghasilkan negatif yang sesuai dengan kertas terlembut yang tersedia karena seseorang tidak memiliki alasan untuk mundur jika, karena alasan tertentu, negatif terbukti sangat kontras. Oleh karena itu biasanya yang terbaik adalah membidik produksi negatif yang sesuai untuk dicetak pada kertas kelas menengah.

Sederhana, jika perkiraan, memeriksa kisaran eksposur kertas dapat dibuat dengan memberikan serangkaian eksposur yang semakin meningkat. Rasio eksposur adalah rasio waktu eksposur yang diperlukan untuk menghasilkan hitam terdalam yang akan diberikan kertas, dengan yang diperlukan untuk menghasilkan densitas yang hanya terlihat. Serangkaian waktu pencahayaan yang khas, menggunakan pengaturan pembesar untuk penggunaan normal, dapat dicapai dengan rangkaian geometris: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 detik. Kartu buram dapat ditingkatkan di seluruh permukaan kertas dengan satu divisi setelah setiap langkah eksposur - eksposur yang disarankan akan menghasilkan rangkaian keseluruhan dari 1 hingga 512 detik. Jika perlu, apertur lensa dapat disesuaikan untuk memastikan bahwa semua tahapan terekspos, dari putih ke hitam, diperoleh.

Beberapa printer monokrom yang terampil menggunakan metode yang menarik untuk mengontrol reproduksi nada. Mereka menggunakan seragam singkat, bukan gambar, pra-eksposur atau pra-abu untuk memodifikasi bentuk kurva karakteristik dari kertas cetak. Secara umum, semakin tinggi intensitas pra-flash, semakin rendah kontras yang diperoleh. Mungkin ada beberapa peningkatan dalam densitas minimum jika pengurangan kontras yang besar dilakukan, tetapi ini mungkin dapat diterima.

29. Kegagalan hukum timbal balik

Hukum timbal balik, yang diucapkan oleh Bunsen dan Roscoe pada tahun 1862, menyatakan bahwa untuk bahan peka cahaya apa pun, efek fotokimia berbanding lurus dengan energi cahaya yang terjadi, yaitu produk penerangan dan durasi pemaparan. Untuk emulsi fotografis, ini berarti bahwa kerapatan yang sama akan diperoleh jika pencahayaan atau durasi pencahayaan bervariasi, asalkan faktor lain juga bervariasi sehingga produk H tetap konstan dalam Ekuasi 8.1.

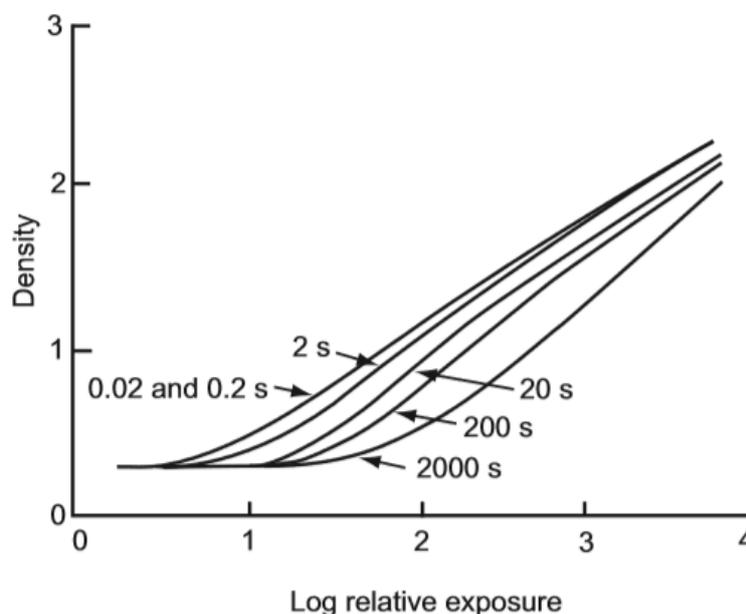
Abney pertama-tama menarik perhatian pada fakta bahwa efek fotografis bergantung pada nilai aktual H dan t , dan tidak hanya pada produk mereka. Kegagalan timbal balik yang disebut ini muncul karena efek eksposur pada bahan fotografi bergantung pada kecepatan di mana energi disuplai. Semua emulsi menunjukkan kegagalan timbal balik sampai batas tertentu, tetapi biasanya serius hanya pada tingkat pencahayaan yang sangat tinggi atau rendah, dan untuk banyak fotografi umum hukum timbal balik dapat dianggap berlaku. Namun, di laboratorium sensitometri, efek kegagalan timbal balik tidak dapat dan tidak boleh diabaikan, atau dalam aplikasi praktis tertentu dalam fotografi.

Jika kepekaan akan menjadi panduan yang berguna untuk kinerja bahan fotografi di bawah kondisi penggunaan yang khas, kami harus memperkirakan kondisi tersebut di laboratorium kepekaan. Dalam praktiknya, sangat membantu untuk mengetahui dan memahami perilaku film dalam metode dan kondisi kita sendiri.

30. Efek praktis dari kegagalan timbal balik

Kegagalan timbal balik ditemui dalam praktik sebagai hilangnya kecepatan dan peningkatan kontras pada tingkat pencahayaan rendah, yaitu pada waktu pencahayaan yang lama. Derajat penurunan kecepatan dan wilayah di mana kecepatan maksimum diperoleh bervariasi dari bahan ke bahan. Efek kegagalan timbal balik diilustrasikan pada Gambar 8.13, yang mengilustrasikan perilaku film negatif cepat pada rentang durasi pemaparan. Tanpa kegagalan timbal balik, semua kurva akan identik dan bertepatan dengan waktu pemaparan 0,02 dan 0,2 detik. Namun, kehilangan kecepatan efektif utama, terjadi pada eksposur yang lebih lama, bersama dengan beberapa penguatan kontras.

Sebagai akibat dari kegagalan timbal balik, serangkaian eksposur bergradasi yang dibuat menggunakan skala waktu menghasilkan hasil yang berbeda dari himpunan yang dibuat menggunakan skala intensitas. Akibatnya, dalam sensitometri, skala yang sesuai dengan kondisi yang digunakan harus dipilih jika kurva yang dihasilkan akan memberikan hubungan yang sebenarnya dengan praktik. Untuk alasan yang sama, faktor filter bergantung pada apakah peningkatan eksposur dari filter negatif diperoleh dengan meningkatkan intensitas atau durasi eksposur. Oleh karena itu, dua jenis faktor filter terkadang dikutip: faktor 'skala intensitas' dan 'skala waktu'.



Gambar 1.13 Kurva karakteristik dari film negatif cepat untuk durasi pemaparan yang berbeda.

Variasi kecepatan dan kontras dengan durasi pemaparan yang berbeda biasanya berbeda untuk masing-masing dari tiga lapisan emulsi yang ada dalam bahan warna. Akibatnya, penyimpangan dari kondisi pemaparan yang direkomendasikan dapat menyebabkan perubahan yang tidak dapat diterima dalam keseimbangan warna yang tidak dapat dikompensasikan. Untungnya, produsen film berwarna untuk penggunaan profesional membuat film dalam dua kelas: satu untuk pencahayaan siang hari yang

pendek, atau asap elektronik, pencahayaan dan yang kedua untuk pencahayaan studio yang lama.

Perlu dicatat bahwa meskipun mekanisme yang mendasari efek timbal balik anomali bergantung pada iluminasi pada emulsi dan dapat dijelaskan secara memadai atas dasar itu, durasi pemaparanlah yang sangat penting dalam menentukan pentingnya kegagalan timbal balik bagi fotografer praktis. .

31. Efek intermittency

Eksposur yang diberikan sebagai serangkaian cicilan biasanya tidak memberikan hasil yang sama sebagai eksposur berkelanjutan dengan durasi total yang sama. Variasi ini dikenal sebagai efek intermittency. Ini terkait dengan kegagalan timbal balik, dan besarnya bervariasi dengan material. Dalam fotografi praktis, efek intermittency biasanya tidak penting kecuali, mungkin, dalam pembuatan strip uji pada kertas cetak untuk menentukan eksposur pencetakan yang benar. Jika serangkaian eksposur terpisah digunakan untuk membuat strip uji, waktu yang disarankan mungkin tidak sesuai untuk satu eksposur pencetakan kontinu. Dalam kepekaan, efek ini tidak dapat diabaikan dan eksposur tunggal, berkelanjutan digunakan.

31.1. Sensitometer

Sensitometer adalah instrumen untuk mengekspos materi fotografi dalam serangkaian langkah bertingkat, yang nilainya diketahui secara akurat. Hal penting dari sensitometer adalah:

1. *Sumber cahaya dengan intensitas dan kualitas warna standar yang diketahui.* Banyak sumber telah diusulkan dan digunakan pada berbagai waktu. Sumber cahaya yang diadopsi sebagai standar dalam beberapa tahun terakhir adalah lampu tungsten berisi gas yang beroperasi pada suhu warna 2856 K. Lampu digunakan dengan filter penyerap selektif untuk menghasilkan distribusi spektral yang sesuai dengan siang hari 5500 K, dimodifikasi oleh a lensa kamera biasa. Filter yang digunakan terbuat dari kaca yang sesuai. 5500K sesuai dengan siang hari dengan matahari pada ketinggian khas zona beriklim sedang selama jam-jam yang direkomendasikan untuk fotografi berwarna dan cocok untuk pencahayaan film berwarna dan monokrom yang dirancang untuk penggunaan siang hari. Sumber cahaya sensitometrik apa pun harus distabilkan dalam hal intensitas cahaya dan, terutama jika digunakan untuk bahan warna, suhu warna. Fluktuasi tegangan listrik dapat mengubah kedua kuantitas, dan umumnya dikompensasikan dengan stabilisator tegangan yang canggih. Dalam kebanyakan kasus, suplai DC ke lampu digunakan untuk menghindari modulasi AC dari pemaparan, yang mungkin signifikan pada waktu pemaparan yang singkat.
2. *Modulasi intensitas cahaya.* Untuk menghasilkan rangkaian eksposur yang bergradasi, dimungkinkan untuk mengubah iluminasi untuk mendapatkan data sensitometrik, yang akan mencerminkan perilaku material dengan benar dalam kondisi penggunaan dalam kamera. Waktu pemaparan dan intensitas harus sebanding dengan material yang dirancang.

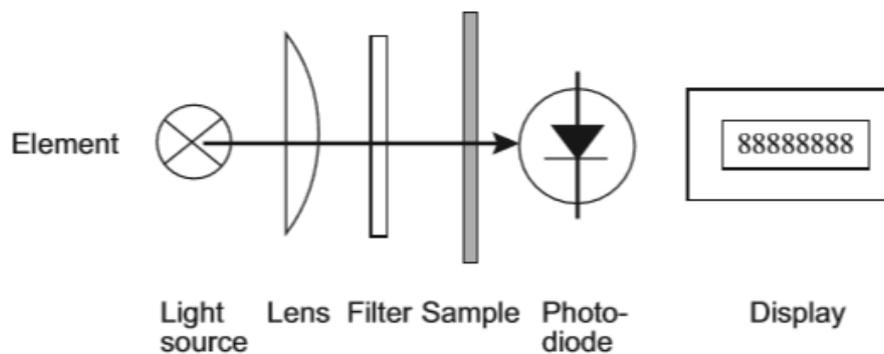
Serangkaian eksposur di mana skala diperoleh dengan memvariasikan intensitas yang disebut sebagai skala intensitas yang dapat dengan mudah dicapai dengan menggunakan 'iris langkah' netral. Sensitometer dirancang sedemikian rupa sehingga eksposur meningkat secara logaritmik di sepanjang strip. Kenaikan eksposur

log biasanya 0.30, 0.15 atau 0.10. Jika, untuk alasan apapun, diinginkan untuk menghentikan eksposur, ini harus dilakukan sedemikian rupa sehingga efek intermittency tidak mempengaruhi hasil.

31.2. Densitometer

Nama densitometer diberikan untuk bentuk khusus dari fotometer yang dirancang untuk mengukur densitas fotografis. Instrumen yang dirancang untuk mengukur densitas film dan pelat dijelaskan sebagai densitometer transmisi, sedangkan instrumen yang dirancang untuk mengukur kertas disebut densitometer refleksi. Beberapa instrumen dirancang untuk memungkinkan pengukuran densitas transmisi dan refleksi, biasanya menggunakan kepala sensor terpisah untuk dua tugas tersebut. Densitometer umumnya merupakan instrumen sinar tunggal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.14 dan penggunaan detektor solid-state, seperti fotodiode, sekarang hampir bersifat universal.

Jenis densitometer transmisi yang paling umum menggunakan detektor peka cahaya yang diterangi oleh berkas cahaya di mana sampel yang akan diukur ditempatkan. Respons detektor ditampilkan sebagai kerapatan optik. Fitur khas yang diilustrasikan pada Gambar 1.14 merupakan satu beam densitometer pembacaan langsung. Instrumen semacam itu biasanya dipasang dengan menyesuaikan pembacaan kerapatan ke nol bila tidak ada sampel yang ada di berkas sinar. Operasi ini dapat diikuti dengan pengaturan densitas tinggi, menggunakan beberapa standar kalibrasi, atau bahkan penutup buram untuk penerangan nol. Setelah disiapkan, instrumen digunakan untuk mengukur langsung densitas sampel yang ditempatkan di balok.



Gambar 1.14 Densitometer sinar tunggal dengan pembacaan langsung

Stabilitas keluaran cahaya, elektronik apa pun yang digunakan, dan kinerja detektor diperlukan untuk penentuan kerapatan yang akurat. Dalam praktiknya, pemeriksaan instrumen nol mungkin diperlukan untuk menghilangkan penyimpangan. Persyaratan lebih lanjut dari instrumen pembacaan langsung adalah linieritas respons terhadap perubahan pencahayaan.

31.3. Mikrodensitometer

Instrumen ini digunakan untuk memeriksa perubahan densitas di area gambar yang sangat kecil. Rincian mikrostruktur tersebut diukur untuk penilaian granularitas, sharpness dan fungsi transfer modulasi - semua penentu penting kualitas gambar (lihat Bab 19, 20, 24). Untuk mengukur densitas area yang sangat kecil, biasanya menggunakan sistem mikroskop yang khas, menggantikan mata manusia dengan sensor

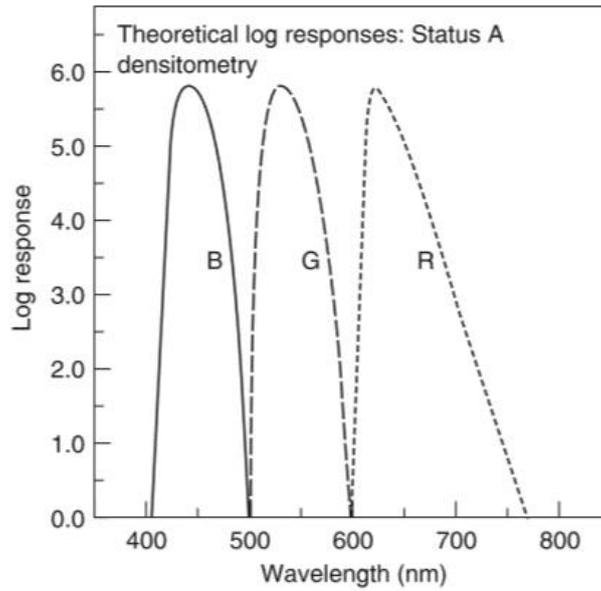
elektronik. Mikrodensitometer adalah instrumen yang sangat presisi, dengan interval pengukuran beberapa mikrometer - output dapat ditampilkan menggunakan monitor komputer pengendali dan parameter yang sesuai dapat langsung ditentukan oleh komputer yang sama

31.4. Densitometer warna

Selain gambar monokrom perak, sering kali perlu dilakukan pengukuran sensitivitas gambar berwarna. Ini umumnya terdiri dari hanya tiga pewarna yang masing-masing menyerap cahaya red, green, dan blue. Oleh karena itu, dimungkinkan untuk menilai gambar berwarna dengan membuat pengukuran kerapatan di tiga wilayah spektrum ini. Oleh karena itu, alat pengukur densitas warna mirip dengan instrumen monokrom tetapi dilengkapi dengan tiga filter warna primer. Filter merah, hijau, dan biru ini digabungkan dengan karakteristik sensor untuk memberikan tiga pita respons terpisah, masing-masing dalam wilayah spektrum red, green, dan blue (Gambar 8.15).

Perilaku gambar berwarna dapat dinilai paling efektif jika pengukuran densitometer hanya dalam pita absorpsi spektral berwarna, sehingga densitometer warna biasanya dilengkapi dengan filter pita sempit. Mengingat ketidaksempurnaan spektral berwarna citra, akan dipahami bahwa pengukuran kerapatan warna tunggal (merah, hijau atau biru) mewakili jumlah kontribusi dari semua pewarna yang ada. Densitas gabungan seperti itu digambarkan sebagai kerapatan integral. Densitas yang diukur bergantung pada pita spektral yang diambil sampelnya, yang pada gilirannya ditentukan oleh bahan yang akan diperiksa.

Negatif warna dirancang untuk pencetakan pada kertas berwarna, dan dinilai menggunakan instrumen yang memiliki respons spektral ISO Status M yang sesuai untuk pencetakan berwarna. Tujuan latihan ini adalah menggunakan densitometer untuk menilai negatif warna dan dengan demikian memprediksi kondisi pencetakan yang diperlukan untuk menghasilkan cetakan berwarna yang baik. Instrumen yang diatur sesuai dengan Standar ISO untuk pengukuran masked negatif dikatakan memberikan densitometri Status M. Gambar yang dirancang untuk dilihat diukur menggunakan densitas ISO Status, yang menilai gambar netral secara akurat seperti yang dilihat oleh pengamat manusia. Densitas kolorimetri, yang akan menilai kerapatan warna dalam hal penglihatan warna manusia, hanya dapat diterapkan di laboratorium penelitian, dan tidak diperlukan untuk pengendalian kualitas bahan negatif atau positif warna.



Gambar 1.15 Pita respons red, green, dan blue untuk Status ISO Sebuah densitometri warna, digunakan untuk pemeriksaan film pembalikan warna dan cetakan positif yang dirancang untuk pengamat manusia.

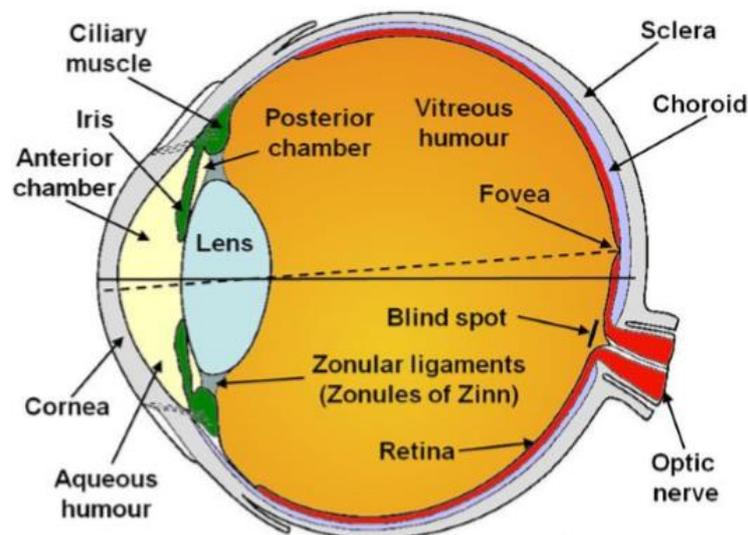
Respon spektral instrumen untuk Status A dan M densitometri sangat ditentukan. Akan tetapi, mungkin tidak perlu untuk menetapkan sistem yang memenuhi spesifikasi seperti itu karena densitas integral yang berubah-ubah seringkali memuaskan untuk tujuan seperti pengendalian kualitas. Seperti halnya densitometer hitam-putih, jenis yang paling umum adalah instrumen sinar tunggal dengan pembacaan langsung.

2. SISTEM VISUAL MANUSIA

32. Pengantar

Penglihatan mungkin indra yang paling luar biasa. Mata manusia disamakan dengan kamera dalam banyak deskripsi dan memang, secara dangkal, ini benar. Seperti dapat dilihat pada Gambar 2.1, ini adalah bola kedap cahaya dengan sistem lensa yang diposisikan untuk memfokuskan cahaya ke lapisan fotosensitif, retina, yang terletak di bagian belakang bola mata. Di luar deskripsi dasar ini, struktur dan pengoperasian sistem visual manusia (HVS) jauh lebih rumit daripada kamera terancang yang ada saat ini. Pada pemeriksaan, dapat dilihat bahwa itu cukup baik dalam kontrol fokus, eksposur, dan white balance, mampu kompresi, adalah sistem pemindaian dan dapat merespon kondisi pencahayaan yang dapat bervariasi hingga enam lipat. Selain itu, dapat memberikan informasi yang kompeten tentang dunia tiga dimensi di sekitar kita.

Secara umum, HVS bekerja dengan sangat andal setiap hari sehingga kompleksitasnya dilupakan, seperti segudang proses yang mengarah pada persepsi kita tentang dunia tentang kita. Pemrosesan canggih yang terjadi di dalam HVS, dan terutama di dalam korteks visual, menuntun kita untuk melihat gambar kira-kira sepersepuluh detik setelah gambar itu muncul. Memahami fungsi dasar mata mengarah pada desain dan pengoperasian sistem pencitraan yang lebih baik, apakah itu mencocokkan pupil keluar dari teropong dengan mata atau merancang sistem kompresi agar tidak menimbulkan kerugian. Sistem visual hewan menunjukkan variasi yang luar biasa dalam kompleksitas, operasi, dan kinerja. Apresiasi keanekaragaman hayati yang luas ini, mulai dari mata majemuk lebah hingga penglihatan terpolarisasi cephalopoda, menginspirasi banyak kemajuan lebih lanjut di berbagai bidang.



Gambar 2.1 Penampang melalui bola mata manusia. Diadaptasi dari McDonald (1987)

33. Struktur fisik mata manusia

Singkatnya, mata adalah bulatan yang rapat, berdiameter kira-kira 24 mm, yang bentuknya sebagian besar dipertahankan oleh sklera, bagian putih mata, dan vitreous humor (Gambar 2.1). Ini memiliki sistem lensa yang diposisikan di depan untuk memfokuskan cahaya ke lapisan fotosensitif, retina, yang melapisi bagian belakang mata, untuk membentuk gambar terbalik. Sistem lensa terdiri dari kornea dan lensa kristal. Ini adalah

fungsi retina untuk mengubah cahaya yang masuk menjadi sinyal listrik yang kemudian melakukan perjalanan ke korteks visual dan struktur lain melalui saraf optik di bagian belakang bola mata. Pemrosesan gambar, maknanya, dan konteks kemunculannya didistribusikan ke berbagai bagian otak dan belum sepenuhnya dipahami. Korteks visual, bagaimanapun, terutama bertanggung jawab untuk persepsi pola dan bentuk yang dikodekan oleh retina. Bagian mata yang berwarna, iris, mengontrol jumlah cahaya yang memasuki sistem visual dengan mengubah ukuran pupil, pusat gelap, dengan cara yang mirip dengan apertur lensa. Ketika dikombinasikan dengan perubahan kimiawi di retina, ini menjelaskan kemampuan mata untuk merespons berbagai kondisi pencahayaan. Detail yang cukup besar dihilangkan dari ikhtisar di atas dan sisa bab ini didedikasikan untuk menjelaskan struktur dan proses sistem visual manusia pada waktu yang lebih lama.

34. Tunik

Mata dapat dianggap terdiri dari tiga tunik, atau lapisan, yang diidentifikasi sebagai serat, vaskular, dan tunik saraf. Ini kira-kira sesuai dengan lapisan luar, tengah dan dalam dari dinding mata. Tunik bulu, atau lapisan luar mata, terdiri dari sklera dan kornea. Sklera, juga dikenal sebagai mantel sklerotik, adalah 'putih' mata, bahan serat keras buram yang terbuat dari kolagen dan jaringan elastis. Melindungi tiga perempat belakang bola mata, biasanya warna 'kuning' seiring bertambahnya usia.

Bagian tengah, tunik vaskular terdiri dari iris, badan siliaris, dan koroid. Kadang-kadang disebut sebagai tunik uveal, fungsi utama lapisan ini adalah menyediakan darah beroksigen yang dibutuhkan mata untuk beroperasi. Ini terutama dilakukan oleh koroid, jaringan pembuluh darah yang terletak di daerah posterior mata di bawah sklera. Tunik vaskular berpigmen dengan warna ungu tua, sering disebut sebagai visual purple, yang menyerap cahaya yang tersebar dengan cara yang mirip dengan lapisan hitam matt yang sering terlihat di dalam kamera. Tunik saraf bagian dalam adalah lapisan sensorik yang mengandung retina dan di mana gambar difokuskan. Fungsi lapisan tersebut adalah untuk mendeteksi cahaya dan menyandikan sinyal untuk transmisi melalui saraf optik ke korteks visual.

35. Kornea

Meskipun bentuknya tetap, kornea menyediakan sekitar tiga perempat daya optik yang diperlukan untuk memfokuskan cahaya ke retina. Ini adalah kubah avaskular yang jelas, berdiameter sekitar 12mm dan tebal hingga 1,2 mm, yang menutupi bagian depan mata, iris, dan lensa. Perkiraan yang masuk akal dari indeks bias kornea adalah di urutan 1,376. Namun, ia tersusun dari banyak lapisan jaringan serat dan, dengan demikian, indeks biasnya bervariasi dengan setiap lapisan, hidrasi dan panjang gelombang cahaya dipertimbangkan. Cahaya yang melewati kornea masuk ke ruang anterior yang terbentuk di antara permukaan posterior dan iris. Itu diisi dengan humor aqueous yang, karena sifat avaskular kornea, menyediakannya dengan nutrisi yang dibutuhkan melalui difusi.

Aqueous humor memiliki indeks bias (lihat Bab 2) sekitar 1,336 dan, dengan demikian, batas air kornea tidak memberikan daya optik yang signifikan. Oleh karena itu, sebagian besar kekuatan optik mata berasal dari antarmuka kornea udara. Inilah salah satu alasan mengapa saat berenang di bawah air tanpa masker atau kacamata, penglihatan manusia menjadi kabur. Indeks bias air kira-kira 1,335 pada panjang gelombang 550nm dibandingkan dengan praktis 1 untuk udara. Pengurangan perbedaan indeks bias pada batas membuatnya hampir tidak mungkin bagi mata rata-rata untuk memfokuskan gambar yang tajam ke retina. Mirip dengan sklera, kornea 'kuning' seiring bertambahnya usia.

36. Konjungtiva

Dimulai dari tepi kornea, konjungtiva adalah selaput yang menutupi bagian luar sklera dan permukaan bagian dalam kelopak mata. Ini berfungsi untuk mencegah debu dan benda lain masuk ke mata dan untuk mengurangi gesekan antara kelopak mata dan bola mata dengan membantu menjaganya tetap lembab. Konjungtivitis, terkadang dikenal sebagai 'mata merah muda', adalah peradangan atau iritasi pada konjungtiva.

37. Iris dan Pupil

Berwarna, berotot, struktur berbentuk disk, iris diposisikan tepat di depan lensa kristal (Gambar 2.2). Ia memiliki lubang di tengah, pupil, dan otot yang berjalan secara radial dan tangensial dalam sebuah cincin di sekitarnya. Saat melihat dalam cermin, itu adalah bagian berwarna dari mata yang kita lihat. Warna iris ditentukan oleh, antara lain, jumlah dan rasio berbagai jenis melanin yang terkandung di dalamnya, baik eumelanin hitam coklat yang lebih gelap atau pheomelanin kuning muda yang lebih terang. Melanin juga ditemukan di kulit dan rambut dan, dengan cara yang sama, rasionya menentukan warna kulit atau rambut kita. Iris dianggap sebagai bagian dari tunik vaskular anterior dan permukaannya belakangnya berpigmen, seperti disebutkan sebelumnya, berwarna ungu tua.



Gambar 2.2 Fotografi eksternal mata manusia

Iris mengontrol jumlah cahaya yang masuk ke mata yang, ketika terbuka penuh, memiliki diameter sekitar 8mm dalam tingkat cahaya rendah dan sekitar 2mm dalam kondisi terang. Ini menciptakan apertur efektif dari $f/11$ hingga $f/2$, tetapi ini hanya menjelaskan sebagian besar kisaran besar kondisi pencahayaan tempat mata dapat beroperasi. Diatur oleh sistem saraf pusat, iris memiliki otot sfingter setebal 1mm di dekat pupil, yang menyempitkannya dalam kondisi cerah. Saat tingkat cahaya turun, otot radial bertindak untuk melebarkan iris. Menguji reaksi iris terhadap cahaya dan kemerataannya di kedua mata sering digunakan sebagai tes dasar untuk fungsi otak.

Iris adalah titik pemisah ruang anterior dan posterior yang terletak di depan mata. Ruang posterior terbentuk di antara permukaan belakang iris dan permukaan anterior lensa kristal. Itu juga diisi dengan aqueous humor, yang membantu memelihara lensa kristal.

Tekstur dan pola yang ditunjukkan oleh iris mata diyakini unik dan telah dimanfaatkan dalam beberapa tahun terakhir untuk digunakan dalam sistem keamanan. Meskipun deskripsi lengkap tidak sesuai di sini, sebagian besar sistem mengandalkan analisis pola frekuensi berbasis wavelet dan hal ini dibahas lebih detail.

38. Lensa kristal

Dikenal sebagai akomodasi, pemfokusan halus yang diperlukan untuk menghasilkan gambar yang tajam dilakukan oleh lensa kristal. Dibangun terutama dari protein, ia banyak berlapis dan memiliki indeks bias yang bervariasi, dari sekitar 1,40 di tengah hingga 1,38 di lapisan luar. Sifatnya fleksibel, diameter lensa kira-kira 9mm pada orang dewasa dan tebal hingga 5 mm. Lensa tersuspensi dalam kantong korpuskularnya sendiri oleh serat zonular di belakang iris dan dipasang ke badan siliaris.

Lensa berbentuk bikonveks dengan perkiraan radius kelengkungan 9 dan -6mm untuk permukaan anterior dan posterior masing-masing saat rileks. Oleh karena itu, lensa memberikan sejumlah daya optik bahkan saat melihat objek yang jauh, tetapi terutama membantu pemfokusan objek yang lebih dekat dari sekitar 20 kaki. Panjang fokus efektif dari sistem lensa kornea-mata gabungan adalah sekitar 16mm yang, mengingat diameter keseluruhan bola mata pada 24 mm, beberapa orang mungkin akan terkejut. Namun, cairan encer dan vitreous, secara efektif memperpanjang jalur optik antara sistem lensa dan bidang fokus dengan mengurangi pembiasan pada batas lensa internal mata. Kekuatan optik lensa menyumbang sekitar seperempat dari total kekuatan mata. Pemfokusan, atau akomodasi seperti yang diketahui, akan dibahas lebih rinci nanti dalam bab ini.

39. Tubuh siliaris

Badan siliaris adalah jaringan berbentuk donat yang terletak di tepi luar iris dan tempat lensa kristal dipasang melalui ligamen zonular. Agak mirip dengan iris, badan siliaris berisi otot radial dan tangensial yang bertanggung jawab untuk menyesuaikan bentuk lensa. Badan siliaris juga diperkirakan menghasilkan aqueous humor, yang berdifusi melalui serat zonular ke dalam ruang posterior mata, melalui pupil dan ke dalam ruang anterior.

40. Rongga vitreous dan humour vitreous

Rongga vitreous adalah ruang utama di belakang lensa kristal dan di depan retina. Itu diisi dengan humor vitreous, cairan yang konsistensinya hampir sama dengan putih telur, dan membantu mempertahankan bentuk tubuh utama bola mata. Vitreous humor didominasi air dengan sejumlah kecil protein, yang memberikan sifat kental dan memiliki indeks bias sekitar 1,337. Itu melekat pada bagian retina, meskipun penuaan umumnya menyebabkannya mencair, memungkinkannya untuk bergerak. Pencairan vitreous humor dan diskontinuitas lebih lanjut di dalamnya secara umum dapat dilihat sebagai floaters, bintik-bintik kecil atau garis yang bergerak di sekitar bidang visual saat posisi pandangan diubah. Ini paling mudah dilihat pada latar belakang seragam difus cahaya. Gangguan yang lebih serius pada vitreous humor dapat menyebabkan ketegangan pada retina dan sensasi kilatan cahaya. Jika ini terjadi, atau jumlah floater terlihat berkerut, penting untuk mencari perhatian medis profesional sesegera mungkin untuk menghindari kerusakan lebih lanjut pada retina. Umumnya, sel peka cahaya di retina tidak menimbulkan nyeri sebagai respons terhadap rangsangan. Jadi, lampu yang berkedip mungkin satu-satunya indikasi adanya masalah.

41. Retina dan koroid



Gambar 2.3 Demonstrasi untuk menemukan titik buta. Dengan menutupi mata kanan dan melihat gambar anjing dari jarak sekitar 20 cm, pemiliknya akan menghilang. Atau, dengan menutupi mata kiri dan melihat pemiliknya, anjing itu akan menghilang. Anda mungkin harus menyesuaikan jarak Anda ke halaman.

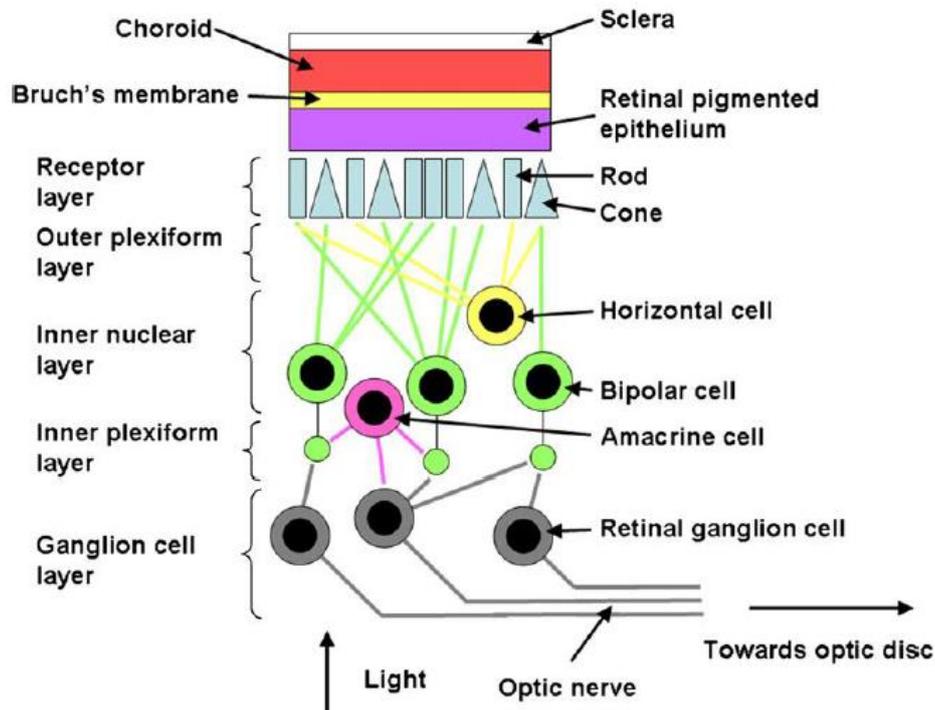
Permukaan dalam mata yang dimulai di belakang tubuh siliaris dilapisi dengan retina. Retina adalah lapisan, dengan ketebalan sekitar 0,5 mm, sel fotosensitif dan sel saraf yang bertugas untuk menyandikan cahaya yang masuk menjadi sinyal listrik untuk otak. Melapisi sekitar dua pertiga bagian dalam mata, retina terletak di atas koroid. Seperti disebutkan sebelumnya, koroid dianggap sebagai bagian dari tunik vaskular posterior dan terutama menyediakan suplai darah ke retina. Tepat di atas koroid terletak membran Bruch, yang memisahkan retina dari jaringan vaskular. Di antara membran Bruch dan sel fotosensitif retina terletak epitel berpigmen retina. Lapisan ini membantu menukar produk limbah dan nutrisi antara koroid dan sel fotosensitif retina dan selanjutnya menyerap cahaya yang menyimpang. Permukaan posterior koroid dikenal sebagai tapetum dan mungkin tampak berwarna-warni. Struktur rinci retina akan dibahas nanti dalam bab ini.

42. Saraf optik

Sinyal yang dihasilkan oleh sel di retina bergerak menuju titik berwarna terang di retina, yang dikenal sebagai disk optik. Ini adalah titik di mana saraf optik terhubung dan terletak sekitar 10° dari sumbu optik di sisi hidung. Ini juga dikenal sebagai titik buta karena kurangnya fotoreseptor pada saat ini. Kira-kira 1 juta serat saraf memulai perjalanannya dari retina ke korteks visual di sini, meskipun jalur dari retina tidak langsung, seperti yang akan diperiksa nanti. Saraf optik juga membawa arteri dan vena retina, mengangkut darah ke arah dan menjauh dari mata.

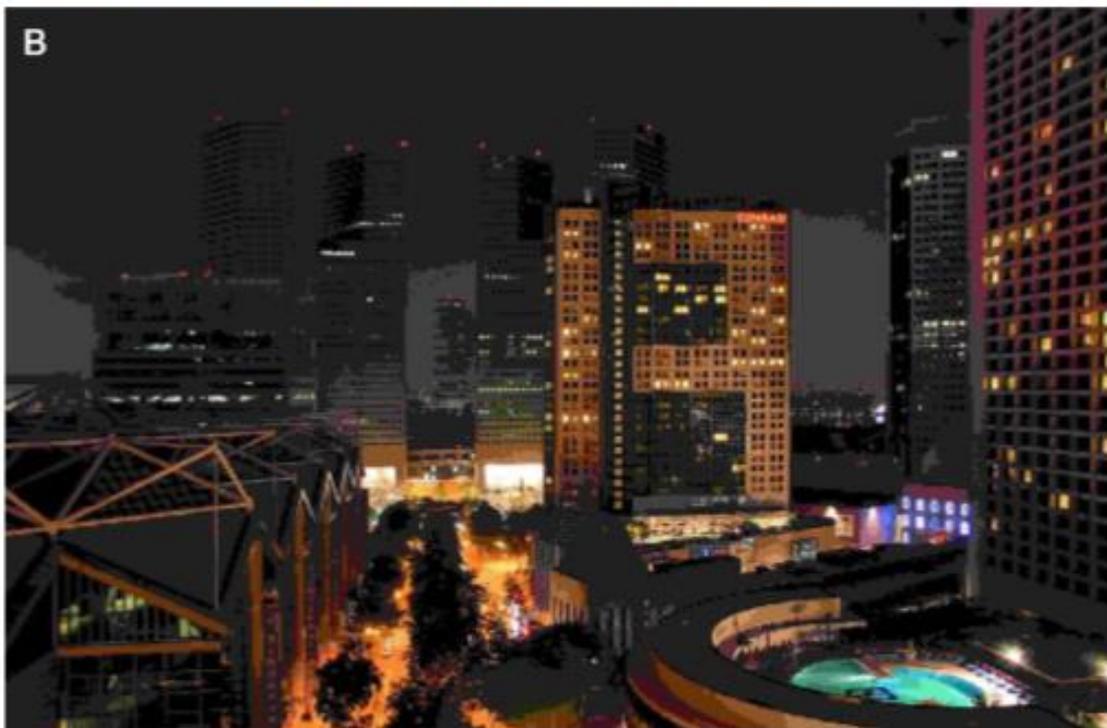
Demonstrasi bahwa titik buta tidak sensitif terhadap cahaya dapat segera dicapai. Dengan menutupi mata kanan dan melihat gambar anjing pada Gambar 2.3 dari jarak sekitar 20 cm, pemiliknya akan menghilang. Atau, dengan menutupi mata kiri dan melihat pemiliknya, anjing itu akan menghilang. Anda mungkin harus menyesuaikan jarak Anda ke halaman.

43. Struktur retina



Gambar 2.4 Skema lapisan retina

Retina adalah struktur berlapis peka cahaya yang melapisi bagian dalam mata dan dianggap sebagai bagian dari saraf, atau bagian dalam, tunik. Ini dimulai di, dan berlanjut dengan, saraf optik dan berakhir tepat di belakang badan siliaris di ora serrata, dinamai demikian karena penampilannya sebagai margin yang tidak teratur. Lapisan tipis, tanpa pencitraan, berlanjut melewati titik ini untuk menutupi bagian belakang badan siliaris dan iris. Retina dianggap sebagai bagian dari sistem saraf pusat karena berasal dari bahan yang sama dengan otak dalam perkembangan embrio. Lima lapisan utama dapat diidentifikasi di retina manusia: reseptor, plexiform luar, inti dalam, plexiform dalam, dan lapisan sel ganglion. Penjelasan yang lebih rinci, bagaimanapun, seringkali membagi retina menjadi 10 lapisan, atau bahkan lebih. Gambar 4.4 menyajikan skema lapisan retinal dasar. Hal pertama yang menarik untuk diperhatikan adalah bahwa lapisan reseptor peka cahaya paling dekat dengan koroid. Cahaya harus melintasi lapisan yang tersisa sebelum terdeteksi oleh dua jenis sel yang ada di lapisan sensitif, batang dan kerucut. Batang dan kerucut mengubah cahaya yang masuk menjadi sinyal listrik yang kemudian melintasi lapisan sampai ditransmisikan oleh akson sel ganglion yang membentuk saraf optik. Ada sekitar 125 juta fotoreseptor di retina; Namun, hanya ada sekitar 1 juta sel ganglion. Ini dapat diartikan sebagai mewakili kompresi gambar dalam urutan 125: 1. Signifikansi tingkat kompresi ini dapat diilustrasikan dengan membandingkan gambar yang telah dikompresi ke tingkat 96: 1 dengan aslinya menggunakan format Joint Photographic Experts Group (JPEG) yang umum tersedia (Gambar 2.5). Meskipun dapat dikatakan bahwa pada saat penulisan ada sistem kompresi yang berkinerja lebih baik yang tersedia, JPEG sejauh ini adalah yang paling umum. Perlu juga diperhatikan hal itu



Gambar 2.5 (A) Gambar pusat Singapura pada malam hari. (B) Gambar yang sama dikompresi menjadi 96:1 menggunakan kompresi JPEG.

rasio kompresi yang lebih tinggi juga dapat dengan mudah dicapai dengan memanfaatkan korelasi temporal. Korelasi temporal dapat dianggap sebagai kesamaan antara dua atau lebih gambar yang berurutan. Bayangkan seorang pembaca berita di studio; hanya newsreadermovesandthebackgroundstayssthesame. Oleh karena itu, area background menunjukkan korelasi temporal dan informasi ini tidak perlu dikirim lagi.

Interaksi lapisan di retina sangat kompleks dan mekanisme penglihatan yang terperinci, yang melibatkan pengorganisasian reseptor dan cara sinyal dihasilkan, diatur, diproses, dan ditransmisikan ke korteks visual, berada di luar cakupan ini. Book. Namun, mereka menimbulkan sejumlah fenomena visual yang telah dipelajari secara ekstensif dan memiliki konsekuensi dalam pemahaman dan evaluasi sistem pencitraan kita. Selain itu, ada sejumlah efek psikovisual yang kuat akibat interpretasi dan pemrosesan gambar di korteks visual dan area lain di otak. Selain itu, pengasuhan juga telah terbukti memengaruhi cara gambar dipahami. Sejumlah efek umum diberikan di halaman-halaman berikut dan penjelasan lebih rinci diberikan pada penglihatan warna. Untuk penjelasan yang lebih mendalam, pembaca diundang untuk melihat beberapa karya yang tercantum dalam Bibliografi.

44. Rod dan Cones (Batang dan kerucut)

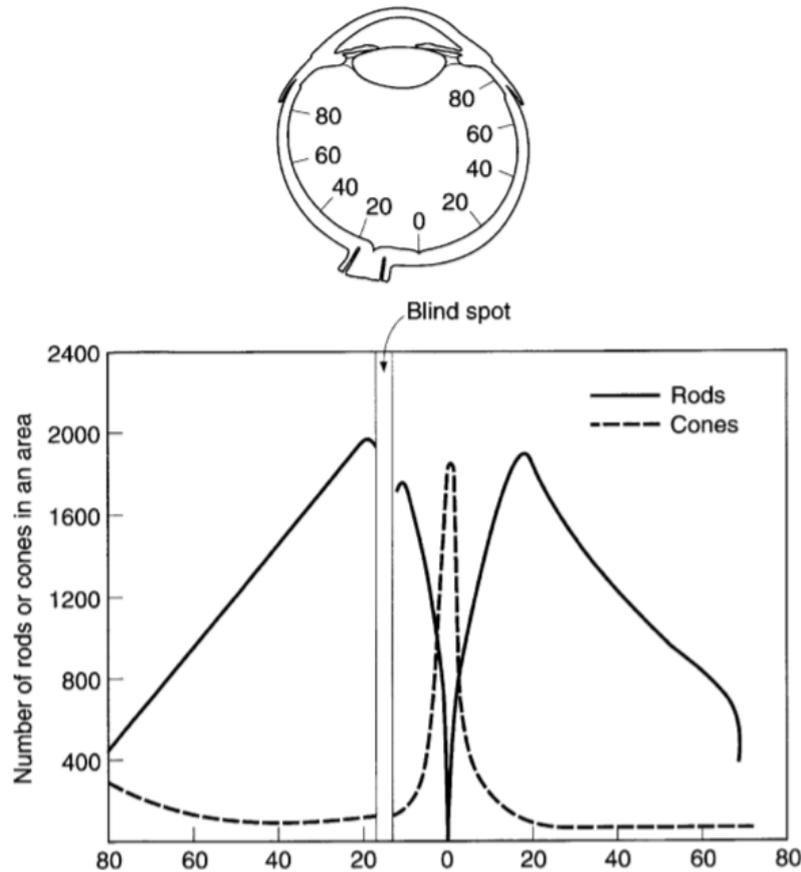
Lapisan utama sel peka cahaya juga dikenal sebagai membran Yakub. Dinamakan karena bentuknya, batang dan kerucut fotosensitif tidak terdistribusi secara seragam ke seluruh retina dan melakukan fungsi yang sinergis, tetapi berbeda. Batang sangat sensitif dan memberikan penglihatan monokromatik pada tingkat cahaya rendah: *penglihatan scotopic*. Kurang sensitif oleh faktor dari ratusan, tiga variasi kerucut memberikan penglihatan warna dalam tingkat cahaya yang lebih banyak: *penglihatan fotopik*. *Penglihatan mesopik* terjadi ketika tingkat cahaya sedemikian rupa sehingga batang dan kerucut digunakan. Penglihatan skotopik ada karena kerucut tidak dapat beroperasi pada tingkat cahaya rendah dan umumnya dianggap berfungsi dalam kisaran iluminasi sekitar 10^{-6} hingga 10^{-2} cdm^{-2} . Gambar bawah adalah ambang di mana batang beroperasi dan angka atas tempat kerucut mulai beroperasi. Karena penglihatan skotopik bergantung terutama pada batang, ia menampilkan sharpness yang buruk. Penglihatan mesopik bergantung pada penglihatan batang dan kerucut dari sekitar 0.034 hingga 3.4 cdm^{-2} , atau cahaya bulan hingga senja. Karena kerucut tidak beroperasi secara optimal, ia memberikan diskriminasi warna yang buruk meskipun sharpness sedikit lebih baik daripada penglihatan scotopic. Untuk tingkat iluminasi di atas sekitar 3.4 cdm^{-2} , fungsi kerucut secara optimal dan penglihatan warna dan sharpness terbaik ditampilkan.

Gambar 4.6 menunjukkan distribusi batang dan kerucut di seluruh retina. Dapat dilihat bahwa terdapat densitas kerucut yang sangat tinggi pada suatu titik di retina, yang dinamai fovea, dan relatif sedikit tersebar di seluruh area yang tersisa. Sebaliknya, dapat dilihat bahwa batang sangat jarang di fovea, berjumlah lebih tinggi di tempat lain di retina dan kemudian menyusut jumlahnya ke arah pinggiran penglihatan. Di titik buta tidak ada batang atau kerucut.

Fovea adalah titik pada sumbu optik mata yang berdiameter sekitar 0,5-1mm (sekitar 2° bidang visual) yang dikemas lebih dari 50.000 kerucut dalam pola heksagonal. Itu muncul sebagai kemiringan kecil dalam lingkaran kuning yang dikenal sebagai makula. Batang dan kerucut memiliki ukuran dalam kisaran mikron, meskipun kerucut sedikit lebih tipis di daerah ini dan umumnya memiliki korespondensi dekat satu-ke-satu dengan serat saraf optik di tengah fovea. Oleh karena itu, fovea memberikan penglihatan warna sharpness tinggi dalam pencahayaan yang baik: *fotopicvision*. Pigmen kuning pada makula dikenal sebagai makula lutea dan dianggap dapat mengurangi penyimpangan kromatik mata dengan penyerapan cahaya biru. Sharpness turun drastis ke arah pinggiran penglihatan dan, sebagai konsekuensinya, cahaya harus jatuh di 15° pusat atau lebih untuk memberikan penglihatan yang berkualitas. Efek langsung dari hal ini adalah sistem visual manusia memindai untuk membangun gambaran lingkungannya dengan terus-menerus mengubah

posisi pandangannya. Gerakan-gerakan ini dikenal sebagai saccades dan akan dibahas lebih rinci nanti di bab ini.

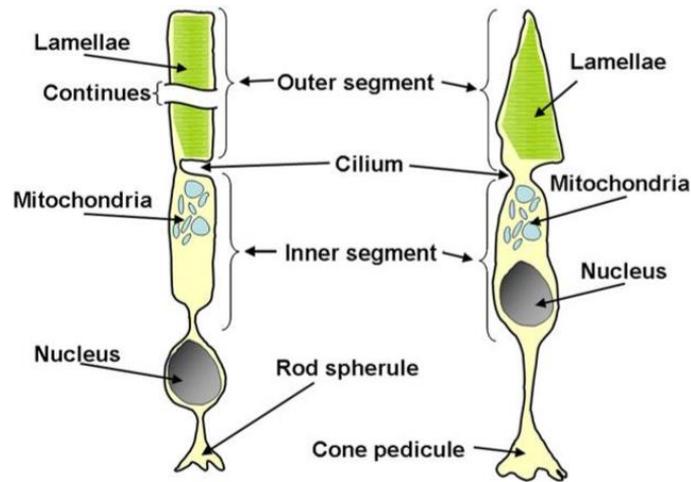
Meskipun batang melebihi jumlah kerucut sekitar 20 banding 1, sekitar 120 juta dibandingkan dengan 6 juta, mereka memberikan penglihatan sharpness yang lebih rendah di sisa bidang visual. Resolusi spasial semakin dikorbankan ke arah pinggir penglihatan karena meningkatnya jumlah batang yang ‘dihubungkan’ untuk meningkatkan sensitivitas dan persepsi gerakan atau resolusi temporal. Memicu pergantian kepala ke arah stimulus, deteksi gerakan di pinggir bidang visual dianggap penting untuk mempersiapkan tubuh untuk respons ‘terbang atau pertarungan’ dari calon predator.



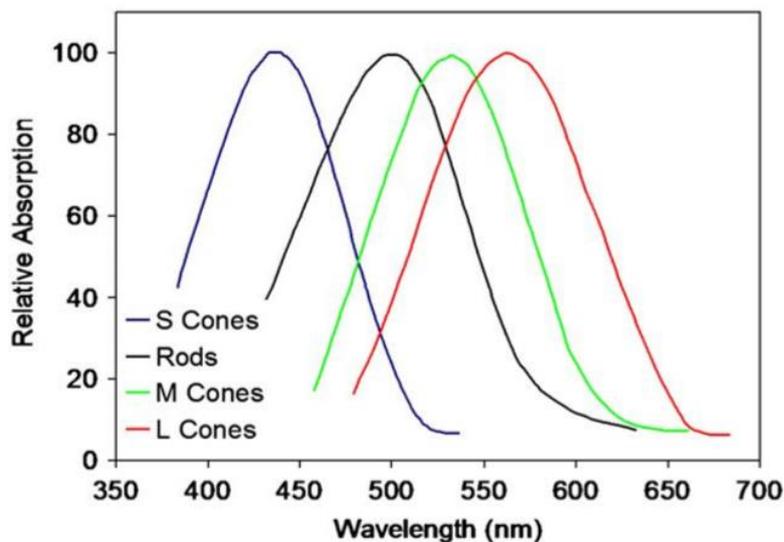
Gambar 2.6 Distribusi batang dan kerucut.

Struktur dasar batang dan kerucut ditunjukkan pada Gambar 2.7. Batang, seperti namanya, kira-kira berbentuk silinder. Bagian luar sel batang yang peka cahaya mengandung ratusan disk, lamellae, yang mengandung pigmen ungu peka cahaya rhodopsin, juga dikenal sebagai ungu visual. Saat terkena cahaya, rhodopsin akan memutih atau rusak, menghasilkan potensi listrik dan produk sampingan kimiawi. Potensi listrik adalah blok bangunan dasar dari sinyal yang pada akhirnya diproses dan dikirim ke otak. Batang ratusan kali lebih sensitif terhadap cahaya daripada kerucut, dan ini semakin diperkuat dengan penggabungannya dalam kelompok yang semakin besar, atau bidang reseptif, menuju pinggir bidang pandang. Oleh karena itu, untuk mengekspresikannya dalam istilah modern, tidaklah berguna untuk memikirkan batang atau kerucut sebagai satu ‘piksel’ dalam sebuah gambar. Sebaliknya, seperti yang akan kita lihat nanti, bidang penerima di mana sejumlah batang atau kerucut berkontribusi harus dianggap sebagai elemen gambar dasar - piksel yang lebih besar dan lebih sensitif di tepi bidang pandang dan lebih kecil, resolusi lebih tinggi, tetapi piksel kurang sensitif di tengah. Kepekaan yang

meningkat dari batang-batang di pinggiran bidang penglihatan penting bagi para astronom. Kurangnya batang di fovea menyebabkan penglihatan malam yang sangat buruk pada sumbu optik, sehingga melihat langsung ke suatu objek sering kali dapat menyebabkannya 'menghilang'. Dengan melihat ke luar sumbu dan menggunakan bagian retina yang lebih peka cahaya, dimungkinkan untuk mendeteksi objek yang berkali-kali lebih redup.



Gambar 2.7 Struktur batang dan kerucut



Gambar 2.8 Sensitivitas spektral batang dan kerucut. Diadaptasi dari Dowling (1987)

Sensitivitas spektral batang dapat dilihat pada Gambar 2.8. Sensitivitas spektral suatu sistem dapat dianggap sebagai seberapa sensitif detektor terhadap setiap panjang gelombang cahaya yang dipertimbangkan. Jika, misalnya, sensitivitas sistem terhadap lampu hijau (550 nm) adalah 1 dan cahaya biru (450 nm) adalah 0,5, diperlukan waktu dua kali lebih banyak cahaya biru untuk menghasilkan respons yang sama dengan hijau, seperti sistem hanya setengah sensitif. Jika sensitivitas spektral suatu sistem adalah nol, sistem tidak dapat mendeteksi panjang gelombang cahaya tersebut. Istilah terkait, responsivitas spektral, adalah keluaran listrik dari sebuah detektor dibandingkan dengan cahaya yang jatuh di atasnya sehubungan dengan panjang gelombang. Sementara sensitivitas spektral sering dinyatakan sebagai fraksi relatif dan mungkin tak bersatuan, responsivitas spektral adalah nilai absolut dengan satuan seperti $VJ^{-1} cm^{-2}$.

Masuk akal untuk mengharapkan bahwa karena kepekaan batang yang lebih tinggi, mereka akan memiliki kurva sensitivitas spektrum yang lebih luas daripada sel kerucut individu mana pun. Ini, bagaimanapun, terlihat tidak menjadi kasus dan kurva untuk batang serupa lebarnya dengan salah satu kerucut dengan respon puncak sekitar 500 nm. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan sensitivitas dicapai dengan beberapa cara selain integrasi spektral cahaya yang sederhana. Batang terhubung ke sejumlah sel horizontal dan bipolar yang terkandung di dalam lapisan plexiform luar retina.

Meskipun hanya ada satu jenis batang, ada tiga jenis kerucut yang telah diidentifikasi di retina manusia, yang distribusinya mendominasi fovea. Pada spesies lain, jumlah ini dapat bervariasi dan proporsi batang terhadap kerucut, serta jenisnya, dapat mencerminkan perilaku dan habitat khas hewan. Kerucut yang sering dilambangkan dengan panjang gelombang pendek (S), sedang (M) dan panjang (L), sama sekali tidak ditemukan dalam jumlah yang sama. Sementara S-cone 'biru' sensitif memiliki sensitivitas tertinggi, mereka umumnya tidak ditemukan di fovea pusat dan hanya berjumlah 1-2% dari total cone. Kerucut-L 'merah-sensitif dapat melebihi jumlah kerucut-M 'hijau 'sebanyak 2: 1, masing-masing menghasilkan sekitar 64% dan 32%. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.8, red, green, dan blue adalah istilah yang harus digunakan dengan hati-hati karena kepekaan spektrum kerucut tidak sempit dan ideal. Sebaliknya, mereka memiliki kurva berbasis lebar yang sangat tumpang tindih dan oleh karena itu 'kehijauan-kebiruan' mungkin merupakan nama yang lebih tepat untuk M-cone, misalnya. Sensitivitas puncak kerucut S, M dan L dapat dilihat masing-masing sekitar 420, 534 dan 564 nm. Sensitivitas puncak terpadu dari kerucut mendekati 555 nm, yang berhubungan erat dengan keluaran puncak matahari.

Pada Gambar 2.7 terlihat bahwa struktur kerucut mirip dengan batang, dengan lamella terdapat di ruas luar. Alih-alih menjadi disk seperti pada batang, lamellae dibentuk sebagai lembaran yang terus dilipat. Lamellae menggunakan tiga varian iodopsin - cyanolabe, chlorolabe dan erythrolabe - dalam kerucut S, M dan L sebagai bahan kimia fotosensitif dan mirip dengan rhodopsin yang ditemukan di batang. Vitamin A penting dalam sintesis dan regenerasi fotopsin di batang dan kerucut, dan kekurangan vitamin dapat menyebabkan penglihatan yang rusak. Meskipun kerucut memiliki sensitivitas absolut yang lebih rendah terhadap cahaya daripada batangnya, waktu responsnya lebih cepat, dan beberapa penelitian menunjukkan bahwa di bawah stimulus yang sama, sinyal dari kerucut dapat tiba hingga sepersepuluh detik lebih cepat daripada sinyal dari tongkat. Pada tingkat yang paling dasar, pendeteksian perbedaan rasio sinyal dari tiga kerucut yang mengarah ke sensasi warna. Sedangkan untuk batang, kerucut juga terhubung ke sel horizontal dan bipolar di lapisan plexiform luar. Untuk kerucut, bagaimanapun, terutama di daerah foveal, satu fotoreseptor sering terhubung ke satu sel saraf, yang mengarah ke sharpness yang lebih baik.

Untuk mengulangi, adalah salah untuk menganggap batang dan kerucut sebagai satu elemen dalam gambar. Ada interkoneksi kompleks antara sel-sel yang dibentuk oleh lapisan lain di retina yang memodifikasi dan meningkatkan respons fundamental terhadap cahaya. Penjelasan dasar tentang sisa lapisan ini dan sel-selnya diberikan di sini dan pembaca didorong untuk juga memeriksa karya beberapa penulis terkenal yang terdaftar dalam Bibliografi.

45. Lapisan sel 'non-Pencitraan

Sinapsis dari fotoreseptor, sel bipolar dan koneksi dari sel horizontal terkandung di dalam lapisan plexiform luar, sedangkan lapisan inti dalam berisi badan sel sel horizontal,

bipolar dan sel amacrine. Sel horizontal berukuran besar, menghubungkan fotoreseptor dan sel bipolar yang mungkin berjauhan. Sambungan lateral di retina dapat menyebabkan penyebaran sinyal yang dihasilkan oleh fotoreseptor hingga 1 mm. Namun, sel-sel horizontal saja tidak memperhitungkan jumlah ini dan dianggap mungkin memberi informasi kembali ke fotoreseptor itu sendiri.

Sel bipolar menerima sinyal dari batang dan kerucut, dalam beberapa kasus seperti di atas melalui sel horizontal, dan pada gilirannya mereka terhubung ke sel ganglion. Mereka mungkin menerima sinyal dari beberapa batang, meskipun kerucut lebih sering dihubungkan ke satu sel. Sel-sel ini dan masukannya diatur agar memiliki bidang reseptif 'on' dan 'off center'. yang akan dibahas nanti secara lebih rinci. Semua sinyal fotoreseptor yang akhirnya ditransmisikan ke sel ganglion dimediasi oleh sel bipolar terlepas dari jalur yang diambil. Bidang reseptif dari sel bipolar dihasilkan oleh koneksi ke sekelompok fotoreseptor. Diperkirakan bahwa lingkungan sekitarnya dibangun melalui koneksi dengan sel horizontal.

Lapisan plexiform bagian dalam berisi hubungan antara sel bipolar, amacrine dan ganglion. Sel amacrine menghubungkan sel bipolar dan sel ganglion; namun, mereka tidak terhubung dengan fotoreseptor secara langsung dan membawa informasi secara lateral melintasi lapisan plexiform bagian dalam. Diperkirakan ada banyak lusinan jenis yang berbeda, yang menghubungkan sinyal dari berbagai area retina. Karena itu, sel amacrine dianggap bertanggung jawab atas beberapa pemrosesan yang lebih kompleks yang terjadi di retina, seperti deteksi gerakan primitif. Fungsi sel yang tepat adalah topik penelitian terkini di lapangan.

Lapisan sel ganglion berisi tubuh sel ganglion dan beberapa sel amacrine. Sel ganglion retina membentuk lapisan terluar. Akson mereka meluas melintasi permukaan retina dan berkumpul di disk optik untuk membentuk saraf optik, yang menyumbang sekitar sepertiga dari semua saraf yang memasuki otak.

46. Bidang reseptif

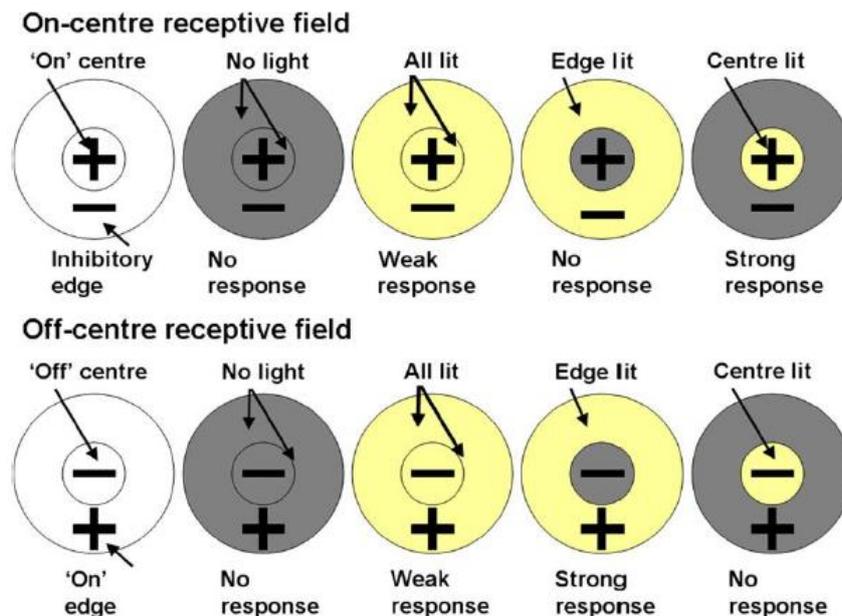
Sinyal yang diterima oleh sel ganglion retina mengalami penyebaran dan pemrosesan horizontal oleh masing-masing lapisan perantara retina. Oleh karena itu, mungkin dipengaruhi oleh sejumlah fotoreseptor di daerah sekitarnya pada permukaan retina, yang disebut bidang reseptif. Bidang reseptif sel ganglion retina umumnya bertambah besar ke arah pinggiran penglihatan, tumpang tindih dan memiliki interaksi yang kompleks. Perilaku terperinci berada di luar cakupan buku ini dan deskripsi pengantar topik diberikan di sini.

On-center dan off-center membentuk dua tipe dasar bidang reseptif (Gambar 2.9). Dalam kondisi pencahayaan yang menyebar, sel ganglion akan mempertahankan kecepatan dering yang stabil di mana saja hingga 20 denyut per detik. Frekuensi pulsa meningkat untuk bidang reseptif di tengah saat cahaya menerpa bagian tengah dan menurun saat cahaya mencapai bagian sekeliling. Oleh karena itu, respons maksimum untuk sel tidak tercapai saat bidang penerima diterangi dengan kuat dan merata, melainkan saat bagian tengah diterangi dan sekelilingnya gelap. Untuk bidang yang tidak berada di tengah, kebalikannya adalah benar, respons maksimum dicapai saat sekeliling diterangi dan bagian tengah gelap. Oleh karena itu, perbedaan antara sinyal dari pusat dan sekeliling lebih penting daripada tingkat absolut itu sendiri. Mekanisme di dalam retina ini sangat penting karena, dalam batas yang wajar, mekanisme ini menyatakan bahwa mata lebih siap merespons perubahan kontras daripada terhadap tingkat penerangan absolut (lihat nanti). Hal ini pada gilirannya membantu kemampuannya untuk mengatasi berbagai kondisi

pencahayaan. Merencanakan rangsangan ideal untuk bidang on dan off-center (Gambar 2.9), mereka mungkin terlihat sangat mirip dengan filter konvolusi Laplacian (dan sejumlah lainnya) yang dirancang untuk mendeteksi tepi dalam gambar digital. Tepi dapat dianggap sebagai perubahan kontras dan kesamaan dapat diidentifikasi antara kedua kasus. Deteksi tepi dibahas lebih lanjut di bab selanjutnya.

Bidang reseptif dari sel ganglion retinal mungkin sebesar 1 mm. Namun, perubahan ini sangat mencolok di permukaan retina dan secara signifikan di fovea. Seperti yang ditunjukkan sebelumnya, fotoreseptor dapat memberi makan masukan dari sejumlah sel bipolar dan horizontal, yang pada gilirannya dapat memberi makan sejumlah sel amacrine dan, akhirnya, sel ganglion. Dalam fovea lebih mungkin bahwa satu kerucut akan merangsang sel bipolar tunggal, yang pada gilirannya akan merangsang sel ganglion tunggal. Di tepi bidang pandang, lebih banyak fotoreseptor yang terhubung ke setiap sel bipolar dan akibatnya merangsang sel ganglion dalam jumlah yang lebih besar. Karena tumpang tindih bidang reseptif, ada kemungkinan bahwa fotoreseptor tunggal dapat merangsang sejumlah sel ganglion dan berkontribusi pada bidang on dan off-center, bahkan menciptakan respons penghambatan dan stimulasi secara bersamaan.

Ukuran bidang reseptif menentukan kisaran frekuensi spasial yang diminati. Bidang reseptif kecil berhubungan dengan frekuensi spasial tinggi dan bidang reseptif besar untuk frekuensi spasial yang lebih rendah. Bidang reseptif juga ada yang merespons lebih kuat untuk memilih jarak dalam penglihatan binokular. Sejumlah sel ganglion retina yang berbeda telah diidentifikasi dengan bentuk dan ukuran yang sangat berbeda, dan mungkin terlihat berhubungan dengan jumlah fotoreseptor yang berbeda, serta memiliki kecepatan respons dan fungsi yang berbeda. Beberapa sel membantu untuk mengontrol saccades atau ukuran pupil dan yang lainnya menunjukkan preferensi warna. Sel ganglion fotosensitif raksasa yang langka, yang jumlahnya hanya beberapa ribu, juga baru-baru ini diidentifikasi. Ini dianggap membantu pengaturan ritme sirkadian di dalam tubuh.



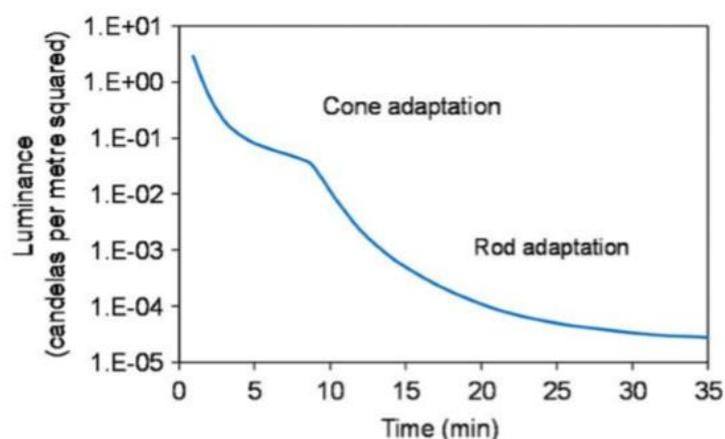
Gambar 2.9 Bidang reseptif di dalam dan di luar pusat.

Bidang reseptif on-dan-off-center didistribusikan secara merata ke seluruh bidang pandang.

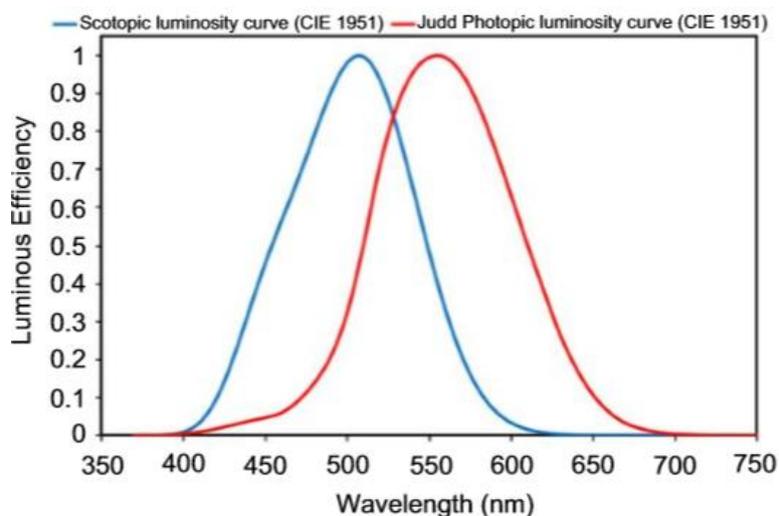
47. Adaptasi gelap

Mata diharapkan dapat mengatasi berbagai kondisi iluminasi yang luar biasa, hingga 12 kali lipat, dari sekitar 10^{-2} hingga 10^{-6} cdm^{-2} , namun retina memiliki kisaran kontras seketika sekitar 100: 1. Kontras dapat dianggap sebagai perbedaan atau rasio kecerahan dua objek. Oleh karena itu, di atas, objek paling terang yang dapat dilihat adalah 100 kali lipat dari yang paling gelap. Mata jauh lebih bergantung pada perubahan kontras daripada pada tingkat iluminasi absolut, seperti yang terlihat di atas, dan ini sangat membantu persepsi kita tentang dunia. Bayangkan berada di luar pada hari yang cerah. Pencahayaan rata-rata mungkin 10.000 lux, namun di bawah naungan pohon 100 lux, namun kami dapat melihat dengan baik dalam kedua kasus tersebut. Di dalam ruangan kita mungkin melihat gambar televisi, sekitar 100 lux, atau di bawah meja, mungkin 1 lux, dan kita masih bisa melihat dengan jelas. Dalam kedua kasus, rasio dari hal yang paling gelap ke yang paling terang adalah 100 dan mata yang telah menggeser skala dan menyesuaikan dengan kecerahan keseluruhan. Jika mata tidak beradaptasi dengan contoh di atas dan hanya bergantung pada tingkat cahaya absolut, saat kami tiba di dalam ruangan kami tidak akan dapat melihat, karena tidak ada yang seterang objek tergelap kami di luar.

Perubahan ukuran iris menyebabkan beberapa adaptasi cepat dan sementara. Akan tetapi, penyesuaian kimiawi, terutama konsentrasi fotopsin yang tidak diputihkan, yang menghasilkan kisaran penuh di mana mata dapat beroperasi. Ketika seseorang berpindah dari lingkungan yang terang benderang ke ruangan gelap atau ruangan yang remang-remang, lingkungan itu segera tampak gelap. Setelah 30 menit mata menyesuaikan dengan kondisi. Adaptasi kimiawi mata didokumentasikan dengan baik dan plot tingkat luminansi terhadap waktu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10, menunjukkan bentuk kurva yang terdistorsi. Peningkatan awal dalam kepekaan disebabkan oleh kerucut yang beradaptasi hingga titik di mana mereka tidak dapat menyesuaikan lebih jauh, menyebabkan penurunan gradien kurva adaptasi. Setelah titik ini peningkatan kepekaan hanya karena batang. Ada pengaruh lebih lanjut pada proses ini melalui efek saraf. Sebagian besar adaptasi gelap terjadi dalam 30 menit pertama, meskipun sedikit peningkatan di luar ini dapat dideteksi selama lebih dari satu jam. Kesehatan yang buruk juga dapat memengaruhi kemampuan mata untuk beradaptasi. Adaptasi cahaya adalah proses kebalikan dengan mekanisme yang sama, tetapi umumnya dicapai dalam waktu kurang lebih 5 menit.



Gambar 2.10 Adaptasi gelap batang dan kerucut



Gambar 2.11 Efisiensi bercahaya photopic dan scotopic dari mata manusia. Pergeseran Purkinje dilihat sebagai pergeseran panjang gelombang sensitivitas puncak.

Sensitivitas puncak kerucut yang terintegrasi mendekati 555 nm, yang sesuai dengan keluaran puncak matahari, sedangkan batang adalah 500nm (Gambar 4.8). Perbedaan ini menyebabkan pergeseran ke arah ujung biru spektrum saat menggunakan penglihatan scotopic, pergeseran Purkinje, dan penurunan terkait dalam sensitivitas merah (Gambar 4.11). Hal ini dapat menyebabkan kecerahan warna dengan konten merah tinggi tampak lebih gelap daripada yang diharapkan saat menggunakan penglihatan malam. Efek ini tidak boleh disamakan dengan metamerisme, yang dibahas di Bab 5. Karena lamanya waktu yang diperlukan untuk beradaptasi sepenuhnya gelap, pengurangan sensitivitas merah dimanfaatkan oleh mereka yang ingin mempertahankan penglihatan malam mereka, seperti astronom. Dengan membuat iluminasi, panel tampilan atau kontrol lainnya menjadi merah, informasi dapat dibaca menggunakan kerucut L sensitif merah foveal, sementara hanya menyebabkan pengurangan sebagian pada penglihatan malam, jika ada. Paparan yang berlebihan terhadap stimulus terang akan menyebabkan desensitisasi area retina di bidang pandang, karena pemutihan fotopsin yang terlokalisasi. Ketika stimulus dihilangkan, gambar sisa tetap ada karena retina tidak lagi sensitif terhadap tingkat cahaya rendah. Gambar setelahnya tetap ada sampai sensitivitas lokal kembali normal. Penegasan bahwa gambar setelahnya adalah retinal, bukan saraf, efek sudah tersedia karena dimungkinkan untuk membuatnya dalam satu mata dengan menutup yang lain. Saat mata lainnya digunakan untuk melihat pemandangan, gambar setelahnya menghilang.

48. Penglihatan warna dasar

48.1. Teori Young-Helmholtz tentang penglihatan warna

Seperti yang dijelaskan di Bab 1, pemisahan dan rekombinasi cahaya menunjukkan bahwa mata manusia mungkin memiliki tiga jenis kepekaan warna, masing-masing terhadap cahaya red, green, dan blue. Teori kepekaan rangkap tiga ini disebut teori penglihatan warna Young-Helmholtz. Ini memberikan penjelasan yang cukup sederhana untuk produksi warna apa pun dari proporsi yang sesuai dari primer ini. Jenis pencampuran warna ini diterapkan dalam tampilan tabung sinar katoda yang memiliki fosfor pemancar cahaya red, green, dan blue di pelat muka mereka, sedangkan campuran warna subtraktif diterapkan di sebagian besar bahan fotografi berwarna,

perangkat output hard copy berwarna, dan layar kristal cair. Pencampuran warna subtraktif melibatkan overlay pewarna cyan, magenta dan yellow.

48.2. Teori lawan dari penglihatan warna

Teori penglihatan warna trikromatik tidak dapat menjelaskan beberapa pengamatan. Kami tidak melihat kuning kebiruan dan kami tidak melihat hijau kemerahan. Lebih jauh lagi jika kita melihat pada bayangan benda merah seringkali berwarna hijau dan jika kita melihat bayangan benda biru seringkali berwarna kuning. Premis ini membentuk dasar teori lawan dari penglihatan warna: bahwa pemrosesan saraf dalam jalur visual menunjukkan lawan merah versus hijau, biru versus kuning, dan hitam versus putih. Studi elektrofisiologi tampaknya mendukung teori tersebut dengan penemuan sel ganglion kuning redegreen dan bluee. Lihat Bab 5 untuk detail lebih lanjut tentang subjek.

48.3. Visi warna penglihatan anomali

Penglihatan anomali warna, atau kebutaan warna seperti yang umum diketahui, disebabkan oleh tidak mampu mendeteksi rasio proporsi spektrum secara memadai dan biasanya mengakibatkan ketidakmampuan untuk membedakan kelompok warna tertentu, daripada penglihatan monokromatik seperti namanya. Ini umumnya terjadi ketika salah satu fotopsin tidak dapat disintesis. Kebanyakan buta warna adalah keturunan, dibawa oleh kromosom X, dan oleh karena itu mempengaruhi lebih banyak pria daripada wanita. Hingga 8% laki-laki terkena di beberapa populasi sedangkan kurang dari 0,5% perempuan terpengaruh. Penglihatan sepenuhnya monokromatik, achromatopsia, terjadi pada kurang dari 1% kasus. Tidak ada pengobatan untuk buta warna dan dapat menyebabkan beberapa kesulitan seperti membaca peta dengan legenda warna, lampu lalu lintas, tes kimia berbasis warna, melihat kematangan makanan, memilih pakaian atau interpretasi grafik berwarna. Kesulitan membedakan warna merah dan hijau sejauh ini merupakan gejala buta warna yang paling umum, terjadi pada 99% kasus, terdiri dari protan yang berwarna merah lemah dan deutan yang berwarna hijau lemah.

Orang dengan penglihatan warna biasa dikenal sebagai trikromat dan penglihatan mereka sebagai trikromasi (Bab 5). Trikromasi anomali terjadi ketika salah satu dari tiga jenis kerucut tidak beroperasi seperti yang diharapkan tetapi masih berfungsi sampai tingkat tertentu. Kondisi yang lebih parah terjadi ketika salah satu jenis kerucut berhenti berfungsi sama sekali, dikromasi.

Trikromasi anomali dapat dibagi menjadi protanomali dan deuteranomali. Protanomali adalah penglihatan redup-merah dan saturasi dan kecerahan warna menderita sebagai hasilnya. Mempertimbangkan teori lawan, ini pada gilirannya memengaruhi rona, saturasi, dan kecerahan semua warna yang mungkin dianggap mengandung proporsi lawan redegreen: merah, oranye, kuning, hijau, ungu. Protanomali mempengaruhi sekitar 1% pria. Deuteranomali adalah penglihatan hijau-lemah dan menyebabkan masalah diskriminasi yang sama seperti protanomali di sekitar 5% kasus, sekali lagi mempengaruhi warna dengan lawan redegreen, meskipun dengan hijau tampak pucat dan tidak jenuh.

Dikromasi mempengaruhi sekitar 2% pria dan selanjutnya dapat dibagi menjadi protanopia dan deuteranopia. Sementara trikromat anomali dapat segera berfungsi, kondisi ini biasanya lebih parah. Daripada memiliki sedikit efek pada warna merah atau hijau, mereka umumnya tidak dapat melihat perbedaan antara rona. Protanopia, defisiensi merah yang parah, mempengaruhi 1% pria. Merah, oranye, dan kuning tampak gelap dan tidak

dapat dibedakan dari hijau. Deuteranopia, defisiensi hijau parah, juga menyerang sekitar 1% pria, serupa tetapi tidak menyebabkan peredupan abnormal. Buta warna biru-kuning juga ada, meski sangat jarang.

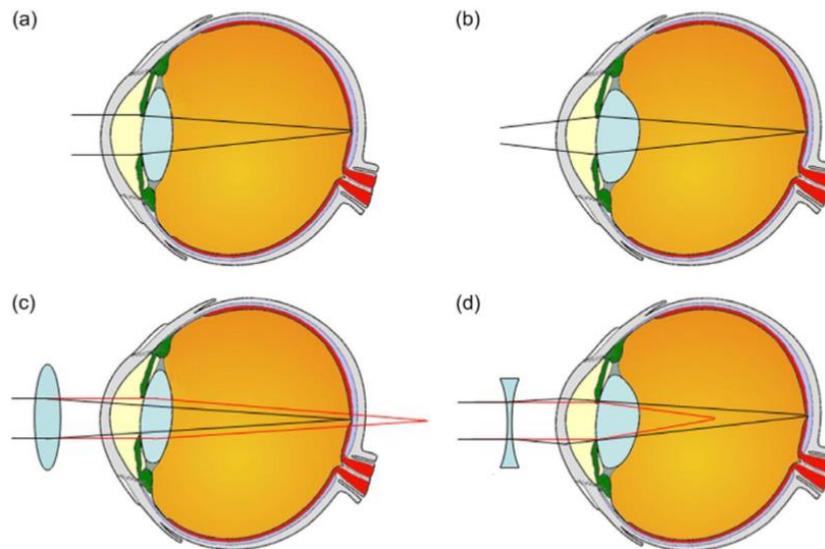
Tes untuk buta warna sudah tersedia dan mudah dilakukan. Untuk tujuan diagnostik, kondisi pencahayaan harus diatur sedemikian rupa sehingga menyimulasikan siang hari pada tingkat pencahayaan yang nyaman. Jika pengaturan pencahayaan lain digunakan, hasil umumnya hanya berlaku untuk kondisi tersebut. Uji rona Farnsworth-Munsell 100 terdiri dari empat baki dengan total 85 tutup yang menunjukkan sedikit perubahan rona. Pengguna mencoba mengatur tutup sesuai urutan rona mereka. Kesalahan pada posisi topi dicatat dan digunakan untuk mendiagnosis kualitas penglihatan warna subjek. Tes Farnsworth-Munsell 100hue dapat mendeteksi semua jenis penglihatan warna dan 85 rona membentuk lingkaran rona yang sempurna.

Pelat pseudo-isochromatic muncul sebagai gambar yang berisi titik acak dengan warna berbeda. Tersembunyi di dalam pelat adalah nomor atau jalur dengan corak yang sedikit berbeda. Orang dengan penglihatan anomali warna tidak dapat membaca informasi tersembunyi. Contohnya adalah uji pelat Ishihara, versi lengkap yang berisi 38 pelat dan biasanya digunakan untuk mendeteksi kebutaan redgreen. Pelat Optik Amerika selanjutnya dapat digunakan untuk menilai tingkat keparahan buta warna. Tes pelat yang dimodifikasi yang menggunakan gambar daripada angka dapat digunakan untuk menguji orang-orang yang sulit berkomunikasi atau membaca, seperti anak-anak prasekolah.

49. Movement/Gerakan dan Fokus

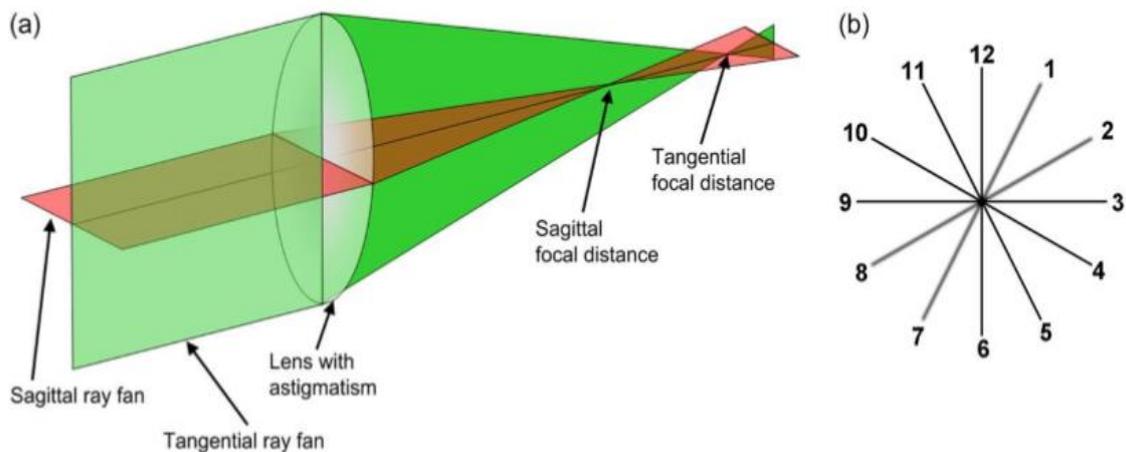
49.1. Fokus dan koreksi penglihatan

Memfokuskan mata dikenal sebagai akomodasi. Lensa kristal digantung di belakang iris oleh zonula Zinn (Gambar 4.1). Zonula adalah ligamen, terbuat dari kolagen, yang menempel pada otot siliaris melingkar. gambar retina yang tidak fokus memicu sistem parasimpatis, yang berkontraksi dan melemaskan otot siliaris. Saat otot siliaris rileks, zonula menjadi diajarkan, menempatkan ketegangan pada lensa kristal dan itu dilemahkan. Ketika otot siliaris mengencang, zonula menjadi rileks dan lensa menjadi bulat. Untuk mempertahankan fokus pada objek jarak, kelengkungan lensa dikurangi, lensa diperkecil, dan panjang fokus ditingkatkan. Sebaliknya, untuk fokus pada objek yang dekat, kelengkungan diperbesar, lensa digemukkan, dan panjang fokus dikurangi (Gambar 4.12). Memfokuskan pada hewan lain dapat mencakup menggerakkan lensa daripada mengubah kekuatan optiknya seperti di atas. Seiring bertambahnya usia mata, lensa kristal menjadi lebih tebal dan kaku karena proteinnya terus tumbuh. Hal ini menyebabkannya mengeras, menghilangkan kemampuannya untuk mengubah bentuk dan karenanya fokus. Dikenal sebagai presbiopia, ini umumnya mulai terjadi setelah usia 40 tahun dan membuatnya lebih sulit untuk fokus pada jarak dekat. Melemahnya otot siliaris menambah efek kondisi tersebut.



Gambar 2.12 (a) Memfokuskan pada objek jarak, lensa flareash menegang. (b) Lensa menjadi lebih bulat saat memfokuskan pada objek dekat. (c) Hiperopia, atau umumnya rabun jauh, mungkin diperbaiki dengan menambahkan lensa daya positif di depan mata. (d) Miopia, atau rabun dekat seperti yang diketahui, dapat dikoreksi dengan penambahan lensa daya negatif ke bagian depan mata.

Jika kornea memiliki kelengkungan yang terlalu kecil (lebih kecil dari yang seharusnya) daya optik lensa kristal tidak dapat mengimbangnya dan gambar dibawa ke fokus di belakang retina. Hiperopia, atau rabun jauh seperti yang umum dikenal, terjadi pada sekitar 1 dari 4 orang dan menyebabkan objek di dekat menjadi tidak fokus. Kondisi tersebut juga bisa terjadi jika bola mata terlalu pendek. Menambahkan lensa daya positif di depan mata dapat memperbaiki hal ini (Gambar 2.12a). Miopia, atau yang dikenal sebagai rabun dekat, adalah kondisi komplementer, yang sekali lagi mempengaruhi sekitar 1 dari 4 orang. Gambar difokuskan di depan retina baik karena kekuatan kornea terlalu besar atau karena bola mata terlalu panjang (miopia aksial). Penambahan lensa daya negatif ke depan mata dapat memperbaiki hal ini.



Gambar 4.13 (a) Pengaruh astigmatisme dari panjang fokus lensa di bidang tangensial dan sagittal. (b) Pengaruh astigmatisme pada penglihatan. Batang menjadi kabur pada berbagai sudut.

Astigmatisme adalah kelengkungan kornea atau lensa kristal yang tidak simetris. Permukaan yang terkena lebih melengkung ke satu arah daripada yang lain, agak mirip dengan bola rugby. Jika sejumlah penampang diambil, masing-masing akan menunjukkan daya optik atau panjang fokus yang berbeda (Gambar 2.13a). Efek dari

hal ini pada pemfokusan menarik dan menyebabkan mereka yang terpengaruh dapat memfokuskan pada struktur dalam satu arah dengan lebih kuat. Misalnya, ada kemungkinan seseorang dapat fokus pada garis horizontal tetapi tidak pada garis vertikal pada saat yang bersamaan (Gambar 2.13b). Astigmatisme, yang terjadi secara terpisah, dapat dikoreksi dengan menggunakan lensa silinder.

49.2. Movement/Gerakan

Karena perubahan resolusi di seluruh bidang pandang mata, gerakan dan pemindaian sangat penting untuk membangun gambaran pemandangan di sekitar kita dan persepsi yang tepat tentang dunia. Meskipun umumnya tidak diperhatikan, mata bergerak terus-menerus untuk mengarahkan area kecil dan tinggi dari fovea ke objek yang diminati. Selain itu, mata harus dapat mengimbangi pergerakan kepala agar dapat mempertahankan arah pandangan dan mengikuti objek yang akan bergerak terlalu cepat melintasi retina. Kecepatan maksimum hanya beberapa derajat per detik sebelum otak gagal mengenali gambar bergerak. Setiap mata dikendalikan oleh enam otot, yang melekat pada sklera.

Gerakan mata dapat dibagi menjadi beberapa jenis yang berbeda: pengejaran halus, saccades, refleks vestibular-okuler, refleks opto-kinetik, dan vergence. Pengejaran halus terjadi ketika sebuah objek diikuti dengan kecepatan hingga 100° per detik, sedangkan saccade adalah gerakan cepat mata ke bagian lain dari sebuah pemandangan. Saccades dapat mencapai kecepatan hingga 1000° per detik dan bersifat balistik: dapat dimulai secara sukarela tetapi tidak dapat diubah setelah dimulai. Mereka digunakan terutama untuk fiksasi tetapi pencitraan ditekan selama gerakan, seperti halnya persepsi gerakan (masking sakadik). Micro-saccade adalah gerakan tak sadar yang serupa dengan saccade tetapi terjadi pada sudut pandang yang jauh lebih kecil, kira-kira 0.2° . Tujuan pastinya masih menjadi topik penelitian, meskipun telah disarankan bahwa karena mata terus mencari kontras, mata dapat digunakan untuk menyegarkan gambar retina atau untuk merangsang bidang reseptif yang berbeda. Arah pandangan, saat kepala digerakkan, dipertahankan oleh refleks vestibular-okuler dan organ keseimbangan di telinga digunakan sebagai mekanisme umpan balik. Efektivitas metode ini dapat ditunjukkan saat membaca buku. Menggerakkan kepala dari satu sisi ke sisi lain adalah mungkin untuk terus membaca buku yang tidak bergerak, sedangkan menjaga agar kepala tidak bergerak dan menggerakkan buku tidak mungkin untuk melanjutkan membaca melebihi kecepatan yang paling sederhana. Saccades dan pengejaran halus dikombinasikan oleh refleksi opto-kinetik. Mata mengikuti arah pergerakan suatu objek dan saccade mengembalikan mata ke posisi awal. Ini biasanya dialami sebagai penumpang di dalam mobil atau dalam perjalanan pasar malam. Penglihatan manusia adalah sistem binokuler dan jika gambar dari setiap mata tidak tumpang tindih akan terjadi penglihatan ganda. Agar suatu objek dapat dibawa ke tengah bidang pandang di kedua mata, Anda harus sedikit memutar mata ke dalam. Ini dikenal sebagai vergence dan tanpanya penglihatan binokular akan menjadi di bawah standar. Dimungkinkan juga untuk memutar mata di sekitar sumbu optik dan ini umumnya tergantung pada sudut kepala.

49.3. Jalur visual

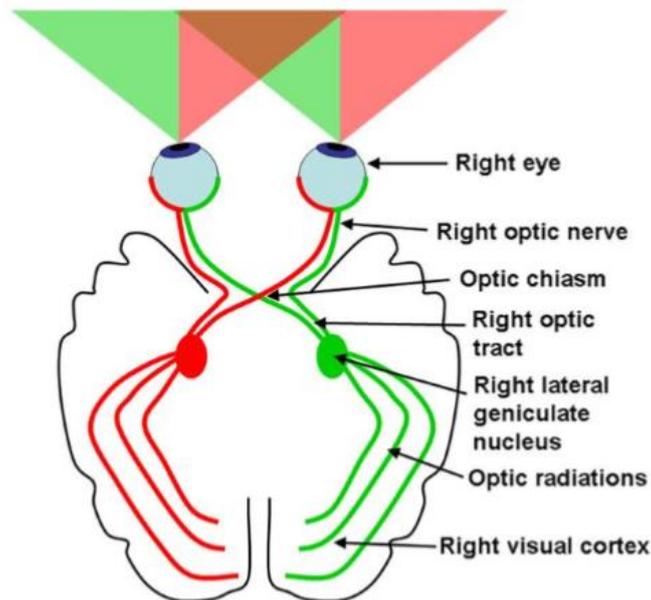
Respon sistem visual manusia terhadap rangsangan umumnya sangat baik sehingga kami tidak mempertimbangkannya secara teratur. Namun proses dan otaknya luar biasa kompleks. Otak memiliki kurang lebih 1.012 sel. Jalur visual dimulai dengan sinyal

yang dihasilkan di sekitar 125 juta fotoreseptor yang melapisi bagian belakang mata dan diakhiri dengan persepsi pemandangan itu, yang selanjutnya terdiri dari semua titik yang saling berhubungan. Fungsi otak adalah area aktif penelitian dan banyak cara kerjanya yang tidak diketahui; namun, banyak upaya telah dikhususkan untuk jalur visual.

Jalur visual dapat dianggap sebagai serial, meskipun ada beberapa cabang paralel (Gambar 2.14). Sinyal dari sel fotoreseptor diproses oleh masing-masing lapisan retinal seperti yang dijelaskan sebelumnya. Hasilnya ditransmisikan oleh akson sel ganglion yang membentuk saraf optik, yang mengandung sekitar 1 juta serat, dan bergerak ke kiasme optik.

Setiap setengah dari bidang visual umumnya disebut sebagai bidang temporal dan nasal masing-masing. Setiap mata menghasilkan informasi yang sebagian besar tumpang tindih. Serat dari bidang hidung di setiap silangan mata di kiasme optikus, menyebabkan bagian kiri dan kanan dari pemandangan tersebut bergabung. Kiasme optik kemudian berlanjut dalam dua jalur yang dikenal sebagai saluran optik. Bidang visual kanan mengarah ke otak kiri dan bidang visual kiri mengarah ke otak kanan. Bidang visual yang tumpang tindih penting untuk penglihatan stereo dan karena itu kiasme optik sangat penting untuk memfasilitasi hal ini.

Saluran optik menuju ke dua area seukuran kacang di dalam talamus yang dikenal sebagai lateral geniculate nucleus (LGN). Fungsi pasti dari LGN tidak sepenuhnya diketahui. Ini adalah struktur berlapis dan memiliki enam lapisan badan sel, beberapa di antaranya saling berhubungan, serta yang lain mengirimkan pulsa langsung ke korteks visual. Hal ini terbukti memiliki bidang reseptif seperti di retina dan diperkirakan memproses informasi dan memperkenalkan efisiensi pengkodean dengan membatalkan redundansi. Ini juga dapat membantu mengoordinasikan perhatian sistem visual ke peristiwa penting dari rangsangan sensorik lainnya. Misalnya, suara dari kanan mungkin menarik pandangan mata. Akson LGN menyebar melalui materi putih otak melalui radiasi optik dan akhirnya melakukan perjalanan ke korteks visual primer. LGN juga diketahui memiliki koneksi umpan balik dari korteks visual primer. Sinyal tidak hanya didistribusikan oleh saraf optik dan kiasme ke LGN; informasi juga didistribusikan ke area tambahan di otak untuk mengontrol proses seperti konvergensi mata atau menghasilkan gerakan sakadik.



Gambar 2.14 Jalur visual.

49.4. Korteks visual

Korteks visual, salah satu struktur otak terbesar, terletak di bagian belakang kepala. Ini terdiri dari korteks visual primer, juga dikenal sebagai korteks striate, dan korteks ekstrasriate. Istilah striate berasal dari tampilan dan struktur berlapisnya. Korteks visual primer selanjutnya disebut area V1, dan area kortikal ekstrasriate V2, V3, V4 dan V5.

Korteks visual primer menerima informasi langsung dari nukleus genikulat lateral, setelah itu diperkirakan ada dua jalur pemrosesan utama, aliran ventral dan dorsal. Meskipun masih menjadi subjek penelitian saat ini, ini sering disebut sebagai jalur ‘apa’ dan ‘di mana’ atau ‘bagaimana’ masing-masing. Aliran ventral dianggap bertanggung jawab untuk pengenalan dan memori, melintasi area V1, V2 dan V4. Dari V4, informasi berjalan ke lobus temporalis inferior. Aliran punggung diperkirakan terkait dengan posisi dan pergerakan benda dan bergerak menuju lobus parietal inferior setelah melintasi V1, V2, V3 dan V5.

Bidang pandang dipetakan ke area V1, menjaga informasi spasial. Pembesaran kortikal, bagaimanapun, memetakan bagian tengah, yaitu fovea, ke proporsi yang jauh lebih besar, kira-kira setengahnya. Bidang reseptif telah terbukti ada di seluruh korteks visual, seperti pada nukleus genikulat lateral dan retina, meskipun lebih canggih daripada keduanya. Visi binokular

49.5. Penglihatan Binokular

Persepsi kedalaman sangat berguna untuk melakukan banyak tugas sehari-hari - mengemudi, berjalan, mengambil objek. Ini memungkinkan penilaian jarak dan kecepatan relatif benda-benda yang bergerak menuju atau menjauh dari kita. Mekanisme utama dari persepsi kedalaman adalah stereopsis. Gambar dari kedua mata menunjukkan pemandangan yang sedikit berbeda dari pemandangan yang sama karena diambil dari sudut yang berbeda. Otak mampu menafsirkan ini sebagai satu pandangan

melalui analisis gambar. Untuk dapat melakukannya, bidang pandang dari setiap mata harus saling tumpang tindih.

Selain stereopsis, ada banyak efek lain yang memberi petunjuk binokuler pada sistem visual. Objek yang tumpang tindih menunjukkan bahwa yang satu mungkin berada di belakang yang lain. Juga, jika ukurannya tetap konstan, mereka akan tampak lebih besar saat mendekati mata. Karena perspektif, secara umum juga diharapkan bahwa rangsangan akan muncul lebih tinggi di tempat kejadian dan memberikan sudut visual yang lebih kecil. Warna juga akan mempengaruhi kedalaman yang terlihat karena kabut atmosfer cenderung mengurangi saturasi dan menurunkan kontras. Desaturasi mungkin dianggap sebagai hilangnya intensitas warna. Lebih halus, tekstur juga berulang dengan frekuensi yang meningkat. Sudut yang dibutuhkan mata untuk membawa objek ke pusat bidang pandang di setiap mata, konvergensi, berkurang seiring dengan jarak. Akhirnya, jika gerakan terlibat, gerakan paralaks mungkin digunakan. Ini muncul saat objek yang lebih dekat bergerak lebih cepat daripada objek yang lebih jauh. Ini karena luasnya pemandangan yang termasuk dalam bidang tampilan meningkat dengan rentang untuk sudut visual yang konstan. Sebaliknya, menggerakkan kepala akan menyebabkan benda-benda yang ada di dekat tampak lebih banyak bergerak. Mengukur paralaks, dengan merekam posisi terkait dalam gambar saat sudut pandang pengamat diubah, memungkinkan jarak dihitung dengan triangulasi. Teknik ini dapat digunakan untuk menemukan jarak atau mengukur jarak bintang, misalnya.

Penggunaan dua mata menimbulkan efek lain. Karena penjumlahan binokuler, ambang batas untuk mendeteksi rangsangan menggunakan kedua mata lebih rendah daripada yang satu. Interaksi mata menyebabkan diameter pupil menjadi sama di keduanya, bahkan jika salah satunya tertutup dan, lebih jauh, jika mata terbuka difokuskan pada suatu objek, akomodasi yang lain akan sama.

Kedalaman dari stereopsis muncul dari bentuk paralaks. Alih-alih mengubah sudut pandang, paralaks dihasilkan oleh mata yang dipisahkan oleh jarak. Sedikit perbedaan posisi gambar pada setiap retina menghasilkan disparitas retina, petunjuk kedalaman. Disparitas retina juga bisa disebut disparitas horizontal atau disparitas binokular. Untuk dapat mendeteksi disparitas retina titik yang sama pada kedua gambar retina perlu dicocokkan atau dikorelasikan. Hal ini menyebabkan masalah korespondensi - setiap titik dalam satu gambar retina berpotensi dicocokkan dengan sejumlah titik di gambar retina lainnya. Diperkirakan bahwa sistem visual mengatasi hal ini dengan menempatkan bidang reseptif pada posisi horizontal yang sedikit berbeda di seluruh korteks visual. Ini pada dasarnya mengkonfigurasi bidang reseptif mata kiri dan kanan yang cocok untuk merespons lebih kuat ketika rangsangan yang menunjukkan disparitas horizontal yang benar disajikan. Perpaduan gambar dari kedua mata untuk menghasilkan satu pemandangan dianggap terpisah dari persepsi kedalaman. Hal ini diketahui melalui gangguan pada sistem visual yang dapat merusak stereopsis tetapi fusi cadangan. Hewan pemangsa sering kali lebih menyukai penglihatan stereo daripada bidang pandang yang luas untuk dapat menemukan dan mengejar mangsa dengan menempatkan mata pada bidang besar yang tumpang tindih. Mangsa, sebaliknya, sering kali menyukai bidang perhatian yang lebih luas dan dengan demikian menghindari tertangkap. Perilaku sistem visual manusia tidak sepenuhnya dikodekan oleh gen; sebagian darinya dipelajari melalui pengalaman sebagai bayi. Kurangnya stimulus visual selama perkembangan dapat menyebabkan persepsi kedalaman yang buruk.

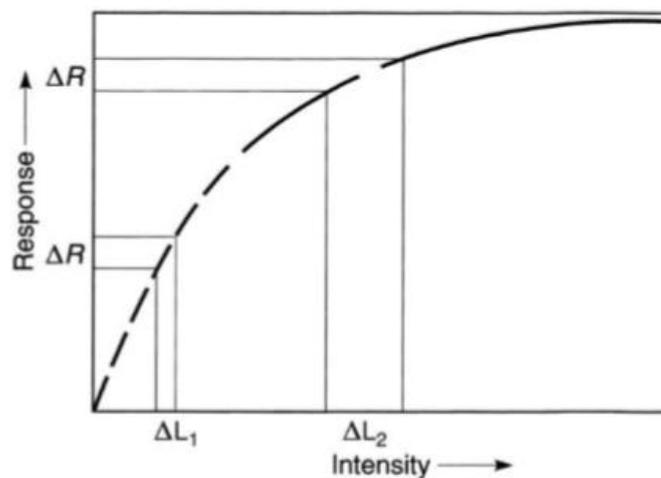
50. Performa mata

50.1. Diskriminasi luminansi

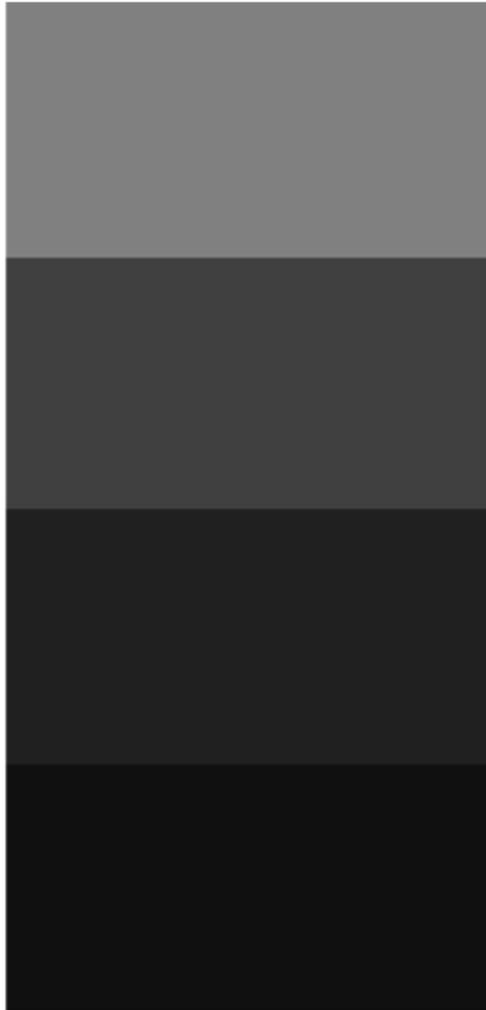
Diskriminasi *luminansi* (perubahan luminositas dan kecerahan suatu objek atau kecerahan sumber cahaya) diatur oleh level. Saat luminansi meningkat, perubahan yang lebih besar dalam luminansi diperlukan untuk melihat perbedaan yang terlihat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15. Ini dikenal sebagai Hukum Weber-Fechner dan pada rentang luminansi yang cukup besar, rasio perubahan luminansi (ΔL) ke luminansi (L) adalah konstan sekitar 0,01 dalam kondisi tampilan optimal:

$$\frac{\Delta L}{L} = c$$

Rasio intensitas cahaya adalah ciri penting dari persepsi kita. Gambar 2.16 memberikan indikasi visual dari intensitas cahaya yang dipantulkan di mana setiap langkah meningkat kira-kira dengan rasio yang sama dari 1, 2, 4, 8, yaitu skala logaritmik. Besaran bintang diekspresikan secara logaritmik karena alasan ini. Hipparchus memberi peringkat kecerahan bintang-bintang yang dapat dilihatnya dari 1, yang paling terang, ke 6, yang paling redup, di Yunani kuno sekitar 150BC. Sistem tersebut, meskipun diperluas dan diformalkan, digunakan hingga saat ini. Respons logaritmik mata menciptakan kebutuhan akan koreksi gamma di sejumlah sistem pencitraan, seperti yang akan dibahas di bab selanjutnya.



Gambar 2.15 Respon vs. intensitas untuk mata manusia.



Gambar 2.16 Langkah yang sama dalam pencahayaan, setiap langkah berbeda dengan rasio yang sama.

50.2. Fungsi sensitivitas kontras

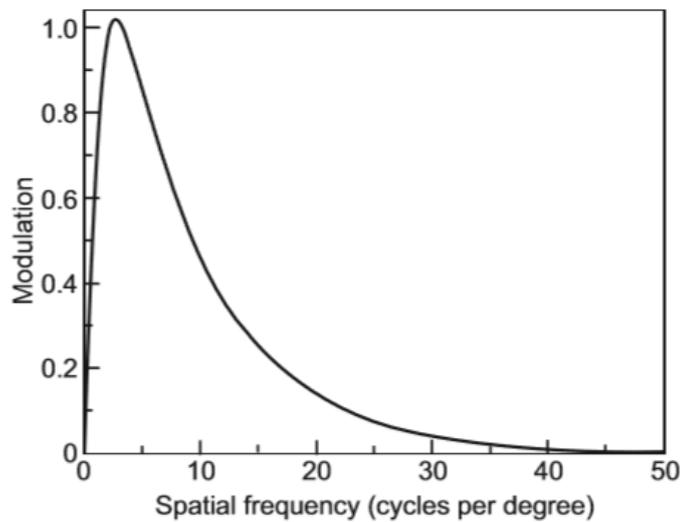
Kemampuan sistem visual manusia untuk membedakan detail halus telah ditentukan dalam kaitannya dengan fungsi sensitivitas kontras (CSF). CSF didefinisikan sebagai respon ambang untuk kontras di mana kontras (atau modulasi) adalah perbedaan antara pencahayaan minimum (L_{min}) dan maksimum (L_{max}) dari stimulus dibagi dengan jumlah mereka:

Ekuasi 4.2

$$\text{Kontras} = \frac{(L_{max} - L_{min})}{(L_{max} + L_{min})}$$

CSF tipikal untuk luminansi yang ditunjukkan oleh HVS ditunjukkan pada Gambar 2.17. Biasanya diukur dengan menghadirkan gelombang sinus dari berbagai frekuensi kepada pengguna dan memvariasikan kontras hingga polanya dapat dideteksi. Karena distribusi batang dan kerucut di retina, CSF untuk saluran warna (lihat Bab 5) berbeda dari yang ditunjukkan pada Gambar 4.17, dengan frekuensi puncak dan frekuensi cut-off yang lebih rendah. Untuk pencahayaan, HVS memiliki sensitivitas kontras spasial puncak pada sekitar 5 siklus per derajat visual dan cenderung nol pada sekitar 50 siklus per derajat visual. Karena sharpness yang lebih rendah yang ditunjukkan oleh batang

dalam penglihatan scotopic, diharapkan kurva CSF akan berubah sehubungan dengan iluminasi. Memang, ini masalahnya dan kinerja keseluruhan turun sebagai fungsi penerangan. Model lebih lanjut dari kinerja mata dapat ditemukan di Bab 5.



Gambar 2.17 Fungsi sensitivitas kontras spasial untuk sistem visual manusia.

50.3. Sharpness visual

Sementara CSF untuk mata mengekspresikan kemampuannya untuk menyelesaikan frekuensi spasial individu, CSF tidak memberikan informasi intuitif tentang kemampuannya untuk melakukan tugas-tugas dasar atau kinerja terhadap populasi rata-rata. Sharpness visual adalah indikasi kekuatan mata. Ketinggian huruf bagan uji diatur untuk mengubah sudut 5 menit jika dilihat pada jarak 20 kaki. Ini setara dengan ketinggian sekitar 8,9mm dan penglihatan normal. Tinggi huruf dipilih sesuai dengan Kriteria Raleigh (Bab 2), sehingga setiap baris huruf besar 'E' harus diselesaikan dengan benar. Jarak dipilih sehingga mata berada pada titik optis. Sharpness visual kemudian dituliskan sebagai pecahan dengan pembilangnya sebagai jarak tes dan penyebutnya merupakan indikasi kualitas penglihatan. Oleh karena itu, penglihatan normal ditulis sebagai 20/20. Visi yang baik dapat ditulis sebagai 20/10; subjek dapat membaca surat pada ketinggian 20 kaki yang hanya dapat dibaca oleh orang normal pada ketinggian 10 kaki. Contoh penglihatan yang buruk mungkin 20/30, di mana bagan dapat dibaca pada ketinggian 30 kaki oleh seseorang dengan penglihatan biasa.

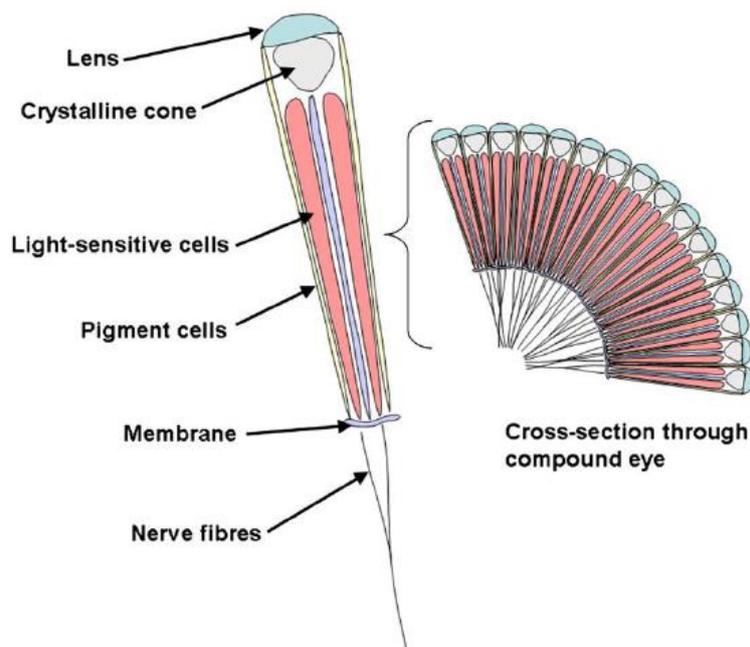
50.4. Visi Animal

Penglihatan hewan menunjukkan beberapa variasi yang luar biasa dan keanekaragaman tersebut mengilhami banyak ide dalam pencitraan. Sebagian besar sistem visual mereka telah berevolusi untuk mengatasi lingkungan dan perilaku mereka dengan sebaik-baiknya. Hewan nokturnal, misalnya, biasanya memiliki pupil yang sangat melebar untuk membiarkan cahaya masuk sebanyak mungkin serta kornea yang secara proporsional lebih besar. Seperti disebutkan sebelumnya, predator sering kali memiliki mata besar yang menghadap ke depan dan memanfaatkan stereopsis. Beberapa mata yang paling sederhana, *oselus*, ditemukan pada hewan seperti siput dan hanya memiliki kemampuan untuk membedakan antara terang dan gelap.

Terdapat sejumlah kesalahpahaman umum terkait penglihatan berbagai hewan, dan penglihatan monokrom yang sering salah dikutip dari anjing adalah contohnya.

Sementara retina anjing sebagian besar terdiri dari batang, dua jenis kerucut memang ada dalam jumlah rendah, menjadikannya dikromat, dengan 10-20% kerucut di retina pusat. Kerucut memiliki sensitivitas puncak pada sekitar 429 dan 555 nm.

Dominasi batang menyebabkan mata taring merespons dengan baik dalam cahaya rendah dan ini selanjutnya diperkuat oleh kornea besar dan tapetum lucidum, lapisan reflektif yang ada di koroid, yang mencerminkan cahaya yang tidak diserap kembali ke fotoreseptor. Tapetum dapat menggeser panjang gelombang cahaya, melalui fluoresensi, menuju puncak sensasi batang. Alih-alih fovea, retina anjing berisi area memanjang yang disebut garis visual. Sejajar dengan tanah, letaknya di atas saraf optik. Sharpness visual anjing sekitar sepertiga dari sharpness manusia, biasanya dari 20/50 hingga 20/100, dan saraf optik memantulkannya, terdiri dari kurang dari 170.000 serat. Sistem visual kucing juga disesuaikan dengan penglihatan cahaya rendah, meskipun trikromatik lemah, dan sharpness visual yang lebih rendah, sekitar 20/100. Tapetum dapat tampak berwarna-warni pada kedua spesies, memberikan namanya ke reflektor retro yang menandai pusat jalan, 'mata kucing'. Tapetum kucing dapat memantulkan cahaya 100 kali lebih banyak daripada mata manusia. Kedua mata anjing dan kucing memiliki pupil elips, memungkinkan mereka menutup hampir sepenuhnya.



Gambar 2.18 Ommatidium mata majemuk

Ini adalah antarmuka aircornea yang memberikan sebagian besar kekuatan optik di mata manusia dan pengurangan perbedaan indeks bias yang membuat mata tidak dapat fokus saat berada di bawah air. Untuk mengatasi masalah ini beberapa hewan, seperti buaya, memiliki kelopak mata refraksi tambahan agar bisa melihat keluar masuk air. Kekuatan optik mata beberapa burung penyelam dapat berubah hingga 50 dioptries dibandingkan dengan sekitar 16 dioptri manusia. Mata burung menunjukkan keragaman yang luar biasa. Elang mengandalkan penglihatan untuk berburu dan ini tercermin dalam pertunjukan, dengan sharpness visual diperkirakan 20/2. Ia diperkirakan dapat mendeteksi mangsa dari ketinggian sekitar satu mil. Mata raptor mengandung batang seperti manusia tetapi dapat memiliki hingga lima jenis kerucut yang meningkatkan diskriminasi warna, dan fotoreseptor yang lebih padat. Tetesan

minyak di kerucut bertindak sebagai filter untuk memilih panjang gelombang yang sesuai. Sebagian besar mata burung, dan banyak hewan, juga mengandung selaput pengelap, kelopak mata ekstra yang digunakan untuk membersihkan debu dan kotoran dari mata secara teratur. Berbeda dengan kelopak mata luar, kelopak mata ini umumnya bergerak secara horizontal.

Saat melihat ke langit, cahaya sebagian terpolarisasi (lihat Bab 2) dan ini tercermin dalam kemampuan merpati yang baru ditemukan untuk dapat mendeteksi bidang polarisasi. Sementara pada merpati, kemampuan dapat membantu pelarian, pada cephalopoda polarisasi telah dikembangkan untuk berburu. Cumi-cumi raksasa, misalnya, beroperasi pada tingkat cahaya redup di lautan yang lebih dalam dan akibatnya, mata mereka telah mengembangkan lubang yang sangat besar sekitar 10 inci dan lebih baik daripada $f/1$. Diperkirakan bahwa polarisasi membantu mereka melihat mangsa yang transparan atau semi-transparan. Sharpness visual mereka diperkirakan dua kali lipat dari manusia, meskipun banyak yang percaya bahwa mereka juga buta warna karena kebanyakan hanya memiliki satu pigmen visual. Beberapa cephalopoda juga dapat menampilkan pola terpolarisasi pada tubuhnya menggunakan iridofor, seperti ikan sotong. Karena air laut sangat menyaring cahaya, diskriminasi warna menjadi lebih sulit bahkan pada kedalaman yang sederhana; bagaimanapun, polarisasi tetap tidak terpengaruh.

Serangga umumnya mengandalkan mata majemuk, yang terdiri dari banyak unit berulang, ommatidium (lihat Gambar 4.18). Ommatidia biasanya berjumlah ribuan, dengan masing-masing diarahkan ke bidang pandang yang sempit. Masing-masing memiliki lampu pemfokusan lensa individual ke fotoreseptor. Sharpness bervariasi di antara serangga, meskipun diperkirakan kira-kira seperenam puluh sharpness manusia untuk lebah madu. Mata majemuk memiliki bidang pandang yang luas, relatif sederhana dan dianggap sangat baik untuk mendeteksi gerakan. Telah diamati bahwa serangga lebih mudah merespons benda bergerak. Beberapa mata majemuk mampu membedakan warna. Lebah, misalnya, memiliki sel fotosensitif dengan absorpsi puncak 344, 436 dan 544 nm. Bunga sering menunjukkan pola di wilayah spektrum ultraviolet yang tidak terlihat oleh mata manusia dan ini dianggap menjelaskan kisaran sensitivitas.

3. NOISE, SHARPNESS, RESOLUSI DAN INFORMASI

51. Pengantar

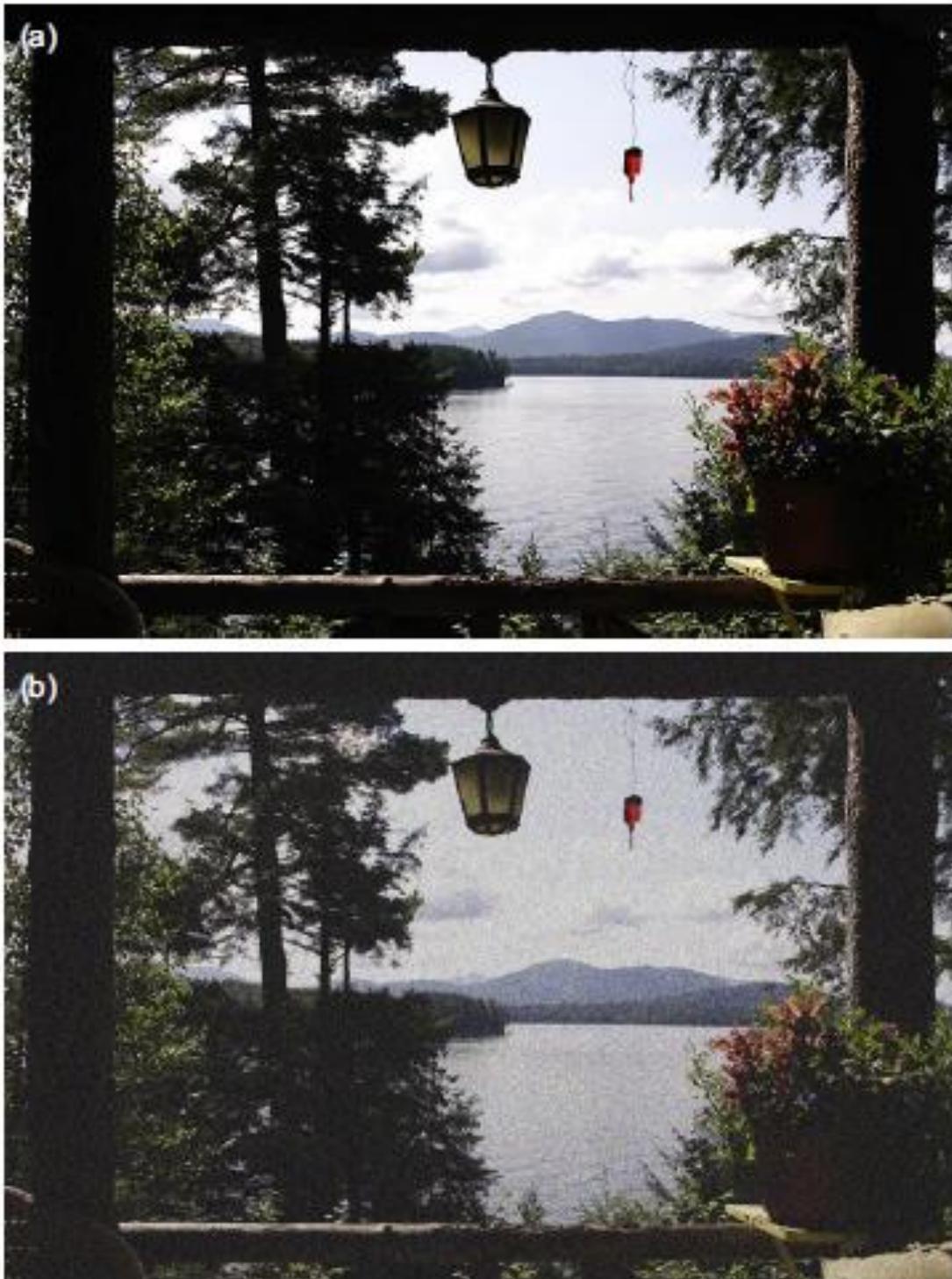
Sistem pencitraan mengirimkan informasi dan dapat dianalisis menggunakan prosedur yang dikembangkan untuk jenis sistem komunikasi lainnya. Dalam Bab 7, analisis respons frekuensi diperkenalkan dan dikembangkan sebagai salah satu prosedur terpenting. Dalam konteks gambar, ini memberikan sashutter untuk menilai kemajuan informasi yang membawa sinyal spasial melalui imaging chain.

Secara umum dengan sistem komunikasi lain, transfer sinyal ini berlanjut dengan latar belakang noise. Memang, keefektifan sebenarnya dari suatu sistem untuk mentransmisikan informasi hanya dapat diukur dari segi rasio sinyal-ke noise. Metrik kualitas gambar yang paling objektif (lihat Bab 19) melibatkan beberapa bentuk komponen signal-to-noise. Dalam bab ini, noise dan sharpness gambar akan diperiksa lebih lanjut, dan cara-cara yang membatasi kegunaan gambar dan sistem pencitraan sebagai pembawa informasi. Langkah-langkah mendasar, seperti detective quantum efficiency (DQE) dan kapasitas informasi, kemudian dapat didefinisikan tanpa mengacu pada teknologi internal yang terlibat dalam sistem pencitraan. Definisi tersebut menggunakan rasio signal-to-noise (S/N), yang bergantung pada fungsi transfer modulasi sistem (MTF) dan daya output noise. Ini semua dapat diukur dari gambar keluaran. Ketika diterapkan pada sistem dan proses gambar spesifik, langkah-langkah mendasar ini menawarkan ruang lingkup tambahan untuk pemodelan, yang pada gilirannya memungkinkan pemahaman yang lebih besar tentang batas-batas berbagai teknologi.

52. Image Noise

Noise gambar pada dasarnya adalah fluktuasi intensitas cahaya yang tidak diinginkan di atas area gambar. Ini adalah kuantitas yang biasanya bervariasi di atas bidang gambar dengan beberapa cara acak, meskipun ada contoh kerusakan gambar dari pola terstruktur seperti pola interferensi sinusoidal (kadang-kadang disebut sebagai noise koheren) dan noise pola tetap yang terkait dengan perangkat yang digabungkan dengan muatan (CCD).

Gambar 3.1 menunjukkan gambar dengan dan tanpa noise. Kami biasanya menganggap noise sebagai pola acak yang ditambahkan ke (atau ditumpangkan di atas) sinyal gambar yang sebenarnya. Meskipun ada ketidakpastian intrinsik, proses acak dapat didefinisikan secara statistik, misalnya dengan nilai rata-rata, varian atau distribusi probabilitasnya. Sifat spasial dapat diringkas dengan fungsi autokorelasi dan spektrum daya.



Gambar 3.1 (a) Gambar tanpa noise yang terlihat. (b) Gambar yang sama dengan peningkatan noise.

Sebab Noise pada Gambar

1. Partisi acak untuk mengekspos cahaya.
2. Jika gambar diubah dari intensitas cahaya distribusi eksposur ke bentuk listrik, akan ada gangguan fotolistrik.
3. Derau elektronik akan terjadi di semua sistem dengan komponen elektronik.
4. Noise kuantisasi terjadi pada tahap digitalisasi dalam sistem digital.

5. Noise eksposur Poisson berarti ada keacakan foton dalam distribusi eksposur seragam nominal.

Yang pertama adalah penyebab noise gambar dalam sistem fotografi di mana gambar menunjukkan noise karena struktur grain acak dari negatif fotografi. Kasus kedua dan ketiga adalah penyebab utama noise gambar pada output sensor CCD atau komplementer metal oxide semiconductor (CMOS). Kasus 4 terjadi pada tingkat yang lebih besar atau lebih kecil dalam semua sistem digital di mana nilai kecerahan dikuantisasi (atau binned) menjadi salah satu dari sejumlah nilai yang terbatas, seperti yang dijelaskan dalam Bab 9. Derau paparan Poisson ada di semua gambar. Ini muncul karena foton cahaya yang ditangkap oleh sistem pencitraan tiba secara acak dalam ruang dan waktu. Besaran relatif, dan karenanya signifikansi, noise kuantum akan bergantung pada sistem dan penggunaannya.

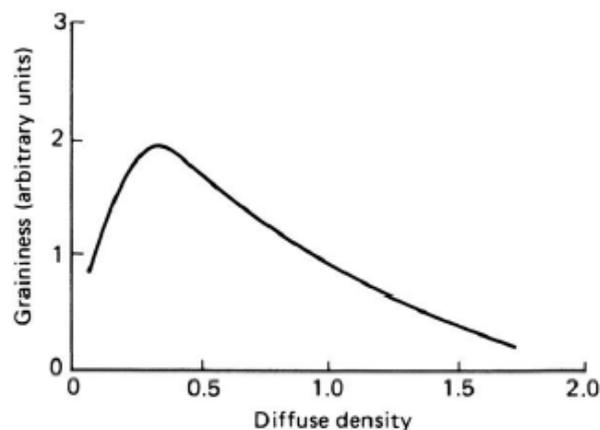
Contoh gambar bising yang paling terkenal terjadi dengan sistem fotografi. Siapapun yang telah mencoba memperbesar lebih dari sekitar 10 dari negatif foto akan terbiasa dengan tampilan struktur berbintik di atas gambar. Noise fotografi dipelajari dengan baik dan prosedur untuk mengukurnya langsung ke depan. Diskusi tentang noise fotografis pertama kali disajikan dengan mengacu pada proses tradisional hitam-putih-negatif-positif.

53. Noise Fotografi

53.1. Graininess (Bintik-bintik)

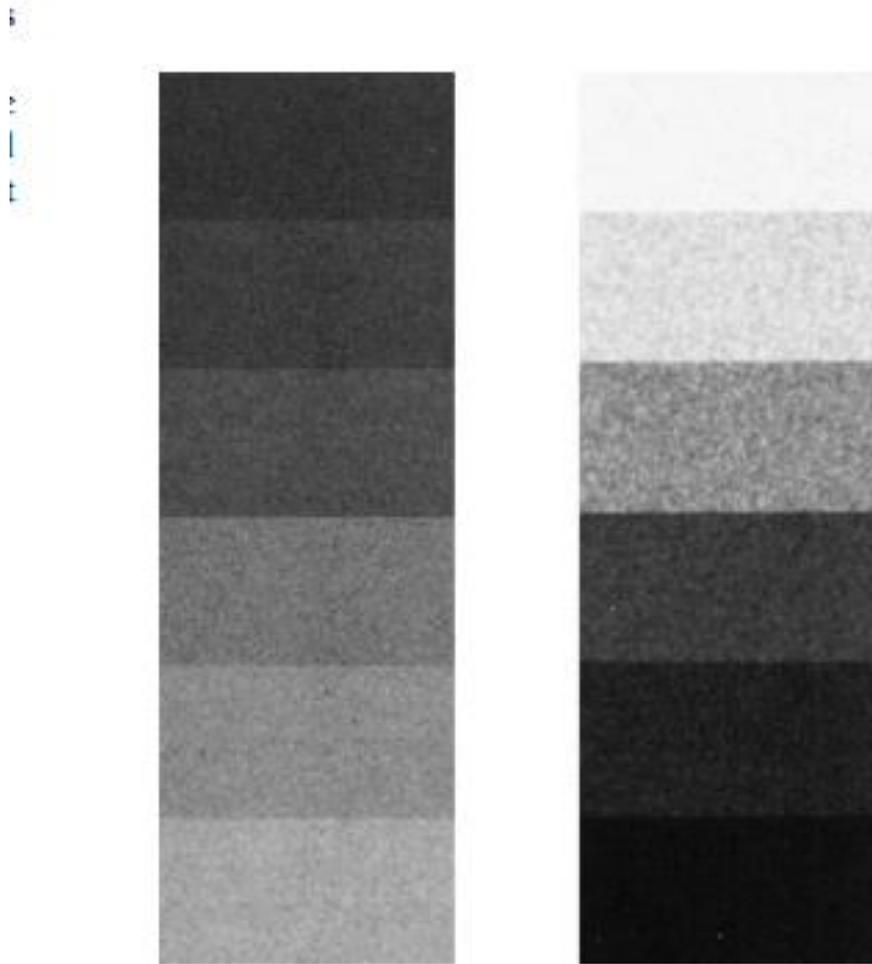
Kristal individu dari emulsi fotografi terlalu kecil untuk dilihat dengan mata telanjang, bahkan yang terbesar hanya berdiameter sekitar 2 μm . Perbesaran sekitar x50 diperlukan untuk mengungkapkan strukturnya. Namun, pola berbintik biasanya dapat dideteksi dalam negatif foto pada perbesaran yang jauh lebih rendah, terkadang hanya tiga atau empat diameter. Ada dua alasan utama untuk ini:

1. Karena biji-bijian tersebar secara acak, dalam maupun di suatu area, biji-bijian tersebut tampak menggumpal. Penggumpalan yang tampak ini membentuk pola acak yang tidak teratur pada skala yang jauh lebih besar dibandingkan dengan ukuran butir individu.
2. Biji-bijian tidak hanya tampak menggumpal karena cara mereka didistribusikan dalam emulsi, tetapi biji-bijian tersebut mungkin benar-benar menggumpal (bahkan dalam kontak fisik) sebagai hasil dari pembuatan atau beberapa operasi pemrosesan.



Gambar 3.2 Kurva kerapatan butiran untuk film kecepatan sedang pada umumnya.

Sensasi ketidakseragaman pada gambar yang dihasilkan dalam kesadaran pengamat saat gambar dilihat disebut graininess. Ini adalah kuantitas subjektif dan harus diukur dengan menggunakan teknik psikofisik yang sesuai, seperti prosedur pembesaran campuran. Sampel dilihat pada berbagai tingkat perbesaran dan pengamat memilih perbesaran di mana struktur berbutir menjadi (atau tidak lagi) terlihat. Kebalikan dari 'faktor pembesaran campuran' ini adalah salah satu ukuran graininess. Graininess bervariasi dengan kerapatan rata-rata sampel. Untuk iluminasi sampel konstan, hubungan memiliki bentuk yang diilustrasikan pada Gambar 24.2. Nilai maksimum, sesuai dengan tingkat densitas sekitar 0,3, dikatakan sebagai hasil dari fakta bahwa sekitar setengah dari bidang ditempati oleh butiran perak buram dan setengahnya lagi jernih, seperti yang diharapkan secara intuitif. Pada densitas yang lebih tinggi, area gambar semakin tertutup oleh aglomerasi butiran dan, karena berkurangnya sharpness mata pada nilai lebih rendah dari field luminance yang dihasilkan, graininess menurun.



Gambar 3.3 Butir dalam negatif dan cetakan. Kiri: pembesaran negatif. Kanan: bidang cetakan yang sesuai.

Kami sejauh ini hanya mengacu pada butiran bahan negatif. Fitur yang menarik dalam fotografi bergambar kemungkinan besar adalah kualitas cetakan positif yang dibuat dari negatif itu. Jika tingkat pembesaran sedang digunakan, struktur butiran negatif menjadi terlihat dalam cetakan (butiran emulsi kertas itu sendiri tidak terlihat karena tidak diperbesar). Cetakan yang butiran negatifnya terlihat jelas secara umum kualitasnya tidak

dapat diterima. Meskipun ukuran graininess negatif telah berhasil digunakan sebagai indeks kualitas cetakan yang dibuat dari bahan negatif, graininess pada cetakan tidak hanya berhubungan dengan yang negatif, karena adanya pembalikan rona. Terlepas dari kenyataan bahwa butiran yang diukur dari sampel negatif berkurang dengan meningkatnya densitas melebihi densitas sekitar 0,3, fluktuasi mikrodensitas di seluruh sampel secara umum meningkat. Ini mengikuti dari peningkatan jumlah butir yang terlibat. Karena fluktuasi ini bertanggung jawab atas bintik-bintik cetakan yang dihasilkan, dan karena bagian negatif yang lebih padat sesuai dengan bagian cetakan yang lebih terang, kita dapat mengharapkan bintik-bintik cetakan yang relatif tinggi di area dengan warna terang dan tengah (butiran area sorotan adalah minimal karena kontras rendah dari bahan cetak di wilayah tonal ini). Hasil ini melengkapi respons yang diperkenalkan oleh variasi sharpness visual pengamat dengan pencahayaan cetak. Gambar 24.3 menunjukkan hubungan graininess antara sampel negatif dan positif.

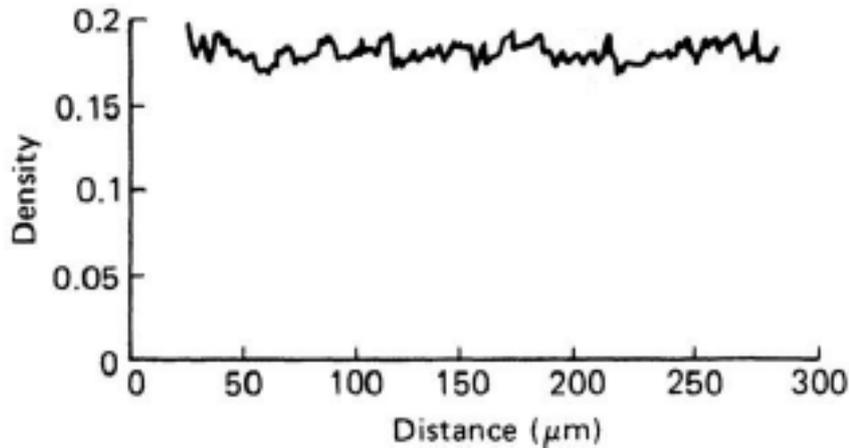
Jelas bahwa butiran cetak terutama merupakan fungsi dari fluktuasi mikrodensitas, atau perincian, negatif. Butiran dari negatif itu sendiri memiliki sedikit relevansi. Oleh karena itu, jika diperlukan pembesaran yang cukup besar, diinginkan untuk menjaga perincian negatif seminimal mungkin.

53.2. Faktor yang mempengaruhi bintik pada cetakan

1. Perincian negatif. Saat ini meningkat, bintik pada cetakan meningkat. Ini adalah faktor tunggal terpenting dan dibahas secara rinci di bagian selanjutnya.
2. Derajat pembesaran negatif.
3. Sistem optik yang digunakan untuk pencetakan dan tingkat kontras kertas yang dipilih.
4. Sharpness negatif. Semakin tajam gambar pada film, semakin besar detail dalam foto dan semakin sedikit graininess yang terlihat. Dapat dicatat di sini bahwa bintik biasanya paling terlihat di area warna tengah yang luas dan seragam di mana mata cenderung mencari detail.
5. Kondisi melihat hasil cetak.

53.3. Granularitas

Ini didefinisikan sebagai ukuran objektif dari ketidakhomogenan gambar fotografi, dan ditentukan dari variasi spasial dari kerapatan yang direkam dengan mikro densitometer (densitometer dengan apertur yang sangat kecil). Jejak granularitas khas ditunjukkan pada Gambar 24.4. Secara umum, distribusi sejumlah besar bacaan dari jejak tersebut (diambil pada interval lebih besar dari diameter aperture) kira-kira normal, sehingga deviasi standar, σ (sigma), dari deviasi densitas dapat digunakan untuk mendeskripsikan secara lengkap karakteristik amplitudo granularitas. Deviasi standar bervariasi dengan ukuran apertur (area A) yang digunakan. Untuk material yang terkena cahaya, hubungan $\sigma \sqrt{2A} = S$ (konstanta, disebut koefisien granularitas Selwyn - lihat nanti) berlaku dengan baik dan parameter S dapat digunakan sebagai ukuran granularitas.



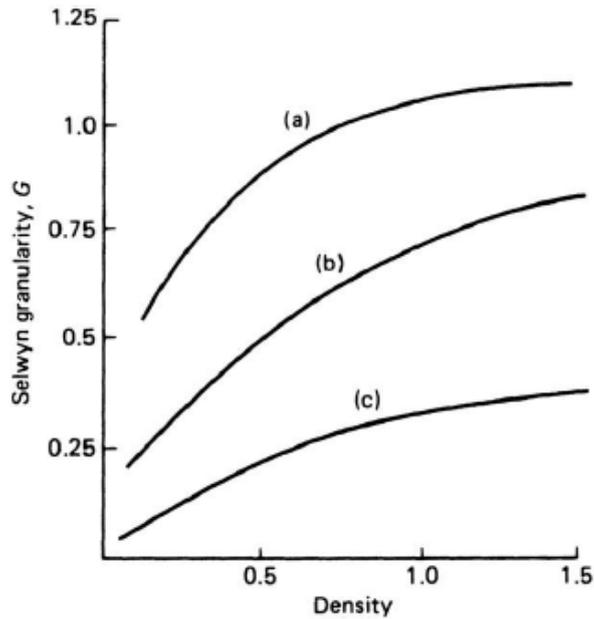
Gambar 24.4 Jejak granularitas untuk film kecepatan sedang, menggunakan apertur pemindaian 50 mm.

53.4. Faktor yang mempengaruhi granularitas negatif

Berikut ini adalah faktor terpenting yang memengaruhi perincian negatif:

1. Emulsi asli digunakan. Ini adalah faktor tunggal terpenting. Ukuran kristal rata-rata yang besar (yaitu film cepat) umumnya dikaitkan dengan granularitas tinggi. Ukuran kristal rata-rata kecil (yaitu film lambat) menghasilkan perincian yang rendah.
2. Solusi berkembang digunakan. Dengan menggunakan pengembang yang sangat halus, dimungkinkan untuk mendapatkan gambar di mana variasi densitas pada area mikroskopis agak berkurang.
3. Tingkat perkembangan. Karena granularitas adalah hasil dari variasi densitas pada area kecil, besarnya lebih besar pada gambar dengan kontras tinggi daripada pada gambar dengan kontras rendah. Namun demikian, meskipun negatif yang sangat lembut memiliki perincian yang lebih rendah daripada negatif ekivalen dari kontras normal, mereka membutuhkan kertas yang lebih keras untuk dicetak, dan cetakan akhir dari negatif semacam itu biasanya menunjukkan butiran yang mirip dengan cetakan yang dibuat dari negatif kontras normal.
4. Level eksposur, yaitu level densitas. Secara umum, granularitas meningkat dengan tingkat densitas. Hasil tipikal ditunjukkan pada Gambar 24.5. Hasil ini mengarah pada kesimpulan bahwa negatif overexposed menghasilkan cetakan dengan granularitas tinggi.

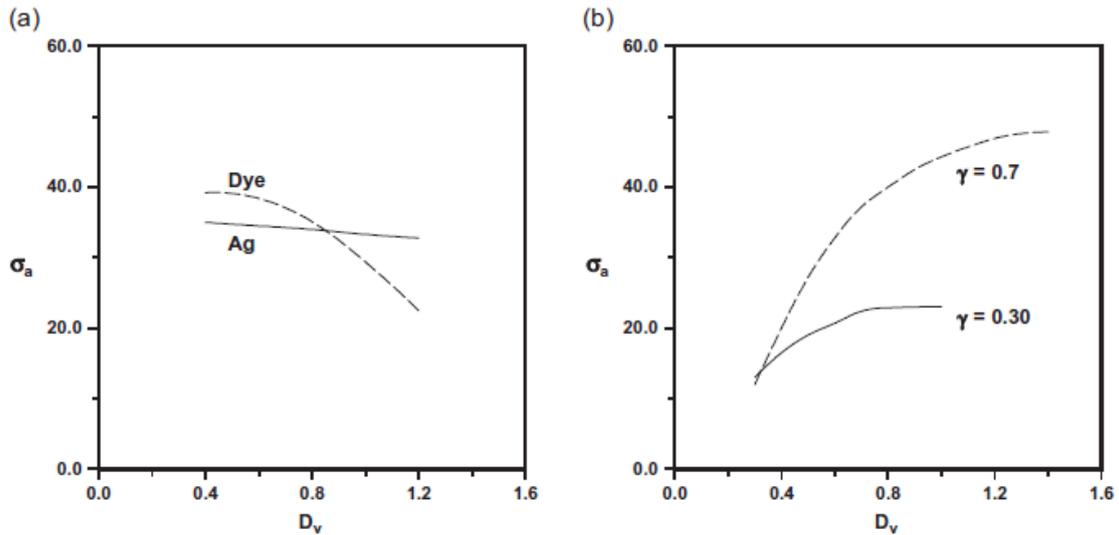
Dua faktor pertama terkait erat, karena seperti penggunaan emulsi cepat biasanya disertai dengan peningkatan granularitas, jadi penggunaan pengembang berbutir halus sering menyebabkan hilangnya kecepatan emulsi. Akibatnya, dapat ditemukan bahwa penggunaan film cepat dengan pengembang yang sangat halus tidak menawarkan keuntungan dalam kecepatan efektif atau perincian dibandingkan dengan film yang lebih lambat dan halus yang dikembangkan di pengembang normal. Nyatanya, dalam kasus seperti itu, film butiran halus akan menghasilkan fungsi transfer modulasi yang lebih baik dan daya penyelesaian yang lebih tinggi, dan sebagai konsekuensinya lebih disukai.



Gambar 3.5 Perincian sebagai fungsi kerapatan untuk film berkecepatan tinggi (a), sedang (b), dan lambat (c).

54. Variasi granularitas dengan densitas

Gambar 3.2 menunjukkan hubungan non-linier antara graininess dan kerapatan gambar untuk gambar perak yang khas, sedangkan Gambar 3.5 menghubungkan perincian Selwyn dengan kerapatan untuk film monokrom dengan kecepatan berbeda. Dalam setiap kasus gambar berwarna perak, dikembangkan dalam pengembang monokrom standar. Dalam beberapa produk komersial, emulsi monokrom mengandung penggandeng warna untuk menghasilkan gambar berwarna dalam pengembang warna, dan gambar perak diputihkan dalam prosesnya, meninggalkan gambar berwarna. Ini berperilaku berbeda dari gambar perak dan diilustrasikan pada Gambar 3.6a dan b. Pada Gambar 3.6a, granularitas gambar perak dibandingkan dengan gambar berwarna, juga dihasilkan oleh pengembang pembentuk berwarna yang digunakan kromogenik. Kedua kumpulan data perincian diplotkan terhadap densitas visual. gambar berwarna memberikan granularitas yang jauh lebih rendah pada kerapatan tinggi daripada pada kerapatan rendah, sedangkan gambar perak memiliki granularitas yang sedikit berkurang pada kerapatan tinggi. Produk ini biasanya diolah dalam kombinasi pemutih dan bak mandi setelah pengembangan, hanya menyisakan gambar berwarna dan memberikan kurva putus-putus pada Gambar 3.6 a. Di sisi lain, jika film diproses sebagai film monokrom konvensional, gambar perak saja diperoleh dan perilaku granularitas lebih konvensional (Gambar 3.6b). Perilaku ini penting: film negatif konvensional memberikan hasil yang lebih berbintik pada eksposur berlebih sementara negatif kromogenik memberikan gambar yang lebih sedikit berbintik. Ini berarti bahwa film negatif kromogenik dapat sangat terang, yaitu diberi peringkat pada ISO speed yang lebih rendah, memberikan granularitas yang lebih rendah yang terkait dengan film negatif konvensional dengan kecepatan yang lebih rendah tersebut. Film negatif kromogenik yang diformulasikan dengan hati-hati, menggunakan penggandeng warna khusus, dapat menghasilkan peningkatan sharpness serta penurunan butiran, bila dinilai pada ISO speed yang lebih rendah. Densitas gambar, bagaimanapun, akan lebih tinggi dari biasanya.



Gambar 3.6 Granularitas film negatif kromogenik, sebagai fungsi dari kerapatan visual, dikembangkan di: (a) pengembang warna untuk waktu yang disarankan dan diperbaiki, tetapi dengan gambar perak yang tidak dikelantang, perak dan pewarna diukur secara terpisah; (b) pengembang hitam-putih pada waktu memberikan nilai γ yang ditunjukkan. Geoffrey Attridge

55. Mengukur Noise Gambar

Metode untuk mengukur noise gambar disajikan di bagian berikut dalam hal proses pencitraan fotografi, di mana fluktuasi noise diukur dalam unit densitas (dilambangkan D). Metode ini dapat diterapkan secara umum pada sistem pencitraan lain di mana fluktuasinya mungkin, misalnya, nilai luminansi atau digital.

Meskipun kami berurusan dengan gambar dua dimensi, analisis noise biasanya membatasi ke satu dimensi spasial. Ini menyederhanakan metode dan sepenuhnya memadai untuk sebagian besar bentuk noise. Kita mulai dengan mengasumsikan kita memiliki bentuk gelombang noise $D(x)$ - variasi densitas output dalam satu arah di seluruh gambar sampel yang seragam secara nominal.

Variasi

This is the mean square noise, or the total noise power, dan berguna untuk meringkas variasi amplitudo dari fungsi acak (Gaussian). Ini didefinisikan sebagai:

Ekuasi 24.1

$$\sigma^2 = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2x} \int_{-x}^x \Delta D^2(x) dx$$

di mana $\Delta D(x)$ adalah deviasi $D(x)$ dari kerapatan rata-rata.

Estimasi σ^2

Eksresi varians, σ^2 , diganti dengan versi diskrit untuk tujuan penghitungan:

Ekuasi 24.2

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n \Delta D_i^2$$

ΔD_i adalah nilai deviasi yang diukur. Nilai N dicatat (di mana N adalah 'besar', misalnya 1000) menggunakan aperture pengukur area A . Perhatikan bahwa ini hanyalah rumus untuk sampel varians yang ditemukan dalam buku teks tentang statistik.

Hukum Selwyn

Studi granularitas fotografi menunjukkan bahwa, asalkan area aperture pemindaian A 'besar' dibandingkan dengan ukuran gumpalan butir, produk dari σ_A^2 dengan A adalah konstanta untuk sampel gangguan tertentu. Ini dikenal sebagai hukum Selwyn dan berarti bahwa σ_A^2 tidak bergantung pada nilai A . Oleh karena itu σ_A^2 dapat digunakan sebagai ukuran noise gambar (granularitas). Tindakan lainnya termasuk $\sqrt[4]{A}$ dan $\sqrt[3]{A}$. Ekspresi terakhir ini dikenal sebagai granularitas Selwyn. Ini sering ditulis sebagai:

Ekuasi 24.3

$$S = \sqrt[4]{2A}$$

dimana S adalah ukuran granularitas.

Meskipun σ atau σ^2 dapat digunakan untuk menggambarkan karakteristik amplitudo dari gangguan fotografis, pendekatan yang lebih informatif untuk analisis derau dimungkinkan dengan menggunakan metode yang secara rutin digunakan dalam teori komunikasi. Selain informasi amplitudo, metode ini juga memberikan informasi tentang struktur spasial noise.

Fungsi Autokorelasi

Alih-alih mengevaluasi deviasi densitas kuadrat rata-rata dari jejak noise, mean produk dari deviasi densitas pada posisi yang dipisahkan oleh jarak τ (tau) diukur untuk berbagai nilai τ . Hasilnya, diplot sebagai fungsi τ , umumnya dikenal sebagai fungsi autokorelasi $C(\tau)$. Ini didefinisikan secara matematis sebagai:

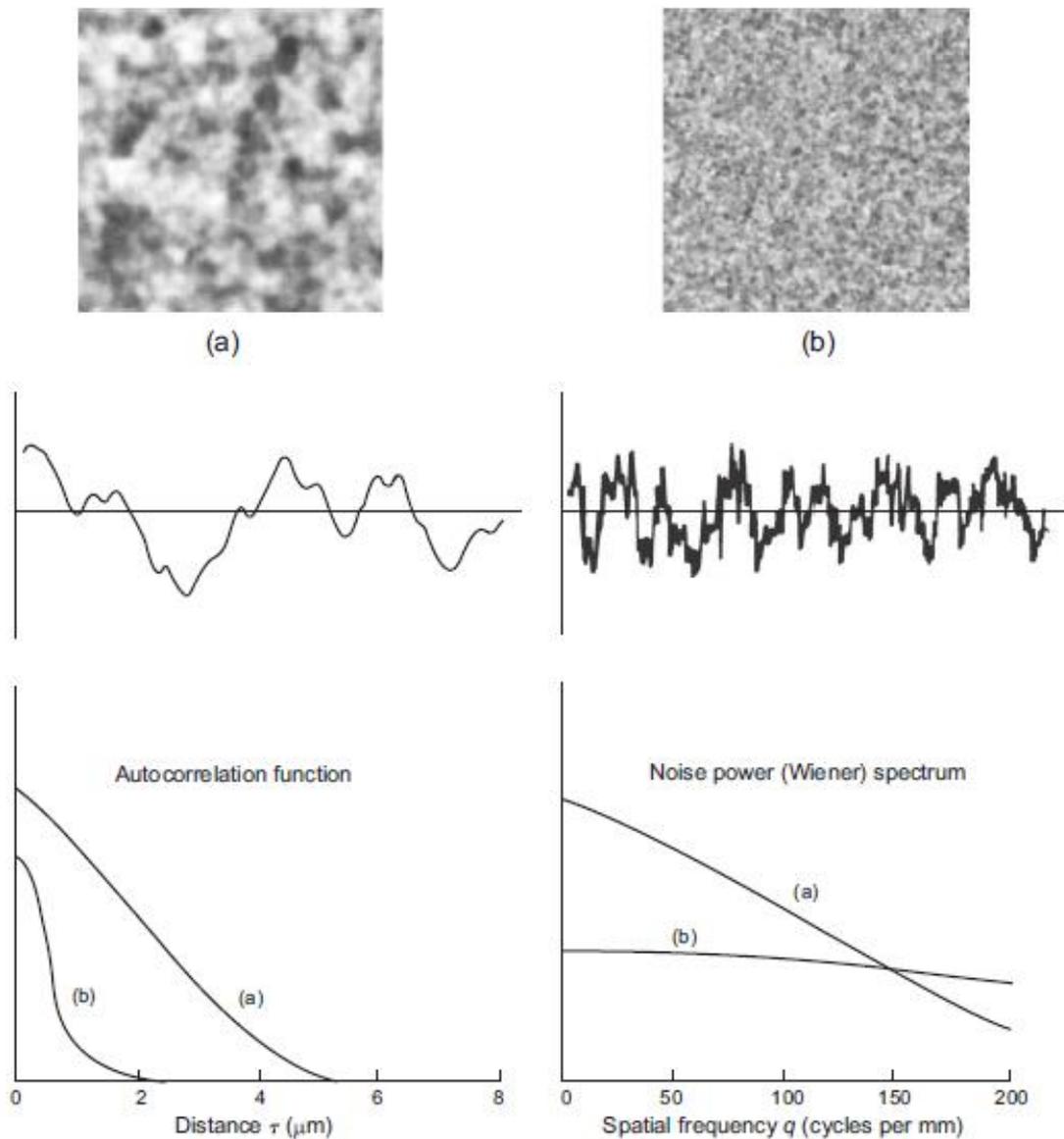
Ekuasi 24.4

$$C(\tau) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2x} \int_{-x}^x \Delta D(x) \Delta D(x + \tau) dx$$

Ini termasuk ukuran deviasi densitas kuadrat rata-rata ($\tau = 0$) tetapi, yang sama pentingnya, berisi informasi tentang struktur spasial jejak granularitas. Secara ketat, Ekuasi 24.4 memberikan autokovarian sinyal dan harus dinormalisasi oleh varians untuk menghasilkan fungsi autokorelasi. Bidang pencitraan biasanya menggunakan fungsi autokorelasi dan kami akan tetap menggunakan konvensi ini, tetapi pembaca harus menyadari perbedaannya.

Pentingnya fungsi ini diilustrasikan pada Gambar 24.7, di mana pemindaian pada dua gambar foto yang berbeda (sangat diperbesar) ditampilkan. Jejak granularitas, yang dihasilkan dengan menggunakan celah tipis yang panjang, memiliki karakteristik yang jelas terkait dengan rata-rata ukuran gumpalan butiran pada citra. Jejaknya acak, jadi

untuk mengekstrak informasi ini digunakan fungsi autokorelasi. Dua fungsi korelasi otomatis yang ditampilkan meringkas struktur dua jejak, dan oleh karena itu dapat digunakan untuk mendeskripsikan struktur acak yang mendasari gambar. Struktur butir yang lebih besar umumnya akan menghasilkan fungsi autokorelasi yang meluas lebih jauh, sedangkan butir yang lebih halus akan menyebabkan fungsi autokorelasi turun lebih cepat.



Gambar 3.7 Fungsi autokorelasi dan spektrum daya noise (Wiener) untuk dua struktur gambar yang berbeda: (a) butiran kasar; (b) butiran halus.

56. Spektrum Daya Noise

Fungsi korelasi otomatis terkait secara matematis (melalui transformasi Fourier) ke fungsi lain yang sangat penting dalam analisis derau, Wiener atau spektrum daya. Fungsi ini dapat diperoleh dari analisis frekuensi jejak granularitas asli, dan mengekspresikan karakteristik noise dalam komponen frekuensi spasial.

Definisi praktis dari spektrum daya noise adalah:

Ekuasi 24.5

$$N(u) = \left| \frac{1}{x} \int_0^x \Delta D(x) e^{-2\pi i u x} dx \right|$$

Ini pada dasarnya adalah modulus kuadrat dari transformasi Fourier (lihat Bab 7) dari penyimpangan massa jenis, dibagi dengan julat integrasi, x . Secara formal, spektrum daya derau mewakili daya derau per satuan bandwidth yang diplotkan terhadap frekuensi spasial. Penting untuk dicatat bahwa dalam praktiknya Ekuasi 24.5 tidak menyatu karena panjang datal yang digunakan lebih panjang. Ini karena bandwidth setiap titik pengukuran menjadi lebih kecil dan kesalahan statistik yang terkait dengan pengukuran proses acak (noise) tetap ada. Untuk mengatasi masalah ini, data umumnya dibagi menjadi beberapa panjang yang lebih kecil, Ekuasi 24.5 diterapkan dan hasil rata-rata ensemble diambil untuk menghasilkan perkiraan spektrum daya noise (lihat komentar selanjutnya di bagian ‘Transformasi Fourier Langsung sampel noise’).

Spektrum daya dari dua jejak granularitas juga ditunjukkan pada Gambar 24.7. Akan terlihat bahwa tren dalam bentuk berlawanan, atau timbal balik, dengan fungsi autokorelasi. Gambar berbutir halus memiliki spektrum yang cukup datar, meluas ke frekuensi spasial yang cukup tinggi. Hal ini mencerminkan fakta bahwa jejak granularitas mengandung fluktuasi yang bervariasi dengan cepat, dibandingkan dengan sampel yang terurai di mana fluktuasi sebagian besar frekuensinya rendah.

57. Hubungan antara ukuran noise

Untuk jejak noise tertentu, tiga ukuran yang dibahas di atas terkait sebagai berikut:

Ekuasi 24.6

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} N(u) du \text{ dan } N(u) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-2\pi i u \tau} d\tau$$

- variansnya adalah area di bawah spektrum daya derau;
- spektrum daya noise adalah transformasi Fourier dari fungsi autokorelasi.

Meskipun spektrum daya noise dan fungsi autokorelasi terkait erat (satu dapat dihitung dari yang lain), keduanya memiliki peran yang sangat berbeda dalam evaluasi citra. Fungsi autokorelasi berhubungan baik dengan penyebab noise gambar, sedangkan spektrum daya penting dalam menilai efeknya.

Dalam semua hal di atas, versi dua dimensi yang setara dari definisi dan hubungan ada untuk kasus yang lebih umum dari ‘bidang ‘ noise gambar dua dimensi.

58. Pertimbangan praktis untuk fungsi autokorelasi dan spektrum daya noise

Dalam praktiknya, noise gambar diambil sampelnya baik secara intrinsik seperti dalam kasus sistem digital atau mengikuti beberapa pemindaian eksternal seperti dalam evaluasi gambar fotografi.

Ekspresi untuk fungsi autokorelasi dan spektrum daya yang dijelaskan di bagian sebelumnya memiliki ekuasi diskrit untuk tujuan perhitungan. Untuk menggunakannya, teorema pengambilan sampel harus dipatuhi agar hasil tidak terdistorsi oleh aliasing.

Bidang noise (yaitu gambar dua dimensi yang mengandung noise saja) dipindai dan diambil sampelnya menggunakan celah tipis panjang untuk menghasilkan jejak satu dimensi untuk analisis. Dalam kasus gangguan fotografi, ini adalah proses pemindaian optik dan biasanya menggunakan celah dengan lebar 2-4 μm . Interval pengambilan sampel δx harus dipilih untuk menghindari aliasing (dijelaskan dalam Bab 7), yaitu

Ekuasi 24.7

$$\frac{1}{2\delta x} \geq u_c$$

di mana u_c adalah frekuensi signifikan maksimum yang dikandung oleh noise. Dalam kasus fotografi, u_c kemungkinan besar akan ditentukan oleh MTF celah pemindaian (lihat Bab 7). Ini berarti bahwa interval pengambilan sampel δx mungkin harus sekecil 1-2 μm .

Untuk sistem gambar digital, filosofinya sedikit berbeda. Apa pun sumber derau dalam gambar digital (lihat sumber derau elektronik nanti di bab ini), ia hanya dapat berisi frekuensi hingga frekuensi Nyquist (didefinisikan dengan pemisahan piksel). Untuk mengevaluasi derau dalam arah x dan hingga frekuensi Nyquist untuk gambar virtual ini, kolom data dirata-ratakan untuk menghasilkan jejak derau satu dimensi. Untuk mengatasi gangguan dalam arah y, baris data dirata-ratakan.

Jumlah N sampel noise yang digunakan harus besar (misalnya 10.000) untuk mendapatkan tingkat akurasi yang wajar. Dalam kasus fotografi, diperlukan jarak pemindaian 10-20 mm untuk mencapai ini. Untuk sistem digital, banyak frame yang mengandung noise perlu dievaluasi.

59. Penggunaan Fungsi Autokorelasi

Titik pertama ($n/2 + 1$) dari fungsi autokorelasi (ini termasuk $\tau = 0$) dihitung dengan menggunakan:

Ekuasi 24.8

$$C'_j = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} \Delta D_i \Delta D_{i+j}, j = 0, 1, 2 \dots n/2$$

dimana n dipilih menggunakan teorema sampling:

Ekuasi 24.9

$$\frac{1}{n\delta x} = \delta u$$

di mana δu adalah bandwidth yang diperlukan untuk pengukuran (yaitu interval sepanjang sumbu frekuensi spasial di mana nilai spektrum daya noise diperlukan).

Transformasi Fourier dari nilai n fungsi autokorelasi (simetris) menghasilkan spektrum daya derau. Untuk memastikan nilai spektrum benar mewakili kekuatan dalam gambar dua dimensi asli, fungsi harus diskalakan ulang sebagai berikut:

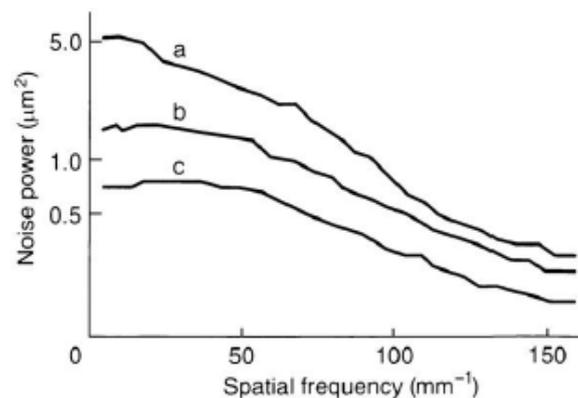
- Tentukan varians, σ_A^2 , saat noise field dipindai dengan aperture ‘besar’ di area A (yaitu besar dibandingkan dengan lebar celah di atas). Dalam kasus fotografi, ini mungkin ukuran apertur $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. Dalam kasus gambar digital itu akan menjadi tiruan yang setara.
- Bentuk kuantitas $A\sigma_A^2$. Ini adalah nilai spektrum daya derau yang diperlukan di tempat asal, mis.

Ekuasi 24.10

$$N(0) = A\sigma_A^2$$

60. Transformasi Fourier langsung dari sampel noise

Nilai-nilai N dari noise adalah Fourier yang ditransformasikan secara langsung. Hasil modulus kuadrat adalah spektrum daya derau. Karena Ekuasi 24.9, ini akan memiliki bandwidth yang sangat sempit.



Gambar 3.8 Spektrum daya noise untuk lapisan tunggal yang dikembangkan dari penggendeng silver halida/cyan dengan peningkatan konsentrasi penggendeng DIR (aec). Kurva digambar ulang dari Graves, H.M., Saunders, A.E. (1984). Spektrum daya bising dari film negatif warna dengan penggendeng yang digabungkan. Makalah dipresentasikan pada RPS Symposium on Photographic and Electronic Image Quality, Cambridge, September

Dengan kata lain, spektrum ditentukan pada interval yang sangat dekat di sepanjang sumbu frekuensi spasial. Karena noise adalah non-deterministik (rata-rata sampel yang berurutan tidak bertemu dengan jejak noise yang ‘benar’), setiap titik yang dihitung dalam spektrum memiliki kesalahan yang tinggi, yang tidak berkurang saat sampel noise diperpanjang. Untuk mendapatkan perkiraan spektrum yang masuk akal, blok nilai spektrum yang berdekatan dirata-ratakan untuk meningkatkan bandwidth efektif dan mengurangi kesalahan per titik (ini dikenal sebagai rata-rata pita). Spektrum daya noise yang dihasilkan harus diskalakan seperti yang dijelaskan di paragraf sebelumnya.

Gambar 3.8 menunjukkan spektrum daya noise untuk pelapis lapisan tunggal yang dikembangkan dari penggendeng silver halida/cyan dengan peningkatan konsentrasi penggendeng DIR. Spektrum daya noise diukur dengan mikrodensitometer yang dilengkapi dengan filter merah. Interval pengambilan sampel dx adalah 3 mm, memberikan frekuensi

Nyquist $167 \mu\text{m}^{-1}$. Celah dengan lebar $4 \mu\text{m}$ digunakan untuk memasok filtrasi low-pass optik untuk menghindari aliasing frekuensi tinggi yang tidak diinginkan ke wilayah yang diinginkan. Ukuran sampel $N = 40.960$ memberikan bandwidth pengukuran $\delta u = 8.14 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-1}$.

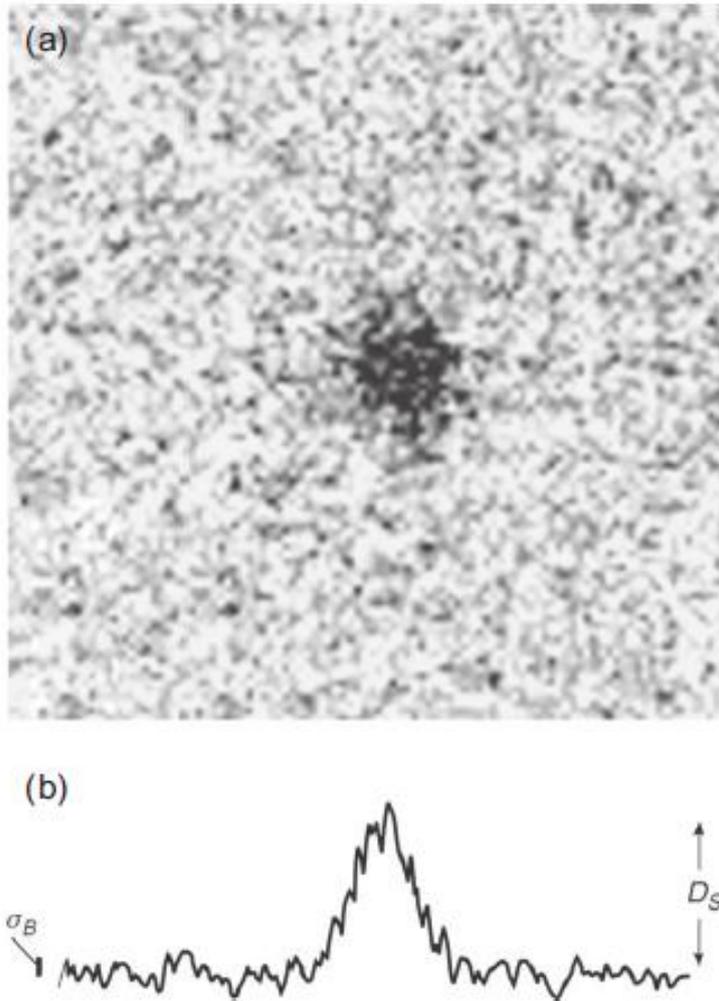
Balok yang kira-kira 600 titik dirata-ratakan untuk menghasilkan kurva akhir, yang memiliki lebar pita efektif $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$. Perlu dicatat bahwa beberapa aliasing mungkin telah terjadi.

Jika nilai noise tidak berkorelasi, spektrum daya noise akan konstan di semua frekuensi (‘white noise’). Tidak ada gunanya mengevaluasi spektrum. Semua yang dibutuhkan adalah nilai $A\sigma_A^2$.

61. Rasio Signal-to-noise

Dalam teori komunikasi, designal-to-noise ratio (S/N) adalah rasio informasi yang membawa sinyal ke noise yang cenderung mengaburkan sinyal tersebut. Dalam kasus gambar, sinyal adalah beberapa ukuran amplitudo, atau kontras, dari struktur gambar yang diinginkan. Noise adalah ukuran yang setara dari fluktuasi yang tidak diinginkan, biasanya acak, dan ditumpangkan.

Ukuran tertentu dari sinyal dan noise yang digunakan akan bergantung pada jenis gambar dan aplikasinya. Contoh sederhana diperoleh dari bidang perekaman gambar astronomi. Gambar 24.9a menunjukkan gambar bintang berupa disk dengan luas $A \mu\text{m}^2$ yang ditumpangkan pada background yang bising. Jika kita membayangkan memindai seluruh gambar dengan aperture dengan ukuran yang sama seperti gambar bintang, kita akan menghasilkan jejak bentuk yang ditunjukkan pada Gambar 24.9b. Defleksi maksimum, terekam ketika apertur hanya berada di atas gambar bintang, ditampilkan sebagai kekuatan sinyal, DS. Deviasi standar dari fluktuasi latar belakang, σ_B , memberikan ukuran noise yang sesuai. Rasio signal-to-noise didefinisikan sebagai:



Gambar 3.9 (a) Gambar bintang (disk lingkaran). (b) Jejak melintasi gambar, direkam dengan apertur pemindaian yang berukuran sama dengan bintang.

Ekuasi 24.11

$$\frac{S}{N} = \frac{D_s}{\sigma_B}$$

atau gambar yang lebih umum, terutama dalam bentuk digital, rasio signal-to-noise dapat dihitung dengan mengevaluasi varian total gambar σ_T^2 dan varian σ_N^2 dari bagian gambar yang seragam secara nominal (noise). Varians sinyal kemudian perbedaan $\sigma_T^2 - \sigma_N^2$ (dengan asumsi noise tidak berkorelasi dengan sinyal). Rasio signal-to-noise kemudian:

Ekuasi 24.12

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{\sigma_T^2 - \sigma_N^2}{\sigma_N^2}} = \sqrt{\frac{\sigma_T^2}{\sigma_N^2}}$$

Perlakuan yang lebih ketat terhadap signal-to-noise diberikan dengan memanfaatkan ide-ide teori Fourier. Sinyal dianggap sebagai satu set frekuensi spasial yang ditentukan

oleh MTF dari sistem pembentuk citra. Noise diwakili oleh spektrum daya noise gambar. Rasio signal-to-noise kemudian bergantung pada MTF sistem yang 'melihat' gambar. Dimana sistem penglihatan adalah pengamat manusia spektrum daya noise sering disajikan dalam bentuk kurva ambang modulasi. Ini menampilkan modulasi minimum yang diperlukan untuk sinyal sinusoid agar terlihat di atas noise, sebagai fungsi frekuensi spasial. Ekspresi untuk kualitas gambar yang dirasakan kemudian dapat dikonstruksi.

62. Noise Sistem Elektronik

Noise mungkin merupakan salah satu batasan terpenting yang memengaruhi sistem pencitraan apa pun, dan ini tidak berbeda untuk sensor CCD dan CMOS di kamera digital. Seringkali terdapat kesalahpahaman bahwa karena outputnya digital maka lebih akurat, atau tidak terkena noise dengan cara yang sama seperti pada perangkat analog. Langkah-langkah dan teknik yang dijelaskan di seluruh bab ini sama-sama dapat diterapkan pada sensor film dan gambar digital - perbedaan yang jelas adalah bahwa bekerja dengan emulsi fotografi harus mendigitalkan respons sebelum analisis dapat dilakukan.

Dengan cara yang mirip dengan emulsi fotografis, sensor gambar digital memiliki sumber derau yang unik, beberapa di antaranya dijelaskan di bawah ini.

Suara tembakan foton. Detektor yang sempurna akan tunduk pada batasan cahaya yang jatuh di atasnya. Seperti yang disebutkan sebelumnya, cahaya secara acak masuk ke sensor dan pada suatu saat akan ada penyimpangan acak dari tingkat rata-rata. Seperti yang diberikan di atas, varians dari patch seragam nominal yang mengandung kuantitas N akan diberikan oleh \sqrt{N} . Sinyal-ke-derau dari eksposur yang diidealkan kemudian akan menjadi:

Ekuasi 24.13

$$\frac{S}{N} = \frac{N}{\sqrt{N}} = \sqrt{N}$$

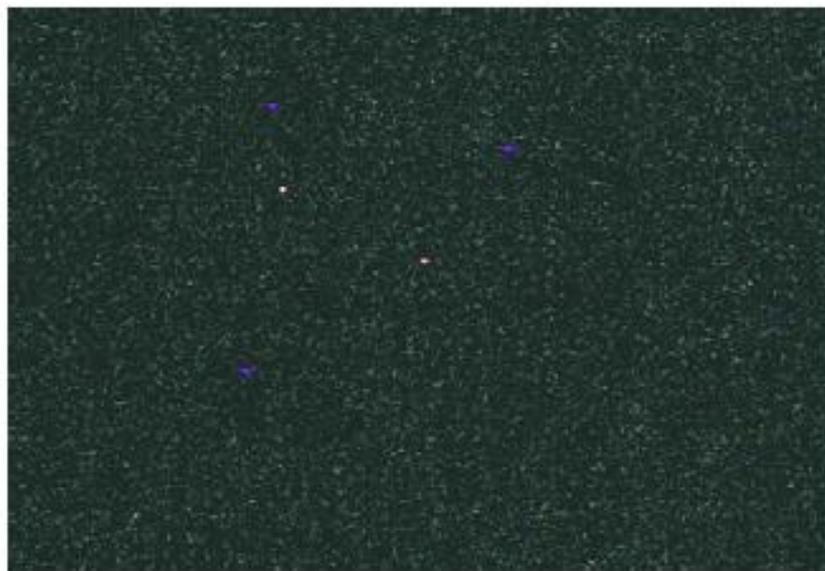
Jadi, eksposur sempurna dari 7000 quanta akan memiliki S/N atau kira-kira $\sqrt{7000} \approx 84:1$:

Arus gelap atau noise yang dihasilkan secara termal. Ini adalah keluaran yang terjadi tanpa masukan. Hal ini disebabkan oleh pembentukan termal pasangan lubang listrik dan difusi muatan dan dapat dikurangi dengan mendinginkan perangkat. Arus gelap menunjukkan fluktuasi, mirip dengan noise bidikan, jadi sementara nilai rata-rata arus gelap dapat dikurangkan dari output untuk memberikan sinyal karena photoelectron, noise tidak bisa. Disebut keseragaman arus gelap, laju generasi arus gelap juga akan bervariasi dari piksel ke piksel. Aturan praktisnya adalah bahwa arus gelap kira-kira dua kali lipat untuk setiap kenaikan suhu 8°C . Oleh karena itu, pendinginan menggunakan nitrogen cair atau perangkat Peltier dapat mengurangi hal ini secara signifikan.

Noise pembacaan. Ini terjadi ketika sinyal menegosiasikan sirkuit pembacaan yang diperlukan untuk mengubahnya dari sinyal analog menjadi nilai digital. Ini kadang-kadang dikombinasikan dengan suara amplifikasi dan kuantisasi. Perlu dicatat, bagaimanapun, bahwa bahkan jika amplifikasi dan kuantisasi sempurna, beberapa gangguan pembacaan akan tetap ada. Hal ini disebabkan variasi halus dalam menangani sirkuit dan kabel, dan penambahan sinyal acak yang tidak diinginkan, dan tidak terkait dengan level eksposur.

Cacat. Sementara piksel yang berfungsi mungkin menunjukkan PRNU, piksel yang rusak tidak secara efektif mendeteksi sinyal. Piksel panas tersaturasi dengan sangat cepat, menghasilkan keluaran maksimum apa pun sinyal masukannya. Piksel gelap atau mati tidak merespons cahaya. Sebagian besar sensor menggabungkan deteksi dan koreksi cacat, menggantikan nilai cacat dengan yang diinterpolasi dari piksel sekitarnya. Jika sensor memiliki memori on-board yang mencukupi, peta cacat dapat dibuat untuk menyimpan lokasi. INCCD, piksel yang rusak juga dapat bertindak sebagai perangkap dan menghambat transfer sinyal. Lebih serius lagi, seluruh kolom, baris, dan area yang lebih luas dapat terpengaruh.

Noise pola tetap. Seperti namanya, ini adalah noise yang konsisten dari frame ke frame. Ini dapat mencakup derau dari banyak efek dan seringkali cacat disertakan dalam deskripsi. Sedikit variasi dalam filter Bayer, debu dan proses manufaktur semuanya dapat berkontribusi pada efek tersebut (Gambar 24.10).



Gambar 3.10 Contoh diperbesar dari gangguan pola tetap dan piksel cacat dari kamera foto digital komersial. Kontras telah ditingkatkan untuk membuat noise lebih jelas.

Sinyal jam dan gangguan lainnya. Khususnya dalam kasus CCD, membaca gambar sehingga mungkin menjadi keluaran dari sensor membutuhkan waktu yang akurat. Sinyal yang dihasilkan dari jam terkadang dapat mengganggu gambar. Gangguan dari perangkat listrik lain, seperti motor, dan pelepasan muatan statis juga dapat memengaruhi sinyal. Efek ini akan akrab dengan pengguna bor listrik.

Noise amplifikasi. Ini adalah kombinasi dari dua sumber, derau putih dan kedipan, dan bergantung pada laju sampel. Derau putih umumnya terjadi pada laju sampel yang lebih tinggi sedangkan kedipan, terkadang dikenal sebagai derau $1/f$, terjadi pada laju yang lebih rendah. Karena sensor CMOS umumnya memiliki amplifikasi tambahan pada piksel, ini bisa menjadi sumber atau variasi antar piksel.

Setel ulang noise. Sebelum integrasi muatan untuk eksposur berikutnya, elemen foto diatur ulang ke tegangan referensi. Setiap kali fotodiode di-reset ada sedikit variasi yang ditambahkan ke dalam sinyal.

Pixel response non-uniformity (PRNU). Setiap piksel akan menunjukkan sedikit variasi dalam kepekaan terhadap eksposur yang seragam. Hal ini disebabkan variasi alami dalam proses pembuatan. Mengekspos sensor ke sumber yang seragam akan membuat bidang datar yang dapat digunakan untuk mengoreksi gambar.

Sinyal jam dan gangguan lainnya. Khususnya dalam kasus CCD, membaca gambar sehingga mungkin menjadi keluaran dari sensor membutuhkan waktu yang akurat. Sinyal yang dihasilkan dari jam terkadang dapat mengganggu gambar. Gangguan dari perangkat listrik lain, seperti motor, dan pelepasan muatan statis juga dapat memengaruhi sinyal. Efek ini akan akrab dengan pengguna bor listrik.

Perlu dicatat bahwa karena sejumlah alasan, noise tidak harus seragam di seluruh bidang pandang sensor tertentu. Efisiensi transfer muatan telah disebutkan di Bab 9. Sinyal dari piksel-piksel yang paling jauh dari konverter analog-ke-digital (ADC), sehingga membutuhkan lebih banyak transfer, akan mengalami lebih banyak kehilangan transfer muatan, oleh karena itu menciptakan satu sumber asimetri. Selain itu, Bab 9 merinci penggunaan filter inframerah, yang frekuensi pemutusannya bergantung pada sudut dalam cahaya yang masuk. Hal ini menyebabkan turunnya saluran merah ke arah tepi bidang pandang. Vinyet lensa dan hukum \cos^4 (Bab 6) selanjutnya menyebabkan sinyal berkurang untuk semua saluran (Gambar 24.11). Metode umum untuk mengoreksi hal ini adalah dengan menggunakan koreksi lapangan. Dengan memaparkan ke cahaya yang seragam, penurunan relatif untuk setiap saluran dapat diamati dan dikoreksi menggunakan invers. Ini akan memiliki efek memperkuat sinyal lebih banyak di tepi bidang pandang sensor, secara efektif meningkatkan noise dan mengurangi dynamic range di area ini.

Dengan asumsi sumber noise tidak berkorelasi, noise sistem total σ_{SYS} dapat diperoleh dengan menambahkan bersama-sama kekuatan noise individu. Ini mensyaratkan bahwa semua sumber noise ditentukan dalam unit keluaran yang setara (misalnya elektron atau volt). Sebagai contoh:

Ekuasi 24.14

$$\sigma_{SYS}^2 = \sigma_{DARK}^2 + \sigma_{PATTERN}^2 + \sigma_{READOUT}^2 + \sigma_{ADC}^2$$

di mana σ_{DARK} = arus gelap, $\sigma_{PATTERN}$ = gangguan pola tetap, $\sigma_{READOUT}$ = gangguan reset (dari pembacaan muatan) dan gangguan penguat, dan σ_{ADC} = derau kuantisasi yang dihasilkan oleh konversi analog-ke-digital, seperti yang dijelaskan di Bab 9.

Selain itu noise pada keluaran σ_{TOT} akan menyertakan kontribusi derau foton masukan σ_q sehingga:

Ekuasi 24.15

$$\sigma_{TOT}^2 = \sigma_{SYS}^2 + \sigma_q^2 \text{ (terekspresikan dalam output unit)}$$



Gambar 3.11 Contoh vignet lensa dari kamera foto digital yang tersedia secara komersial. Kontras telah ditingkatkan untuk membuat vinyet lebih jelas.

63. Resolusi, Sharpness dan MTF

Resolusi, sharpness, dan MTF semuanya terkait dengan properti gambar mikro (spasial) dari suatu sistem, tetapi keduanya tidak setara dan tidak dapat digunakan secara bergantian, seperti yang sering salah. Resolusi menggambarkan detail sarang yang dapat direkam (atau direproduksi) oleh sistem dan bergantung pada elemen pencitraan dasar (fungsi penyebaran titik, PSF), sedangkan sharpness pada dasarnya menggambarkan perekaman tepi, atau transisi, dan tergantung pada kemampuan sistem untuk mereproduksi kontras, terutama pada frekuensi spasial tinggi (lihat juga Bab 19). Gambar 24.12a menunjukkan gambar dengan resolusi tinggi tetapi sharpness rendah dan Gambar 24.12b merupakan gambar dengan resolusi rendah dan sharpness tinggi.

Saat gambar ditampilkan kepada penonton, kesan subjektif dari sharpness dan resolusi akan sangat bergantung pada kondisi tampilan dan konteks di mana gambar tersebut ditampilkan. Oleh karena itu, meskipun resolusi tinggi atau gambar yang tajam mungkin menyarankan perekaman frekuensi spasial tinggi yang lebih akurat, pengertian frekuensi spasial tinggi bersifat relatif. Selain itu, tergantung pada level yang ada, noise gambar dapat menutupi, atau dalam beberapa kasus meningkatkan, kesan subjektif dari sharpness dan detail.

64. Kekuatan resolving (penyelesaian) sistem fotografi

Sebuah contoh yang baik dari keputusan berbasis signal-to-noise diilustrasikan oleh ukuran tradisional dari kekuatan penyelesaian fotografis. Secara umum, kekuatan penyelesaian mengukur kemampuan perekaman detail dari sistem, yaitu ukuran resolusi yang objektif. Dalam sistem fotografi berbasis perak, hal ini ditentukan dengan memotret objek uji yang berisi urutan bar array yang identik secara geometris dengan berbagai ukuran, dan ukuran terkecil dalam negatif foto, yang orientasinya dapat dikenali oleh mata di bawah perbesaran yang sesuai, diperkirakan. Frekuensi spasial dari bar array ini, dalam

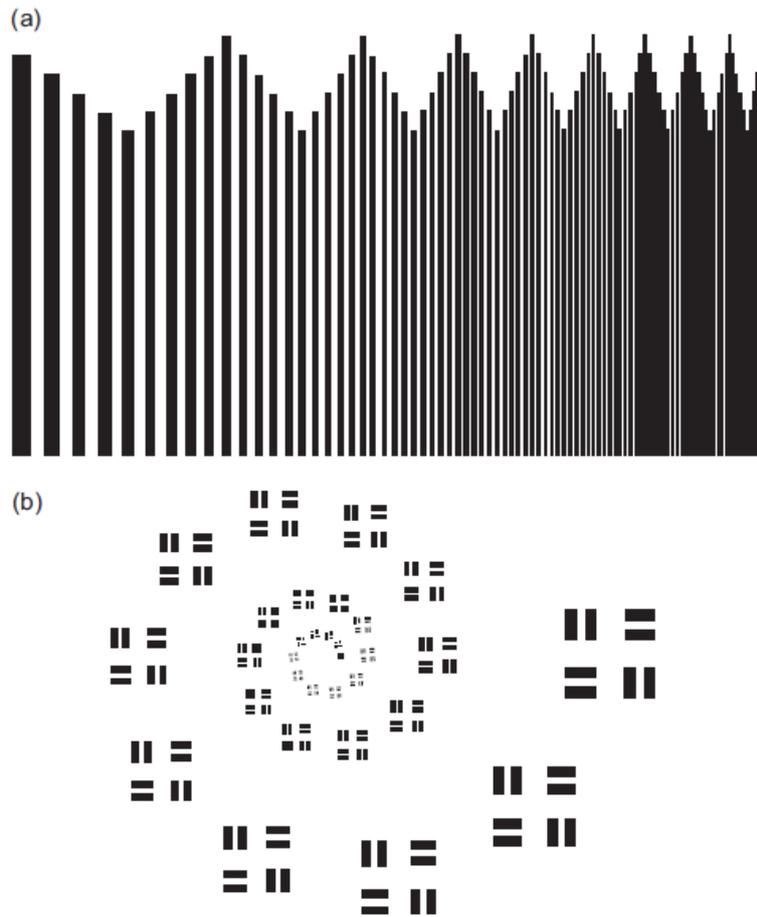
pasangan garis permillimetre, apakah ada daya pemecahan. Gambar 24.13 menunjukkan beberapa objek uji yang khas.

Objek uji dicitrakan ke film yang diuji baik dengan pencetakan kontak atau, biasanya, dengan menggunakan peralatan pencitraan optik yang berisi lensa dengan kualitas sangat tinggi. Sebuah mikroskop digunakan untuk memeriksa negatif yang dikembangkan. Perkiraan daya penyelesaian yang diperoleh dipengaruhi oleh setiap tahap sistem lensa/fotografi/mikroskopis/visual secara lengkap, dan melibatkan masalah pendeteksian jenis sinyal tertentu dalam noise gambar. Namun, asalkan keseluruhan sistem dirancang dengan tepat, properti pencitraan dari tahap fotografi sejauh ini adalah yang terburuk, dan ada yang dibenarkan untuk mengkarakterisasi tahap ini dengan ukuran kekuatan penyelesaian yang diperoleh.



Gambar 3.12 Sebuah gambar dengan resolusi tinggi tetapi sharpness rendah (a), dan resolusi rendah dan sharpness tinggi (b).

Karena sifat signal-to-noise dari resolving power, nilainya untuk film tertentu adalah fungsi dari kekeruhan lapisan sensitif, kontras (rasio luminansi) dan desain benda uji, dan gamma dan graininess dari negatif terakhir. Ini dipengaruhi oleh jenis pengembang, tingkat perkembangan dan warna cahaya yang terpapar, dan sangat bergantung pada tingkat pencahayaan. Gambar 24.14 menunjukkan pengaruh kontras objek uji dan tingkat eksposur pada daya pisah bahan negatif kecepatan sedang yang khas.



Gambar 3.13 Grafik uji resolving-power tipikal. (a) Bagin Sayce. (b) Diagram Cobb.

Manfaat utama dari resolving power sebagai kriteria kualitas gambar spasial terletak pada kesederhanaan konseptualnya, dengan mempertimbangkan beberapa properti yang lebih mendasar dari sistem, termasuk MTF emulsi dan optik, spektrum daya noise dari gambar yang dikembangkan, dan kualitas dan keterbatasan sistem visual manusia. Diperlukan peralatan yang sangat sederhana dan bacaan yang diperlukan mudah diperoleh. Meskipun ini bukan ukuran kualitas gambar, daya pisah telah banyak digunakan sebagai indikator kemampuan bahan fotografi dalam mereproduksi struktur gambar yang halus. Namun, penting untuk dicatat bahwa pengukuran daya penyelesaian, tidak seperti pengukuran MTF (lihat Bab 7 dan selanjutnya dalam bab ini), tidak dapat dialirkan melalui komponen pencitraan dari suatu rantai, yaitu daya penyelesaian rantai tidak dapat dihitung dari kekuatan menyelesaikan masing-masing komponen pencitraan.

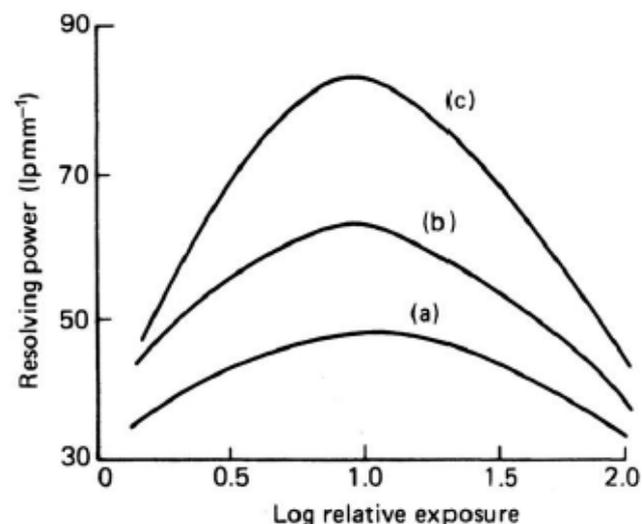
65. Mengukur fungsi transfer modulasi

MTF, yang diperkenalkan di Bab 7, bila digabungkan dengan pengukuran daya derau, memberikan lebih banyak informasi mengenai respons sistem pencitraan daripada daya penyelesaian sendiri. Namun demikian, ada peningkatan terkait dalam kesulitan implementasi dan interpretasi hasil. Kecanggihan pengaturan eksperimental yang dibutuhkan umumnya akan lebih tinggi dan lebih banyak langkah pemrosesan perlu diselesaikan dengan volume data yang lebih tinggi sebelum hasilnya tersedia. Pembaca didorong untuk mengidentifikasi penggunaan akhir dari informasi yang diturunkan untuk

membantu keputusan mengenai metodologi evaluasi sistem pencitraan mana yang terbaik untuk digunakan.

Untuk mengevaluasi MTF ada dua klasifikasi pengukuran utama:

- Rekaman gelombang
- Metode tepi.



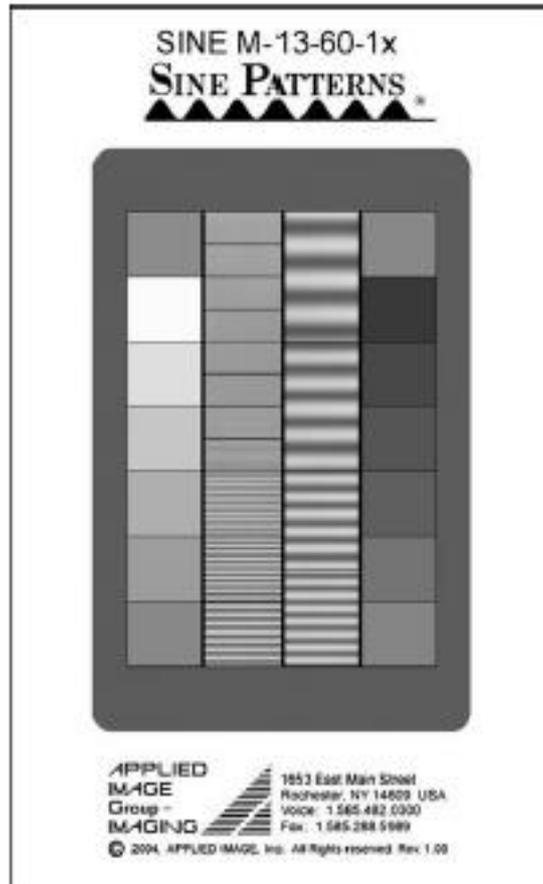
Gambar 3.14 Variasi kekuatan menyelesaikan dengan eksposur menggunakan grafik uji kontras meningkat (aec).

65.1. Perekaman gelombang - metode gelombang sinus

Ini adalah pendekatan yang cukup tradisional untuk analisis sistem optik dan fotografi. Sebuah bagan yang berisi rentang frekuensi spasial (yaitu pola intensitas sinusoidal yang bervariasi dalam satu orientasi) dicatat oleh sistem yang diuji. Gambar 24.15 mengilustrasikan target tersebut. Dynamic range sinyal (yaitu rentang eksposur) dibuat cukup rendah untuk memastikan linieritas yang efektif, yaitu intensitas input-ke-output linier diperlukan. Sebagai alternatif, non-linearitas input-ke-output pertama kali dikoreksi (hubungan terbalik diterapkan untuk melinierisasi sinyal output) sebelum modulasi gambar ditentukan.

Untuk setiap frekuensi modulasi gambar ditentukan dari pemindaian gambar. Ini dibagi dengan modulasi input yang sesuai untuk mendapatkan faktor transfer modulasi (lihat Bab 7). Plot faktor transfer modulasi versus frekuensi spasial adalah MTF sistem. Perhatikan bahwa frekuensi yang dikutip biasanya ditentukan dalam bidang detektor. Oleh karena itu, perbesaran target uji perlu diperhitungkan. Mengalikan frekuensi target uji dengan perbesaran menghasilkan frekuensi di bidang detektor (lihat Ekuasi 24.17).

Dalam sistem sampel (digital), semakin sulit untuk menghasilkan hasil hingga batas Nyquist dengan metode gelombang sinus karena masalah fase dan noise. Pada frekuensi spasial tinggi, elemen sensor jarang sejajar sempurna dan sefase dengan pola intensitas periodik target. Noise gambar memperburuk masalah ini.



Gambar 3.15 Contoh grafik gelombang sinus terkalibrasi, M-13-60-1x, digunakan untuk mengevaluasi MTF. Diproduksi oleh, dan atas izin dari, Applied Pencitraan Inc., [www. applicationimage.com](http://www.applicationimage.com). Lihat bibliografi untuk informasi lengkap

65.2. Perekaman gelombang - metode gelombang persegi

Karena kemudahan produksi objek gelombang persegi yang akurat, frekuensi gelombang persegi sering digunakan. Menggunakan langkah-langkah yang sama seperti pada metode gelombang sinus, MTF gelombang persegi, $MSQ(u)$, dibangun. Teori deret Fourier memberikan konversi untuk mendapatkan MTF yang benar sebagai:

Ekuasi 24.16

$$M(u) = \frac{\pi}{4} \left[MSQ(u) + \frac{1}{3} MSQ(3u) - \frac{1}{5} MSQ(5u) + \frac{1}{7} MSQ(7u) - K \right]$$

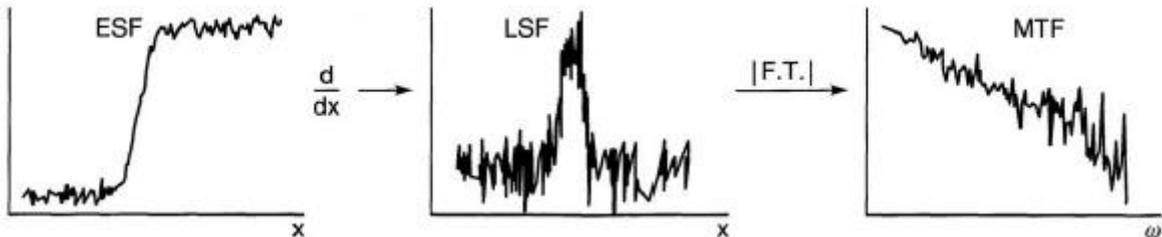
dimana u adalah frekuensi spasial dari gelombang persegi.

65.3. Metode input edge

Metode ini penting karena tidak memerlukan pola masukan khusus. Secara teoritis, ‘tepi sempurna’ mengandung sejumlah frekuensi yang tidak terbatas dan oleh karena itu merupakan sinyal masukan yang sempurna untuk menguji respons frekuensi spasial dari suatu sistem. Tepi adalah objek biasa di sebagian besar pemandangan. Kerugian utama dari metode ini terletak pada sensitivitasnya terhadap noise, karena area gambar yang digunakan kecil. Sekali lagi, target tepi harus memiliki kontras rendah untuk memastikan linieritas

sistem yang efektif, atau gambar yang direkam perlu dikoreksi, seperti pada metode gelombang sinus, sebelum penghitungan apa pun.

Metode ini melibatkan pemindaian gambar tepi untuk menghasilkan fungsi penyebaran tepi (ESF; lihat Bab 7). Ini dibedakan untuk mendapatkan fungsi penyebaran garis sistem (LSF). Modulus transformasi Fourier dari LSF, dinormalisasi menjadi satu pada $u = 0$, adalah MTF yang diperlukan. Prosedurnya diilustrasikan pada Gambar 24.16. MTF yang diukur berisi konten frekuensi spasial dari target tepi. Ini bisa diperbaiki, jika perlu, menggunakan properti cascading, yang dijelaskan nanti.



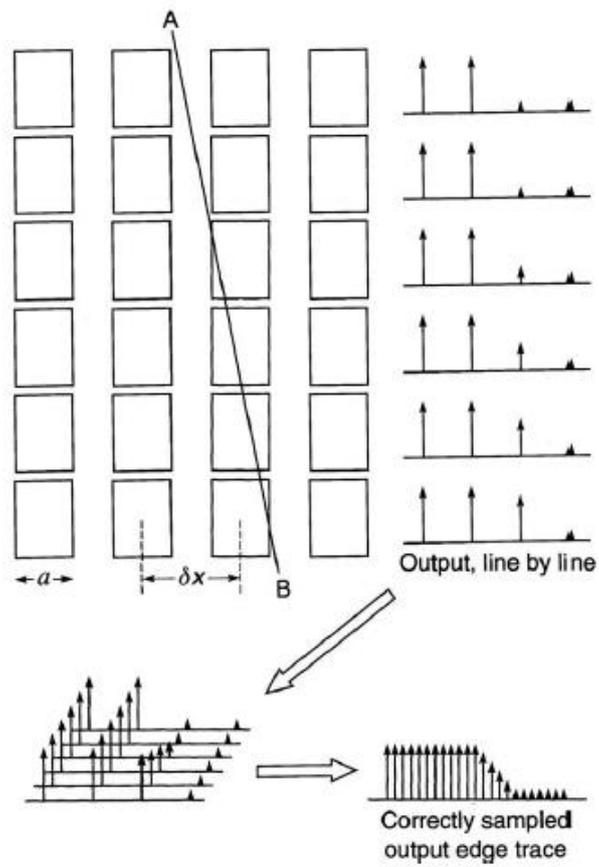
Gambar 3.16 Penurunan MTF dari fungsi penyebaran tepi.

Perlu dicatat bahwa noise akan mempengaruhi frekuensi tertinggi, karena tahap diferensiasi. Bahkan jika ESF dihaluskan sebelum diferensiasi, ketidakpastian dalam MTF yang dihasilkan masih tetap ada dan umumnya akan menyebabkan MTF ditaksir terlalu tinggi pada frekuensi spasial yang lebih tinggi.

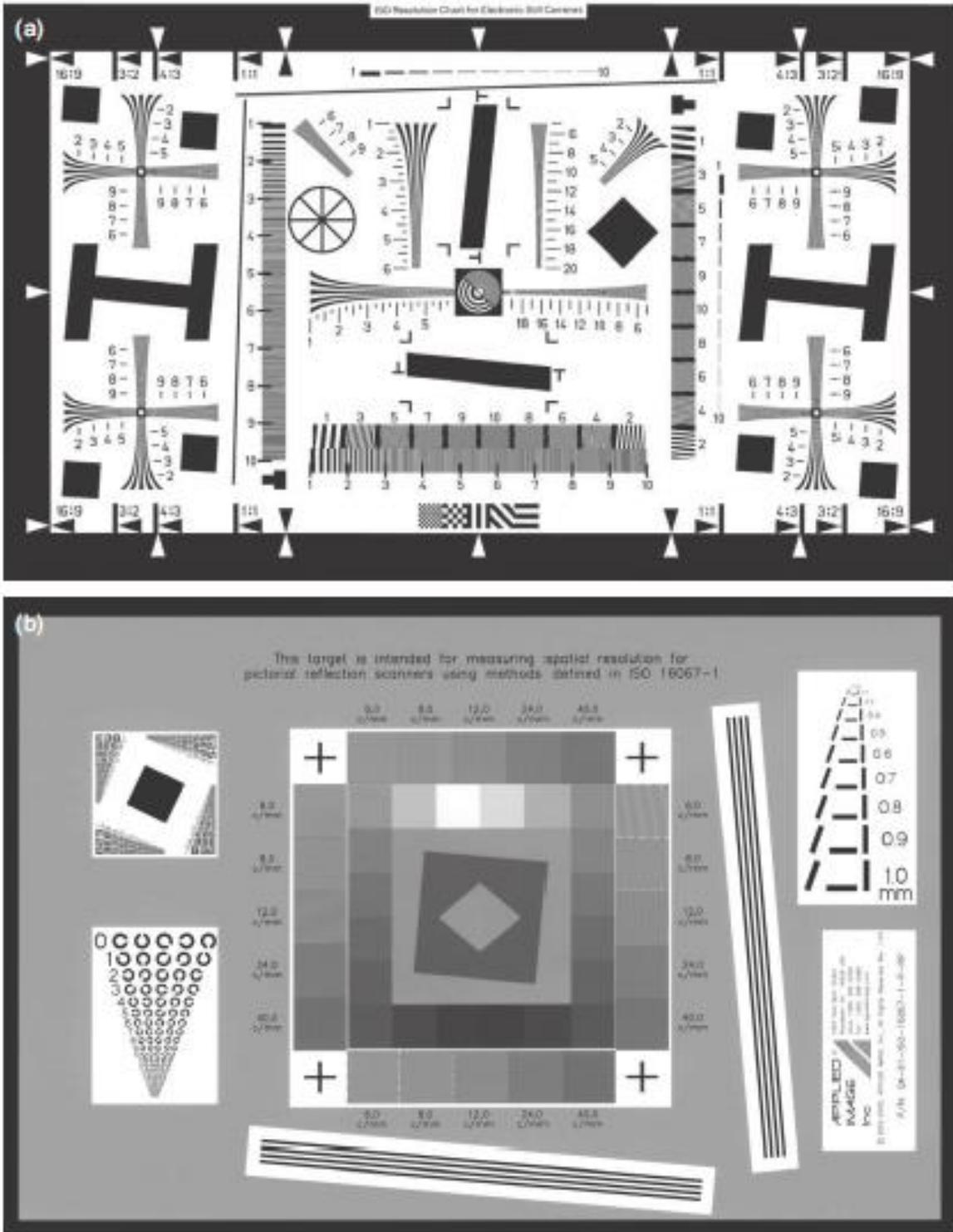
Metode edge, meskipun berguna, mengalami kesulitan saat diterapkan pada sistem sampel (digital). Penjajaran relatif tepi dengan larik sensor akan menyebabkan variasi hasil karena efek aliasing dan fase. Setiap ketidaksejajaran sudut menghasilkan pelunakan tepi saat rata-rata kolom dilakukan. Selain itu, MTF hanya dapat dihitung ke frekuensi Nyquist karena teorema pengambilan sampel.

65.4. Metode Slanted edge

Sebagai tanggapan atas kesulitan di atas dalam evaluasi MTF dari sistem sampel, teknik tepi miring dikembangkan dan sejak itu diadopsi sebagai standar ISO (ISO 12233: 1999).



Gambar 3.17 Skema array detektor CCD/CMOS dan ilustrasi prinsip metode tepi miring untuk pengukuran SFR.



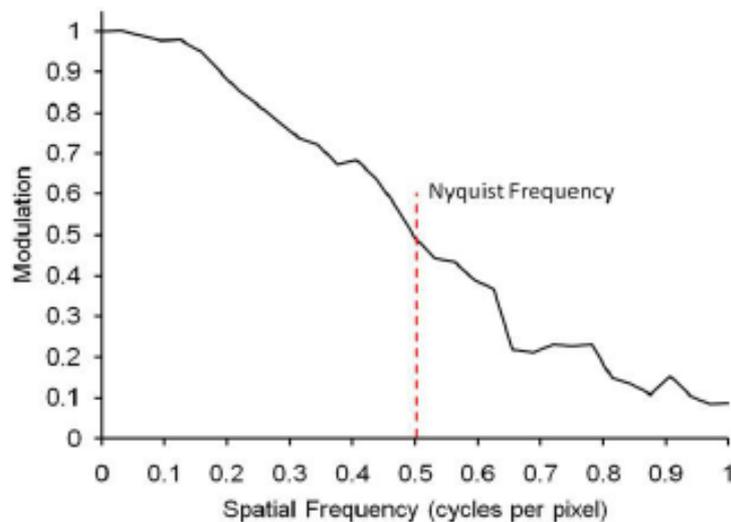
Gambar 3.18 (a) Bagan pengujian yang digunakan untuk pengukuran SFR ISO 12233 dan (b) target pengujian yang ditentukan untuk scanner reflektif dalam ISO 16067-1. Target pengujian yang ditunjukkan pada (b) memiliki kontras yang lebih rendah dan oleh karena itu beberapa keuntungan untuk sistem dengan komponen non-linier. Izin untuk mereproduksi ekstrak dari ISO 12233 dan ISO 16067-1 diberikan oleh BSI. Contoh target uji dalam (b) diproduksi oleh, dan atas izin dari, Applied Pencitraan Inc, www.appliedimage.com. Lihat bibliografi untuk informasi lengkap.

Teknik diilustrasikan pada Gambar 24.17. Sebuah tepi (A-B) diproyeksikan ke detektor dengan sedikit sudut vertikal. Keluaran dari salah satu baris akan menjadi jejak tepi

undersampled. Namun, jika baris-baris yang berurutan digabungkan dalam urutan interlaced yang benar, kami memperoleh jejak tepi tunggal yang telah diambil sampelnya dengan sangat dekat. Jejak ini kemudian dibedakan dan modulus transformasi Fourier diambil untuk menghasilkan ukuran akurat dari respon frekuensi spasial horizontal (SFR), diukur jauh melampaui batas Nyquist praktis.

Respons di atas dinamai SFR, bukan MTF, karena tidak memperhitungkan konten frekuensi spasial target edge, atau upaya untuk memisahkan komponen sistem. Secara praktis, bagaimanapun, target memiliki sedikit efek pada hasil jika dicitrakan pada perbesaran rendah (misalnya 1/50). Target standar untuk pengukuran tersedia. Target uji standar untuk mengukur SFR ditunjukkan pada Gambar 24.18a dan b. SFR kamera digital khas diilustrasikan pada Gambar 24.19. Sejumlah perangkat lunak komersial memiliki plug-in untuk menghitung SFR. Metode ini menjadi populer karena kemudahan penggunaan dan perangkat lunak yang tersedia. SFR dapat diperlakukan sebagai MTF dengan mengoreksi target menggunakan properti cascading di bawah ini.

MTF/SFR memberikan ukuran yang berguna untuk desain dan analisis sistem. Umumnya, titik di mana MTF/SFR turun menjadi 10% akan diukur sebagai batas resolusi. Perancang algoritme juga akan menggunakan MTF/SFR untuk menunjukkan di mana amplifikasi digital dari sinyal dapat menghasilkan noise yang tidak menyenangkan. MTF akan sering digunakan sebagai kriteria desain sehubungan dengan posisi dalam bidang pandang untuk menentukan desain lensa.



Gambar 3.19 SFR tipikal untuk kamera digital komersial dengan piksel berukuran 9 mm. Juga ditunjukkan adalah frekuensi Nyquist, di luar itu aliasing dapat terjadi jika tidak dikontrol.

66. Koreksi MTF

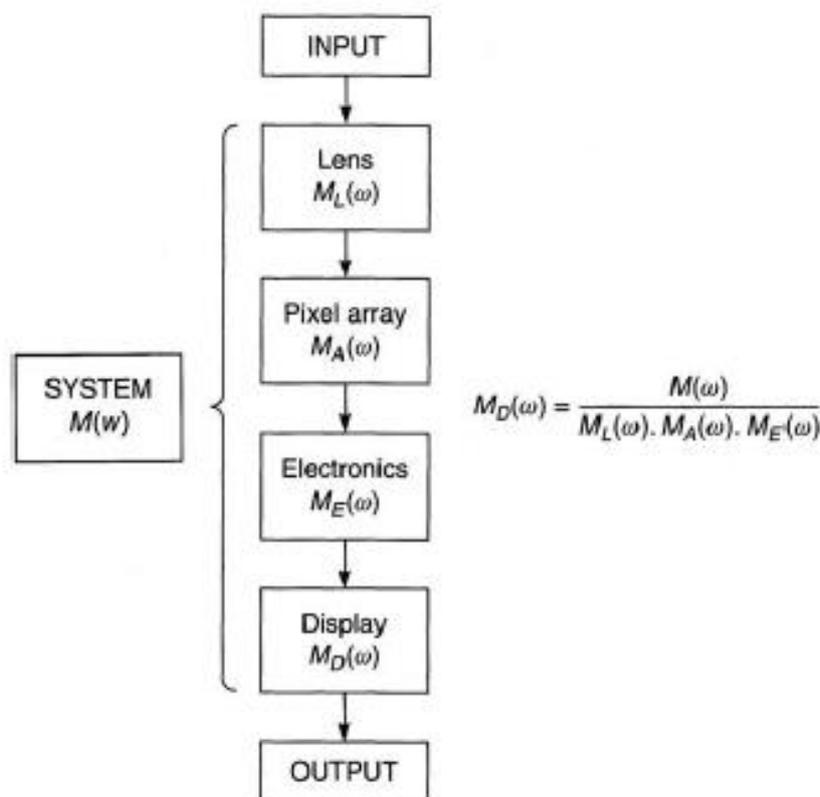
Dengan semua metode di atas, MTF yang diukur umumnya akan menjadi sistem yang berisi rangkaian proses. Misalnya, dalam analisis film fotografi, diperlukan beberapa bentuk alat scanner untuk mengekstrak fungsi penyebaran. Saat mengukur MTF dari array CCD, lensa biasanya akan disertakan.

Masing-masing proses ini memiliki MTF sendiri. Properti cascading menyatakan bahwa ini mengalikan bersama untuk menghasilkan sistem MTF. Ini asalkan proses dan

hubungan di antara mereka adalah linier. Oleh karena itu, sistem optik yang koheren tidak akan mengalir dengan cara ini.

Oleh karena itu, efek dari proses individu dapat dihapus dari pengukuran keseluruhan dengan membaginya dengan MTF tersebut (setidaknya, hingga frekuensi di mana noise mendominasi). Gambar 24.20 mengilustrasikan prosedur ini untuk akuisisi digital dan rantai tampilan.

Perlu dicatat bahwa koreksi menjadi tidak dapat diandalkan di area di mana kurva MTF komponen mendekati nol atau nilai kecil relatif terhadap komponen lainnya, karena ini memaksa kurva resultan ke arah ketidakterbatasan. Pendekatan pragmatis adalah memperkirakan kesalahan dalam hasil yang sebanding dengan kebalikan dari nilai terendah dalam setiap kurva komponen pada setiap frekuensi spasial.



Gambar 3.20 Hubungan antara MTF perangkat tampilan dan imaging chain lengkap, dengan asumsi linieritas.

67. Kekuatan resolving (penyelesaian) dan MTF untuk sistem optik

Masuk akal untuk menguji sistem optik apa pun, biasanya untuk memperkirakan nilai daya penyelesaian maksimum dan minimum yang tersedia (RP; lihat Bab 6) dan kontras ambang batas. Sistem yang lengkap dapat dievaluasi bersama dengan efek lingkungan apa pun seperti getaran, sistem yang berbeda dapat dibandingkan dan pemeriksaan terus dilakukan pada pemeliharaan kinerja yang disepakati atau diperlukan. Metode pengujian dapat dilakukan dengan pengujian lapangan atau berbasis studio.

Pengujian lapangan berkaitan dengan: benar-benar memotret dalam kondisi pengguna yang khas untuk mengevaluasi faktor manusia dan lingkungan; jenis dan kualitas/kuantitas

pencahayaan subjek; efek gambar laten untuk pemrosesan yang tertunda; efek subjek pada kualitas gambar, dan jarak subjek atau pergerakan. Penilaian subyektif dari gambar akhir dapat diskalakan berdasarkan sistem tiga poin Lulus/Dapat Diterima/Gagal atau skala kualitas dari 1 hingga 5.

Pengujian lapangan dan studio dapat menggunakan kolimator, instrumen optik kompak yang terdiri dari lensa yang dikoreksi dengan baik dengan lubang jarum atau reticule uji yang diterangi pada bidang fokus belakangnya. Melihat dari depan memberikan tas wanita itu pada ketidaksempurnaan buatan. Kolimator otomatis memiliki pemisah sinar untuk melihat langsung tas wanita di bidang fokus, atau pada film, kode fotokat, atau larik CCD. Ini mungkin untuk memeriksa panjang fokus dan akurasi skala fokus serta ketidaksejajaran dan penyimpangan. Penggunaan lapangan memungkinkan kontrol kualitas dari sistem lensa, dudukan, dan bodi kamera yang lengkap.

Pengujian resolusi berbasis studio mudah dan murah tanpa peralatan khusus. Batasannya meliputi penggunaan konjugat terbatas, pengulangan tidak lebih baik dari $\pm 10\%$ dan tidak ada satupun gambaran jasa yang diberikan. Dua metode dasar adalah memotret dengan lensa yang sedang diuji gambar yang diperkecil ($m = 0,02$) dari larik planar pola uji (target) yang menutupi bidang pandang, atau menggunakan lensa untuk memproyeksikan gambar yang diperbesar ($m = 50 - 500$) ke layar rangkaian gambar mikro presisi dari target pada pelat yang ditempatkan di bidang fokus lensa. Metode sebelumnya memberikan hasil untuk kinerja komposit sistem, termasuk detektor, fokus, getaran, dan gerakan gambar.

Berbagai desain target uji digunakan, termasuk diagram Sayce, Cobbchart, dan Siemens Star. Target USAF (1951) banyak digunakan, memiliki desain tiga 'batang' dengan batang dan ruang dengan lebar d dan panjang $5d$. Elemen target memiliki penurunan ukuran dengan faktor $\sqrt[6]{2}$, setara dengan perubahan frekuensi spasial (u) 12%, di mana $u = 1/2d$ dan pasangan garis = $2d$. Batas RP adalah nilai $1/2d$ untuk gambar di kedua azimuth ortogonal yang baru saja diselesaikan. Frekuensi target u_i dan frekuensi gambar u_o terkait dengan perbesaran m :

Ekuasi 24.17

$$u_o = u_i m$$

Kontras target yang digunakan adalah 1.6: 1, yaitu $\Delta D=0.2$; 6.3:1, $\Delta D=0.8$; dan 100:1, $\Delta D=2.0$, dengan ΔD adalah kerapatan pantulan.

Daya penyelesaian optik juga diberikan dalam pasangan baris permm ($lp\ mm^{-1}$, lpm atau mm^{-1}) sebagai $RP = 1/2d$. Hasilnya dipengaruhi oleh eksposur, fokus, pemrosesan dan evaluasi visual. Performa pencitraan dapat dinilai dari pemeriksaan figur RP untuk berbagai kondisi fokus, apertur, dll.

MTF data untuk sistem optik sangat berguna. Penggunaan langsung adalah penentuan pengaturan fokus terbaik dengan respon maksimum yang diperoleh. Perangkat lunak desain optik sering kali menggunakan model MTF untuk mengoptimalkan desain lensa di tahap selanjutnya. Hal ini berguna untuk mengingatkan pembaca pada titik ini bahwa hanya dalam komponen yang koheren MTF mungkin mengalir; fase cahaya harus acak. Secara praktis, ini berarti bahwa untuk lensa multi-elemen, MTF lensa secara keseluruhan bukanlah MTF dari elemen individual yang dikalikan bersama.

Satu kurva MTF benar-benar mendeskripsikan performa lensa dan banyak kurva diperlukan untuk aperture yang berbeda, dalam cahaya monokromatik dan putih, dan pada pengaturan fokus, konjugasi, dan orientasi yang berbeda. Lensa dapat dibandingkan secara langsung dalam kondisi serupa dan dikarakterisasi dari data MTF mereka sebagai, katakanlah, 'kontras gambar tinggi tetapi RP terbatas ' atau 'kontras sedang tetapi RP tinggi'. Kedua jenis tersebut memberikan gambar yang berbeda dan lebih disukai untuk jenis pekerjaan praktis tertentu, biasanya perekaman untuk tujuan umum oleh yang pertama dan menyalin dengan yang terakhir. Penilaian terpisah harus dilakukan terhadap karakteristik gambar lainnya seperti distorsi dan flare.

68. Sharpness, MTF dan Kualitas gambar

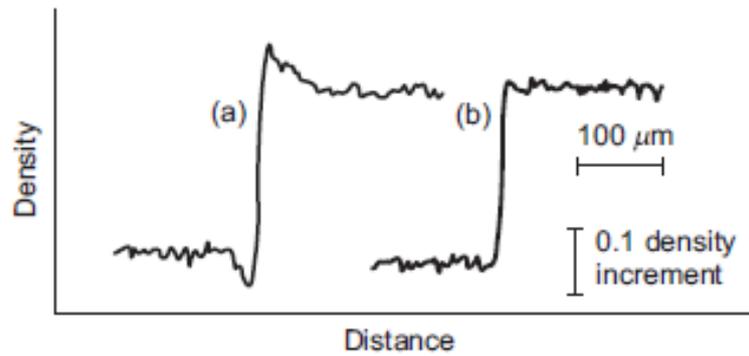
Terlihat di seluruh buku ini - terutama di Bab 19 - bahwa kualitas gambar melibatkan proses psikofisik yang bekerja pada berbagai atribut fisik citra. MTF merangkum atribut yang berkontribusi pada kesan subjektif seperti sharpness dan resolusi.

Istilah 'sharpness ' mengacu pada kesan subjektif yang dihasilkan oleh gambar tepi pada persepsi visual pengamat, yang dihasilkan oleh film atau sensor digital. Derajat sharpness tergantung pada bentuk dan luas dari profil tepi, tetapi karena subjektif hubungannya rumit dan sulit untuk dinilai. Secara tradisional, ukuran objektif sharpness fotografi, yang dikenal sebagai sharpness, dapat dihitung dari gradien densitas kuadrat rata-rata di sepanjang tepi. Ini melibatkan mikrodensitometri yang sangat hati-hati untuk proses tipe fotografis dan memiliki kesalahan yang tinggi. Hasilnya hanya berkorelasi sebagian dengan sharpness visual.

Profil densitas tepi fotografi tergantung pada kekeruhan emulsi dan proses pengembangan. Ketika efek kedekatan signifikan, sharpness yang ditingkatkan sering kali terjadi. Fenomena ini digunakan untuk keuntungan dalam banyak formulasi pengembang, dan diilustrasikan pada Gambar 24.21a. Densitas di lingkungan terdekat dari sisi densitas tinggi dari tepi ditingkatkan dengan difusi pengembang aktif dari sisi densitas rendah. Produk oksidasi yang menghambat perkembangan yang menyebar dari sisi densitas tinggi mengurangi densitas di lingkungan sekitar dari sisi densitas rendah dari tepi. Luminance overshoots yang dibuat di batas tepi pada gambar akhir menghasilkan sensasi sharpness yang meningkat.

Pendekatan dan fenomena yang sama membentuk dasar analisis sensor gambar digital. Profil tepi dapat dicitrakan, setelah itu nilai digital dapat diperiksa untuk membentuk 'jejak'. seperti di atas. Dengan cara yang sama, prosedur penajaman gambar yang digunakan dalam pemrosesan gambar digital (lihat Bab 27), seperti operator crispering, berdasarkan Laplacian, menciptakan sensasi peningkatan sharpness dengan menghasilkan overshoot yang serupa dalam tingkat abu-abu piksel di dekat tepinya. .

Telah dicatat sebelumnya bahwa fungsi sebaran garis dari suatu sistem dapat diperoleh dari turunan pertama dari profil tepi. Ini menunjukkan bahwa mungkin ada hubungan antara sharpness dan MTF.



Gambar 3.21 Jejak tepi untuk film kecepatan sedang yang khas dengan adanya (a) dan tidak adanya (b) efek tepi.



Gambar 3.22 Pengaruh pengaburan saluran chrominance dan luminansi. (a) Gambar asli. (b) Hanya mengaburkan informasi chrominance. (c) Memburamkan hanya informasi luminansi. Informasi chrominance diburamkan menggunakan kernel Gaussian 10 kali lebih lebar dari pada luminansi, namun degradasi luminansi lebih jelas.

69. DQE (Detective quantum efficiency)

69.1. Pertimbangan umum

Sistem pencitraan bekerja dengan detektor yang merespons energi cahaya. Informasi yang terkandung dalam eksposur pada prinsipnya dapat diukur dari segi jumlah dan distribusi kuantum energi dalam eksposur.

Oleh karena itu, efisiensi proses pencitraan dalam merekam kuantum individu dengan cara yang efektif merupakan ukuran yang berharga, terutama dalam aplikasi seperti astronomi, di mana foton paparan mungkin terbatas. Ukuran seperti itu adalah detective quantum efficiency (DQE). Secara tegas itu adalah fungsi frekuensi spasial, yang melibatkan MTF dan daya noise yang dinormalisasi, bersama-sama dengan kuantitas $\epsilon(0)$, yang mewakili fraksi efektif kuantum yang dihitung. Ketiga parameter ini bertanggung jawab untuk menurunkan gambar dan menurunkan efisiensi perekaman informasi.

Jika kita mengasumsikan eksposur kita adalah frekuensi rendah, MTF dan daya noise yang dinormalisasi keduanya satu, DQE menjadi identik dengan kuantitas $\epsilon(0)$. Ini didefinisikan dalam istilah rasio signal-to-noise sebagai berikut:

Ekuasi 24.18

$$DQE = \varepsilon(0) = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{OUT}^2}{\left(\frac{S}{N}\right)_{IN}^2}$$

di mana $(S/N)_{OUT}^2$ adalah rasio signal-to-noise gambar dan $(S/N)_{IN}^2$ adalah rasio signal-to-noise dari eksposur. $(S/N)_{OUT}^2$ memperhitungkan semua sistem dalam efisiensi yang terkait dengan perekaman kuanta yang efektif (partisi paparan acak, efisiensi detektor kuantum, proses acak dalam amplifikasi, dll.). Ini harus dinyatakan dalam unit eksposur input yang setara. $(S/N)_{IN}^2$ tergantung pada jumlah kuanta dalam eksposur.

Sistem pencitraan yang ideal akan memiliki $DQE = (100\%)$. Sistem pencitraan nyata memiliki $DQE < 1$, misalnya:

TV camera (Orthocon) $DQE \sim 0.1$

CCD cooled $DQE \sim 0.5$

CCD uncooled $DQE \sim 0.3$

CCD Back thinned $DQE \sim 0.8$

Photographic emulsion $DQE \sim 0.01$

Human eye $DQE \sim 0.03$.

Konsep DQE dapat diilustrasikan dengan bantuan Gambar 24.23. Pada Gambar 24.23a, representasi pola foton masukan ditampilkan. Ini terdiri dari disk dengan luas $A \mu\text{m}^2$ dan intensitas di atas latar belakang foton $I_S \mu\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Intensitas latar belakang rata-rata adalah foton $I_B \mu\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Misalkan eksposur berlangsung selama T detik. Jumlah foton yang terkandung dalam disk (kekuatan sinyal) akan menjadi $A I_S T$. Jumlah rata-rata foton yang ada di area ekuivalen A dari latar belakang adalah $A I_B T$. Karena distribusi foton mengikuti statistik Poisson, latar belakang disertai dengan tingkat noise $\sqrt{A I_B T}$. Rasio signal-to-noise untuk eksposur ini diberikan oleh:

Ekuasi 24.19

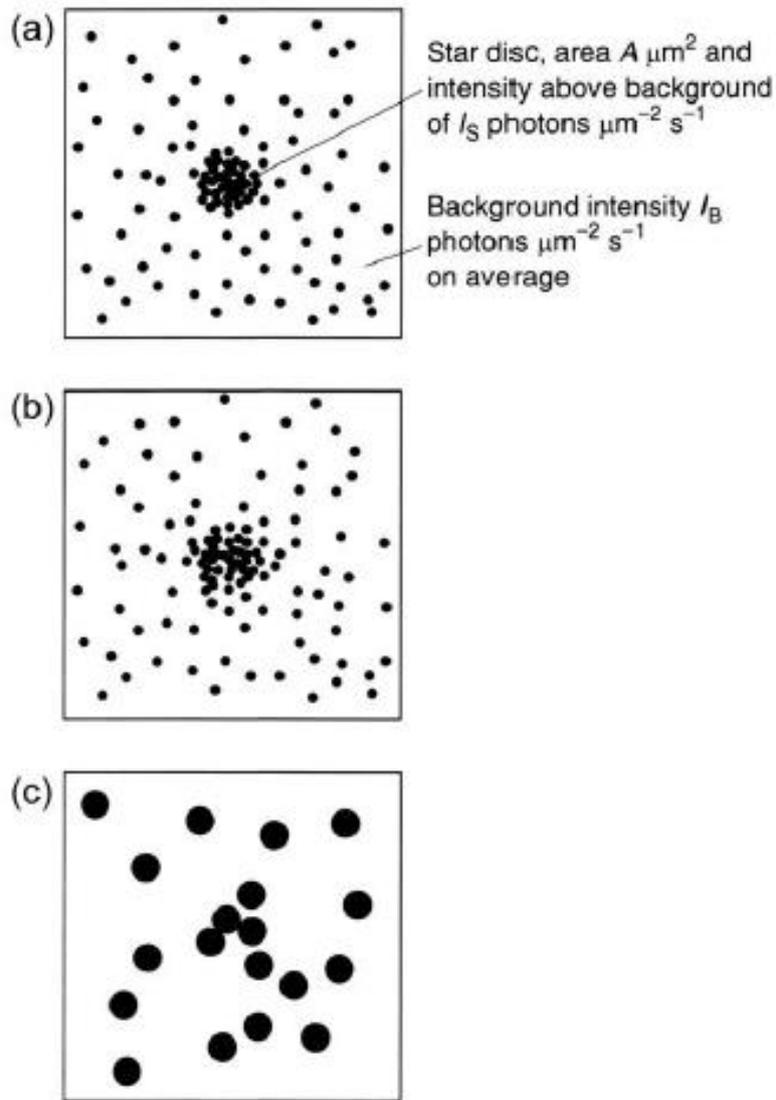
$$\left(\frac{S}{N}\right)_{IN}^2 = \frac{A I_S q}{I_B}$$

Dengan kata lain, rasio signal-to-noise meningkat sebagai akar kuadrat dari waktu eksposur. Karena tingkat eksposur latar belakang hanya $q = \text{foton IBT } \mu\text{m}^{-2}$ kita dapat mengganti T dalam Ekuasi 24.19 untuk memperoleh:

Ekuasi 24.20

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{IN}^2 = \frac{A I_S^2 q}{I_B^2} = kq$$

di mana K adalah konstanta untuk pola foton tertentu, yaitu rasio sinyal-ke-derau input kuadrat sebanding dengan tingkat pencahayaan.



Gambar 3.23 (a) Representasi pola eksposur foton mengikuti waktu eksposur T detik. (b) Gambar di mana semua foton direkam tetapi MTF beroperasi. (c) Gambar tipikal dari sistem nyata di mana MTF beroperasi dan hanya sebagian kecil dari foton eksposur yang direkam.

Sistem pencitraan yang 'ideal' akan merekam posisi setiap foton yang terdapat dalam pola input ini, dan menampilkan gambar yang identik dalam segala hal. Dengan kata lain, image atau output signal-to-noise, $(S/N)_{OUT}$, akan sama dengan $(S/N)_{IN}$.

Gambar 24.23b menunjukkan gambar Gambar 24.23a di mana semua kuantum telah direkam secara unik, tetapi elemen gambar yang sesuai dengan posisi yang terdeteksi telah dipindahkan, secara acak, dalam jarak kecil untuk mensimulasikan difusi cahaya. Ini sesuai dengan MTF yang tidak satu kesatuan di atas rentang frekuensi spasial yang terkandung. Disk masih terlihat meskipun tepinya kurang jelas. Dalam contoh ini rasio signal-to-noise hanya sedikit lebih kecil dari pada eksposur.

Gambar 24.23c mengilustrasikan gambar khas dari proses nyata di mana hanya sebagian kecil kuantum yang direkam secara efektif setelah difusi cahaya. Sistem memperkuat elemen gambar untuk membuat gambar terlihat. Gambar tersebut sekarang sangat bising dan bintangnya hampir tidak dapat dideteksi. Rasio signal-to-noise untuk gambar ini jauh lebih sedikit daripada untuk eksposur. Dalam hal signal-to-noise, gambar

ini dapat dicocokkan dengan gambar dari sistem 'ideal' yang beroperasi pada tingkat eksposur latar belakang yang jauh lebih rendah (misalnya q_0). Dengan kata lain, meskipun level eksposur sebenarnya adalah q , hasilnya hanya 'sebanding' dengan level eksposur yang lebih rendah q' .

Jika rasio signal-to-noise untuk gambar ini dilambangkan $(S/N)_{OUT, REAL}$, kita dapat menulis:

Ekuasi 24.21

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{OUT, REAL}^2 = kq'$$

Menggunakan Ekuasi 24.21, kita dapat menulis DQE untuk sistem nyata sebagai:

Ekuasi 24.22

$$DQE = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{OUT, REAL}^2}{\left(\frac{S}{N}\right)_{IN}^2} = \frac{d'}{d}$$

Ekuasi 24.22 menunjukkan bahwa DQE dari proses perekaman gambar nyata pada level eksposur q diberikan oleh rasio q'/q , di mana q' adalah level eksposur (lebih rendah) di mana proses hipotetis 'ideal' perlu beroperasi di untuk menghasilkan keluaran dengan kualitas yang sama dengan yang dihasilkan oleh proses nyata.

69.2. DQE untuk proses fotografi

Dengan mengekspresikan rasio signal-to-noise dari gambar fotografi dalam hal parameter sensitometrik, kita dapat memperoleh ekspresi kerja berikut untuk DQE dari emulsi fotografi:

Ekuasi 24.23

$$DQE = \frac{\gamma^2 (\log_{10} e)^2}{qA\sigma^2}$$

Di sini γ^2 mewakili kemiringan kurva karakteristik fotografi pada level eksposur q quanta μm^{-2} , $\log_{10} e$ adalah konstanta dan $A\sigma^2$ adalah granularitas gambar pada level eksposur q .

Ekuasi 24.23 sama dengan penulisan:

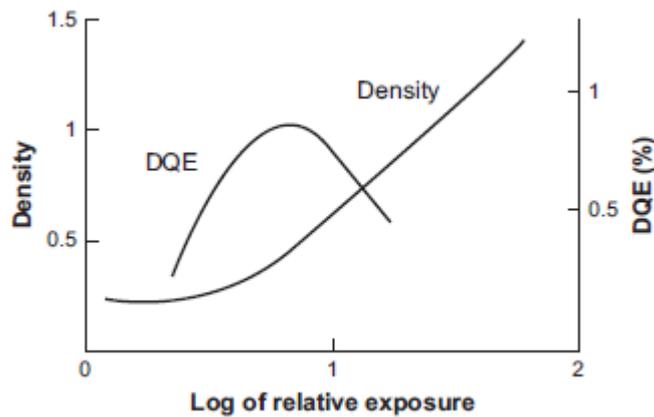
Ekuasi 24.24

$$DQE = \text{speed} \times \text{kontras}^2 / \text{granularitas}$$

Hubungan seperti itu, dengan senang hati, setuju dengan kesimpulan yang diperoleh dari pendekatan akal sehat yang lebih intuitif untuk masalah peningkatan kualitas gambar fotografis.

Gambar 24.24 menunjukkan kurva pencahayaan DQE vs. log untuk bahan fotografi tipikal. Dapat dilihat bahwa puncak fungsi di sekitar ujung kurva karakteristik dan memiliki nilai maksimum hanya sekitar 1%. Di sisi mana pun dari level eksposur optimal, DQE turun

cukup cepat. DQE yang sangat rendah ini merupakan karakteristik dari semua bahan fotografi. Mereka tidak terlalu efisien dalam memanfaatkan kuantitas keterpaparan. Untungnya, ini tidak signifikan dalam fotografi normal di mana tingkat eksposur cukup tinggi untuk memastikan rasio signal-to-noise output cukup tinggi. Namun, dalam situasi yang melibatkan tingkat cahaya rendah, seperti yang mungkin ditemui dalam fotografi astronomi, DQE rendah ini merupakan batasan yang parah, dan telah menyebabkan pengembangan sistem perekaman gambar yang jauh lebih efisien untuk menggantikan atau menambah materi fotografi.



Gambar 3.24 Detective quantum efficiency (DQE) sebagai fungsi eksposur untuk bahan fotografi tipikal. Fungsi tersebut mencapai puncaknya pada level eksposur dekat ujung material karakteristik.

69.3. DQE untuk pencitraan array CCD atau CMOS

Array pencitraan CCD dan CMOS sekarang menjadi detektor pilihan di sebagian besar aplikasi pencitraan. Tersedia apa yang disebut kamera megapiksel yang menawarkan karakteristik MTF yang sebanding dengan emulsi fotografi. Mereka juga menunjukkan DQE yang jauh lebih tinggi daripada emulsi fotografis. Pada bagian ini kami memperkenalkan proses yang menentukan DQE untuk perangkat semacam itu.

Kami mulai dengan mendefinisikan beberapa istilah yang diperlukan dengan mengacu pada Gambar 24.25, yang menunjukkan fungsi transfer dari array CCD sebelum konversi analog-ke-digital.

Responsivitas, R . Ini adalah kemiringan dari bagian garis lurus dari kurva transfer masukan keluaran. Satuan yang mungkin adalah volt/joule cm^{-2} , volt/quanta μm^{-2} , dll. R bergantung pada sejumlah faktor (panjang gelombang, suhu, desain piksel) tetapi dapat dinyatakan secara luas sebagai:

Ekuasi 24.25

$$R = g\eta$$

di mana g adalah penguatan keluaran (volt per elektron) dan h adalah efisiensi kuantum.

Eksposur setara saturasi (SEE). Ini adalah eksposur input yang memenuhi muatan dengan baik. Jika arus gelap dianggap dapat diabaikan maka kita memiliki (kurang-lebih):

Ekuasi 24.26

$$SEE = V_{max}/R$$

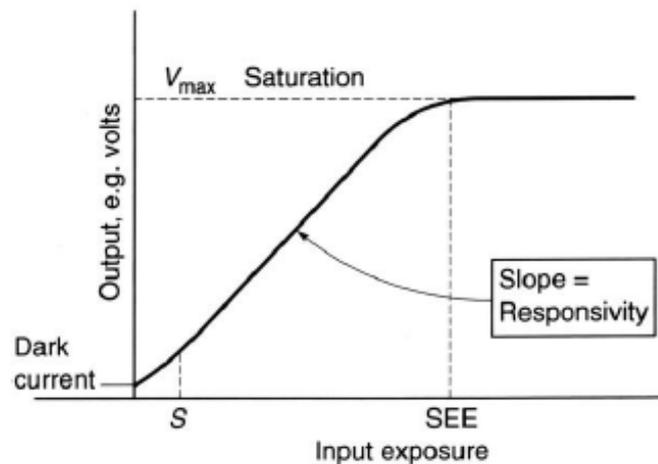
dimana V_{max} adalah kapasitas sumur penuh dalam volt dan R adalah responsivitas.

Noise ekuivalen eksposur (NEE). Ini adalah level eksposur yang menghasilkan rasio signal-to-noise 1. Jika noise output yang diukur adalah σ_{TOT} (rms) dan jika dark current dianggap dapat diabaikan, maka:

Ekuasi 24.27

$$NEE = \sigma_{TOT}/R$$

Terkadang NEE digunakan sebagai ukuran sensitivitas, S , dari detektor.



Gambar 3.25 Kurva karakteristik larik CCD/CMOS sebelum konversi analog-ke-digital

69.4. DQE dan Rasion signal-to-noise

Pertimbangkan foton q tingkat eksposur per satuan luas. Noise yang terkait dengan ini adalah $q^{1/2}$ foton per satuan luas (karena kedatangan foton dalam ruang dan waktu diatur oleh statistik Poisson).

Oleh karena itu, rasio signal-to-noise dari eksposur, $(S/N)_{IN}$, adalah:

Ekuasi 24.28

$$(S/N)_{IN} = q/q^{1/2} = q^{1/2}$$

jadi

Ekuasi 24.29

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{IN}^2 = q$$

Eksposur ini akan menghasilkan fotoelektron ηq per satuan luas dan $g\eta q$ volt. Noise pada keluaran karena fotoelektron ini akan menjadi $\sigma_q = (\eta q)^{1/2} e^{-rms}$ atau $g(\eta q)^{1/2}$ volt rms. Variansnya kemudian $\sigma_q^2 = g^2 \eta q$ (menggunakan volt sebagai unit keluaran).

Oleh karena itu, output noise total adalah:

Ekuasi 24.30

$$\sigma^2TOT = \sigma_{SYS}^2 + \sigma_q^2 = \sigma_{SYS}^2 + g^2\eta q$$

Sekarang kita harus menyatakan output noise ini dalam hal unit eksposur masukan (yaitu kita mentransfer tingkat noise kembali melalui kurva transfer):

$$\text{Output noise, } \sigma_{EFF} = \frac{\sigma_{TOT}}{R}, \text{ Jadi } \sigma^2_{EFF} = (\sigma_{SYS}^2 + g^2\eta q)/(nq)^2$$

Ekuasi 24.31

$$\left(\frac{S}{N}\right)^2_{OUT} = q^2/\sigma_{EFF}^2 = g^2\eta^2 q^2/(\sigma_{SYS}^2 + g^2\eta q)$$

Ekuasi 24.32

$$\varepsilon(0) = (S/N)^2_{OUT}/(S/N)^2_{IN} = q\eta^2 g^2/(\sigma_{SYS}^2 + g^2\eta q)$$

Perhatikan bahwa jika tidak ada gangguan sistem, maka frekuensi rendah DQE $\varepsilon(0) = \eta$.

Contoh

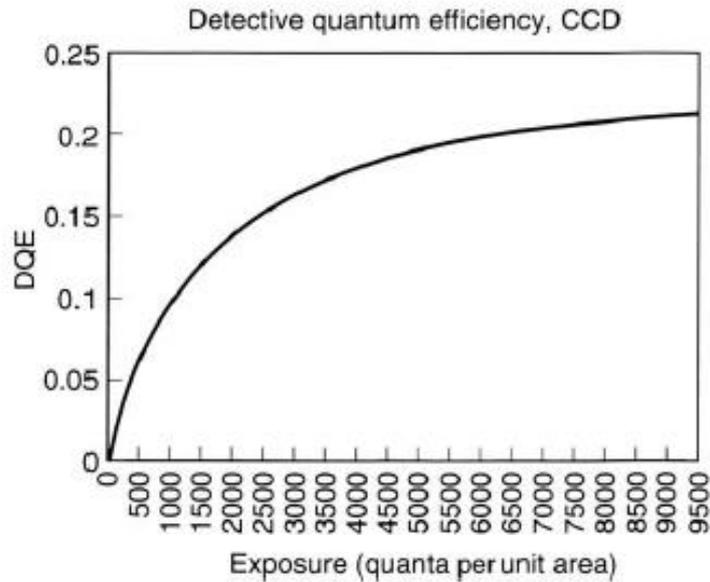
Fotodetektor memiliki efisiensi kuantum $\eta = 25\%$ dan gangguan sistem σ_{SYS} setara dengan 20 elektron rms per satuan luas. Berapakah DQE frekuensi rendah $\varepsilon(0)$ pada tingkat keterpaparan (a) 1000 foton per satuan luas dan (b) 10^5 foton per satuan luas?

Solusi

Karena output noise diberikan dalam elektron per satuan luas, kita dapat menetapkan $g = 1$ dalam Ekuasi 24.32:

$$\begin{aligned} \varepsilon(0) &= (0.25)^2 100/(0.25 \times 1000 + 20^2) \\ &= 63.5/650 = 9.6\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon(0) &= (0.25)^2 10/(0.25 \times 10^5 + 20^2) \\ &= 6250/25,400 \\ &= 24.6\% \end{aligned}$$



Gambar 3.26 DQE dari array pencitraan CCD/CMOS. Untuk eksposur tinggi (dibatasi oleh SEE) DQE mendekati efisiensi kuantum, yang dalam contoh ini adalah 25%.

Fungsi DQE dari Ekuasi 24.32, dengan parameter dari contoh ini, diplot pada Gambar 24.26. Kurva secara signifikan lebih tinggi daripada DQE puncak untuk bahan fotografi tipikal. Untuk tingkat eksposur tinggi (hingga SEE), DQE mendekati efisiensi kuantum perangkat.

70. Teori Informasi

Teori informasi menyediakan kerangka kerja matematika di mana pembuatan atau transmisi informasi dapat diukur secara intuitif. Dengan kata lain, informasi dapat diukur secara tepat dan tidak ambigu dengan cara yang mudah dipahami dan diterapkan dalam praktik. Pembaca juga diarahkan ke Bab 29, di mana beberapa latar belakang konsep yang dijelaskan di sini (khususnya karya Claude Elwood Shannon, yang darinya sebagian besar teori itu berasal) dibahas lebih lanjut.

Proses memperoleh informasi setara dengan menghilangkan ketidakpastian. Kami berbicara tentang sumber informasi yang berisi sejumlah kemungkinan hasil. Ketidakpastian dalam sumber bergantung pada kemungkinan hasil individu. Ketika hasil tertentu dihasilkan, ketidakpastian itu telah dihilangkan. Kami telah memperoleh informasi. Ketidakpastian dalam suatu sumber diukur dengan menggunakan konsep entropi sumber. Jika sebuah sumber memiliki n kemungkinan hasil, dan hasil terjadi dengan probabilitas p_i , maka entropi sumber didefinisikan sebagai:

Ekuasi 24.33

$$H = \sum_{all\ i} p_i \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right) \text{ bit}$$

di mana unit, bit, mengambil definisi yang sama seperti pada Bab 9. Jika hasilnya semua mungkin sama, entropi sumber berkurang menjadi:

Ekuasi 24.34

$$H = \log_2(n) \text{ bit}$$

Dalam urutan uji coba independen, di mana setiap uji coba menghasilkan hasil, kami memperoleh rata-rata H bit informasi per hasil.

71. Kapasitas Informasi pada Gambar

Misalkan kita memiliki gambar yang berisi m piksel independen per satuan luas di mana setiap piksel dapat mengambil salah satu dari n nilai yang berbeda (diasumsikan sama kemungkinannya). Setiap piksel dapat dianggap sebagai sumber informasi. Menurut Ekuasi 24.34 entropi per piksel diberikan sebagai $H = \log_2(n)$ bit. Mengenai gambar sebagai saluran informasi, ini berarti bahwa setiap piksel mampu membawa $\log_2(n)$ bit. Kami mengatakan bahwa kapasitas informasi, C, adalah $\log_2(n)$ bit per piksel atau, secara lebih umum:

Ekuasi 24.35

$$C = m \log_2(n) \text{ nit per unit area}$$

Sebagai contoh, pertimbangkan larik gambar CCD yang terdiri dari 1800 piksel secara horizontal kali 1200 piksel secara vertikal. Jika setiap piksel secara independen dapat mengambil salah satu dari 256 level yang berbeda, kapasitas informasi dari satu frame diberikan sebagai:

$$\begin{aligned} C &= 1800 \times 1200 \times \log_2 256 \\ C &= 1800 \times 1200 \times 8 \\ &= 17,280,00 \text{ bit (diatas 2 megabyte)} \end{aligned}$$

Kapasitas informasi dari emulsi fotografis kurang mudah untuk dievaluasi, karena tidak ada piksel yang siap diidentifikasi. Area fungsi penyebaran titik pada 10% telah digunakan sebagai area ekuivalen. Jumlah level perekaman, n, bergantung pada level granularitas. Perhitungan tersebut menghasilkan nilai untuk kapasitas informasi bahan kecepatan kamera orde 10^5 bit/cm². Oleh karena itu, frame 35mm akan memiliki kapasitas sekitar $8,5 \times 10^6$ bit. Tampaknya sistem digital telah mengambil alih proses fotografi sehubungan dengan ukuran kinerja ini.

Dalam praktiknya, kapasitas informasi di atas jarang tercapai. Untuk mewujudkan kapasitas ideal dalam sistem seperti itu, setiap piksel dan tingkat intensitas dalam sistem tersebut akan independen dan bebas noise.

Korelasi piksel tetangga terjadi pada gambar karena subjek yang sedang dicitrakan. Oleh karena itu, konten informasi untuk gambar tipikal akan jauh lebih sedikit daripada kapasitas informasinya, karena untuk gambar yang paling bermakna, banyak nilai piksel yang bertetangga akan sama. Kami mengatakan ada redundansi.

Korelasi lebih lanjut, bukan disebabkan oleh sinyal asli, juga ada dan untuk perangkat digital dapat dikaitkan dengan kinerja optik: array warna tipe Bayer, interpolasi, algoritma denoising, filter anti-aliasing dan elektronik sistem. Komponen ini pada dasarnya dapat diwakili oleh PSF dari sistem pencitraan secara keseluruhan dan lebarnya akan menunjukkan sejauh mana korelasi antara piksel tetangga ada. Saat PSF melebar, jumlah unit pencitraan independen di dalam gambar menurun. Sebaliknya, dapat dibayangkan

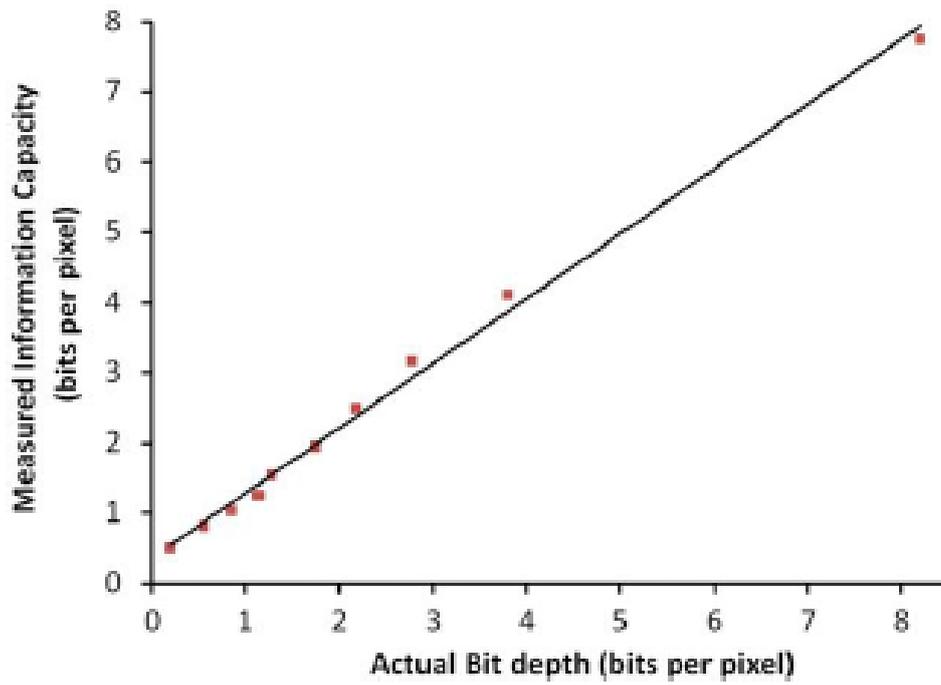
bahwa jika gabungan PSF dari semua komponen lain lebih kecil dari satu piksel, keluarannya akan ideal. Korelasi antara piksel di beberapa perangkat digital dapat memperpanjang puluhan piksel dan dengan demikian ukuran sel pencitraan akan sesuai urutan itu.

Oleh karena itu, terlepas dari jumlah piksel yang sebenarnya dikeluarkan oleh perangkat tertentu, PSF akan lebih akurat mewakili jumlah unit atau sel pencitraan independen yang sebenarnya. Efek ini penting untuk dipertimbangkan oleh pembeli peralatan gambar digital. Jumlah piksel perangkat yang dilaporkan tidak selalu berhubungan dengan kekuatan penyelesaian akhir gambar. Tentu saja, jika ukuran piksel jauh lebih kecil daripada airy disk lensa yang menyertai, nilai piksel 'ekstra' harus dievaluasi. Kamera digital 6 Mp yang bagus dapat mengungguli perangkat 10 Mp yang buruk.

Jumlah level independen yang dapat diambil unit olahgambar ditentukan oleh noise yang ada dalam sistem. Saat noise dalam gambar meningkat, semakin sulit untuk memprediksi dengan akurat intensitas asli subjek. Dengan demikian, jumlah tingkat output yang dapat diukur secara independen menurun. Juga harus dicatat bahwa komponen korelasi piksel dapat ditambahkan oleh efek noise dan dapat dinilai dengan mengevaluasi spektrum daya noise perangkat. Tentu saja, perlakuan yang lebih canggih dari kapasitas informasi seperti yang disediakan oleh Shannon mendefinisikan signal-to-noise sebagai rasio kekuatan spektral signal-to-noise pada setiap frekuensi spasial, sebagian memperhitungkan efek noise yang berkorelasi.

Kapasitas informasi dapat dinilai untuk setiap sistem yang dapat membuat perkiraan yang wajar dari PSF dan noise. Contoh penting penerapannya adalah dalam konteks kompresi gambar. Baik teori informasi maupun kompresi akan dibahas lebih dalam pada Bab 29; oleh karena itu, berikut ini disebutkan secara singkat di sini sebagai ilustrasi. Gambar 24.27 menunjukkan kapasitas informasi gambar terkompresi JPEG 6b versus ukuran file terkompresi. Dengan memperlakukan artefak pemblokiran dalam kompresi JPEG sebagai noise dan mengevaluasi PSF rata-rata dari seluruh gambar menggunakan perbandingan informasi sebelum dan sesudah dikompresi, dimungkinkan untuk menghitung kapasitas informasi pada faktor kualitas yang berbeda. Dapat dilihat bahwa karena informasi dibuang karena kompresi gambar, kandungan informasi dari gambar yang didekompresi juga berkurang.

Ada peningkatan minat dalam kapasitas informasi sistem pencitraan, karena telah diusulkan bahwa ada tingkat korelasi antara itu dan kualitas gambar yang dirasakan. Dalam teknologi saat ini dan masyarakat yang berjejaring sosial, kami mencari teknik kompresi dan pemrosesan untuk menangani dan mengirimkan gambar dengan cerdas dalam sistem seperti TV kabel, DVD, dan Internet. Penggunaan kapasitas informasi memungkinkan teknik kompresi dan pemrosesan ini dioptimalkan, menghasilkan kualitas gambar terbaik.



Gambar 3.27 Kapasitas informasi JPEG versus ukuran file terkompresi.

4. PEMROSESAN GAMBAR SPASIAL

72. Pengantar

Salah satu motivasi yang paling kuat untuk pengolahan gambar digital adalah peningkatan citra, baik untuk meningkatkan tampilan visualnya dan membuatnya lebih menyenangkan bagi pengamat manusia, atau untuk meningkatkan hasil yang diperoleh jika gambar tersebut akan dianalisis lebih lanjut dalam aplikasi computer vision. . Penyempurnaan biasanya melibatkan: pengurangan elemen yang tidak diinginkan, seperti noise, yang dimasukkan pada titik pengambilan atau oleh sistem pencitraan ; koreksi distorsi, yang disebabkan oleh pilihan sudut kamera yang buruk, kondisi pencitraan yang kurang optimal, atau oleh imaging optic; modifikasi reproduksi nada dan warna; dan peningkatan elemen penting dalam pemandangan, seperti tepi. Operasi peningkatan gambar dapat dikategorikan secara luas berdasarkan domain tempat mereka dilakukan: operasi domain-spasial mengacu pada proses yang beroperasi pada bidang gambar, pada piksel itu sendiri, sedangkan operasi domain frekuensi dilakukan dengan manipulasi domain frekuensi representasi gambar, diperoleh dengan menggunakan transformasi, biasanya transformasi Fourier (lihat Bab 7). Dalam banyak kasus terdapat proses yang setara di kedua domain, meskipun satu mungkin lebih disukai daripada yang lain, tergantung pada hasil yang dibutuhkan, kemudahan dan efisiensi aplikasi. Ini adalah kelas operasi sebelumnya yang menjadi perhatian bab ini. Operasi pemrosesan domain frekuensi akan dibahas di bab berikutnya.

Pentingnya operasi dalam domain spasial terletak pada kesederhanaannya, karena sering kali merupakan operasi aritmatika yang sangat mendasar, dan mudah diterapkan. Proses ini adalah ilustrasi yang baik dari salah satu keuntungan besar dari gambar digital dibandingkan sistem halida perak. Ketika sebuah gambar direduksi menjadi serangkaian angka sederhana, proses yang membutuhkan waktu, peralatan, dan keterampilan teknis di kamar gelap menjadi sekadar aplikasi algoritme. Ini dapat ditulis dengan mudah dalam perangkat lunak yang sesuai oleh siapa saja yang memiliki keterampilan pemrograman yang cukup dasar. Lebih jauh, mereka memberikan hasil langsung dan yang terpenting dapat diulang dan dalam banyak kasus, tergantung pada operasi itu sendiri atau penggunaan ‘riwayat ‘ dalam aplikasi pengeditan gambar, mereka dapat dibalik.

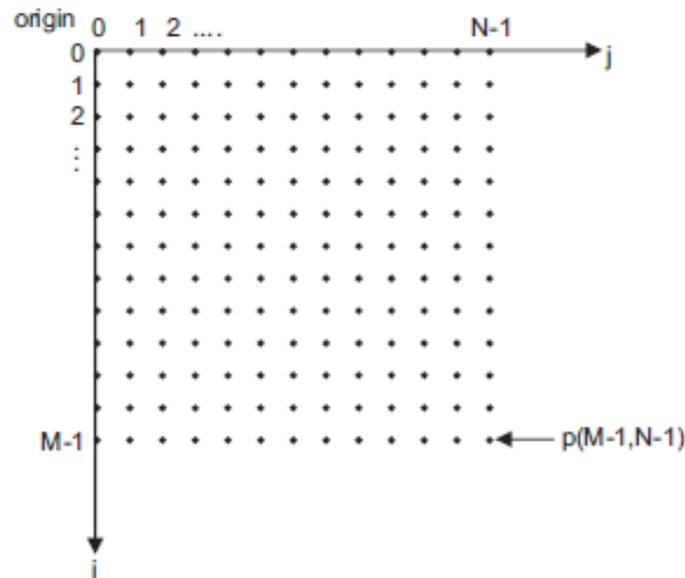
Titik-titik penerapan proses spasial dan variasi implementasinya pada tahapan yang berbeda dalam imaging chain bergantung pada perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan serta alur kerja secara keseluruhan. Masalah-masalah ini dibahas secara rinci dalam Bab 25. Bab ini bertujuan untuk melihat ‘mur dan baut ‘ dari beberapa operasi yang paling umum digunakan dan pengaruhnya terhadap gambar. Bibliografi di akhir bab berisi beberapa teks klasik tentang pemrosesan gambar digital untuk cakupan subjek yang lebih dalam.

73. Background

73.1. Struktur Gambar Digital

Seperti yang diperkenalkan pada Bab 1, gambar digital adalah representasi diskrit dari pemandangan kontinu, yang terdiri dari larik piksel yang tidak tumpang tindih. Dalam gambar dua dimensi, setiap piksel dapat dijelaskan oleh satu set variabel yang menjelaskan koordinat spasial dalam kaitannya dengan asal gambar dan nilai yang mewakili intensitasnya per saluran warna, sifatnya akan bergantung pada ruang warna di mana

gambar dikodekan. Dalam literatur pemrosesan gambar, piksel biasanya digambarkan sebagai $p(i, j)$, di mana i dan j masing-masing mewakili nomor baris dan kolom dan p adalah nilai piksel. Gambar akan terdiri dari M baris dan N kolom (lihat Gambar 27.1). Konvensi ini akan digunakan dalam bab ini.



Gambar 4.1 Representasi koordinat gambar digital. Terinspirasi oleh Gonzalez dan Woods (2002)

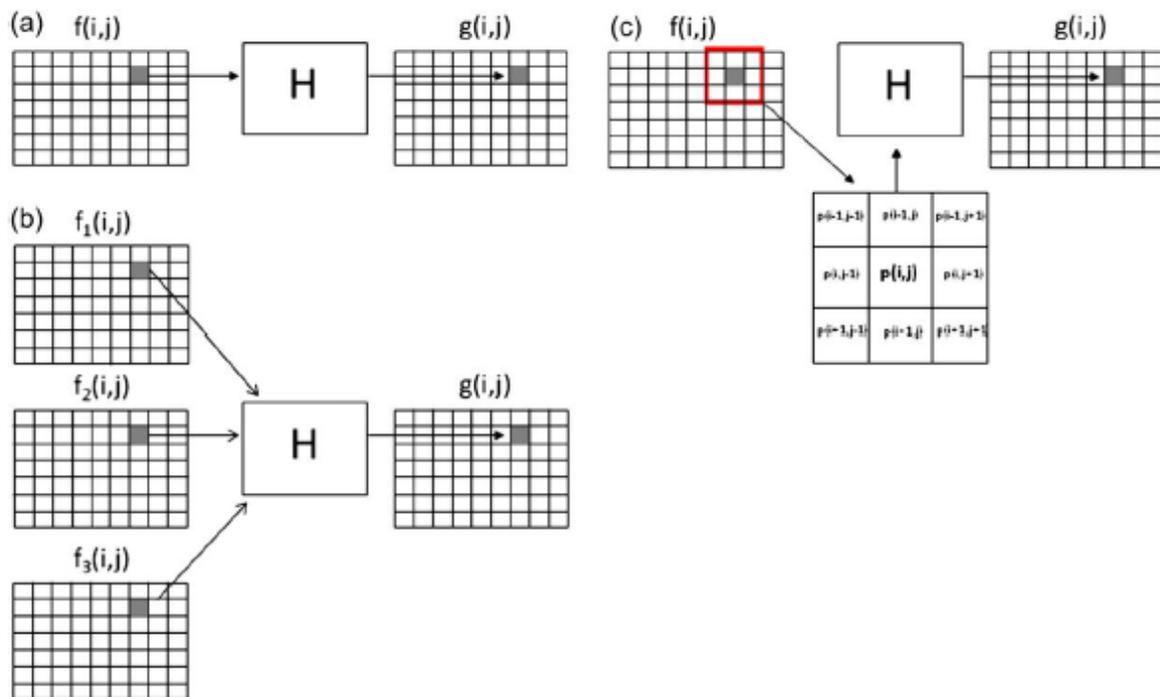
73.2. Implementasi Pemrosesan Domain Spasial

Karena kita umumnya berurusan dengan gambar masukan dan keluaran dengan ukuran yang sama, kita dapat melihat implementasi proses spasial dalam hal gambar masukan, $f(i, j)$, operasi spasial, H , dan gambar keluaran $g(i, j)$. Bentuk umum dari proses domain spasial dapat ditulis sebagai:

Ekuasi 27.1

$$g(i, j) = H[f(i, j)]$$

Secara umum, proses spasial dapat dikategorikan menurut jumlah piksel masukan yang digunakan untuk menghasilkan nilai piksel keluaran. Proses titik adalah proses di mana nilai piksel keluaran hanya didasarkan pada nilai piksel masukan pada posisi yang sama, dan beberapa operator. Proses ini diilustrasikan pada Gambar 27.2a. Proses titik karena itu memetakan operasi antara input dan output. Contohnya termasuk dynamic range, seperti eksposur berlebih dari gambar, kontras atau dynamic range, yang semuanya melibatkan pemetaan intensitas, atau skala abu-abu, nilai. Selain itu, koreksi warna diterapkan menggunakan jenis pemetaan yang sama ke saluran warna individual. Mereka sering diimplementasikan dengan menggunakan tabel look-up (LUT), yang dibuat dengan menerapkan berbagai fungsi transformasi pada kurva transfer input-output (kurva transfer digital setara dengan kurva karakteristik halida perak yang dijelaskan dalam Bab 8 - lihat Bab 21), atau menggunakan statistik gambar, dengan memanipulasi histogram gambar. Dalam aplikasi pengeditan gambar seperti Adobe Photoshop atau Gambar J, mereka juga dapat diterapkan menggunakan histogram (dengan membuat penyesuaian level) atau dengan mengubah kurva input-output gambar (menggunakan penyesuaian kurva).



Gambar 4.2 (a) Operasi pemrosesan titik (menggunakan lingkungan 1x1). (b) Operasi pemrosesan titik, banyak gambar. (c) Operasi pemrosesan titik, menggunakan lingkungan 3x3.

Jenis proses titik khusus menggunakan beberapa gambar pada masukan. Nilai piksel pada posisi koordinat yang sama dari semua gambar masukan digabungkan sedemikian rupa untuk menghasilkan nilai piksel keluaran (Gambar 27.2b). Metode ini cenderung menggunakan operasi aritmatika atau operasi logis untuk menghitung nilai keluaran.

Jenis utama lainnya dari proses domain spasial adalah operasi pemrosesan lingkungan. Seperti namanya, metode ini melibatkan kalkulasi nilai piksel keluaran berdasarkan lingkungan nilai masukan, yang dipilih dengan menggunakan semacam mask atau kernel, yang digambarkan pada Gambar 27.2c. Ini lebih dikenal sebagai metode penyaringan. Dua kelas utama filter spasial adalah linier atau non-linier. Perbedaan implementasi dan properti masing-masing dijelaskan nanti di bab ini.

74. Teori Sistem Linear

Gagasan tentang sistem invarian spasial linier diperkenalkan pada Bab 7 dalam konteks teori Fourier tentang pembentukan citra. Operator linier digunakan secara ekstensif dalam pemrosesan gambar dan pemahaman tentang properti sistem linier adalah penting, oleh karena itu subjek diuraikan di sini. Sistem linier memiliki dua properti utama:

1. *Aditif*. Jika f dan g dimasukkan ke dalam sistem linier yang sama, H , jumlah keluarannya akan sama seperti jika masukan telah dijumlahkan sebelum melalui sistem. Ini dapat diringkas dalam ekspresi berikut:

Ekuasi 27.2

$$H[f + g] = H[f] + H[g]$$

2. *Homogenitas*. Jika suatu masukan f dikalikan dengan nilai skalar a sebelum dimasukkan ke dalam sistem linier H maka keluarannya akan sama seperti jika keluaran sistem dari masukan f dikalikan dengan skalar:

Ekuasi 27.3

$$H[af] = aH[f]$$

Perhatikan bahwa f dan g mungkin merupakan fungsi gambar atau nilai piksel tunggal.

Dalam pemrosesan spasial, filter linier menghasilkan hasil yang sangat dapat diprediksi dibandingkan dengan filter non-liniernya. Properti tambahan dan sangat penting dari filter linier adalah bahwa filter tersebut memiliki ekuivalen domain frekuensi, berdasarkan teorema konvolusi, yang dijelaskan dalam Bab 7.

75. Konvolusi Diskrit

Konvolusi penting dalam pemrosesan gambar digital sebagai dasar penyaringan spasial linier, tetapi diterapkan sebagai operasi diskrit. Konvolusi kontinu diperkenalkan pada Bab 7. Integral dalam konvolusi kontinu (Ekuasi 7.30) diganti dengan perkalian dan penjumlahan dalam konvolusi diskrit, yang jauh lebih sederhana untuk dipahami dan diterapkan. Konvolusi diskrit dua dimensi diberikan oleh ekspresi:

Ekuasi 27.4

$$f(i, j) \otimes h(i, j) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(m, n) f(i - m, j - n)$$

Ini menjelaskan proses dari satu fungsi diskrit yang diputar dan melewati fungsi lainnya. Pada setiap titik perpindahan, nilai dalam fungsi pokok dikalikan dengan nilai pada posisi yang sesuai dalam fungsi konvolusi. Hasil yang dikalikan untuk rentang tersebut dijumlahkan dan ini menjadi nilai keluaran pada titik ini. Dalam operasi pemfilteran, kedua fungsi tersebut terbatas dan secara umum fungsi konvolusi lebih kecil dibandingkan dengan gambar, seringkali berupa topeng yang berisi nilai 3x3 atau 5x5. Perluasan ekspresi di atas untuk fungsi terbatas dan ilustrasi dari proses ini diberikan di bagian selanjutnya pada filter digital.

76. Proses Operasi Titik : Transformasi Intensitas

Sering disebut transformasi tingkat abu-abu, karena paling sering diterapkan pada gambar skala abu-abu, transformasi juga dapat diterapkan ke saluran warna individual; koreksi warna sering kali diterapkan dengan menggunakan pendekatan yang sama.

77. Perubahan Brightness dan Kontras menggunakan fungsi transformasi linier

Grafik pada Gambar 27.3a mewakili pemetaan sederhana antara input dan output. Maksimal mungkin merupakan nilai piksel maksimum ($L-1$, dengan jumlah level = L) atau 1,0, ketika nilai piksel dinormalisasi. Fungsi tersebut berisi nilai di seluruh rentang level abu-abu yang meningkat secara monoton. Dynamic range, yang merupakan rasio antara nilai terkecil dan terbesar dan ditunjukkan dengan jarak $X1$ dan $X2$ pada grafik, tetap sama dari input ke

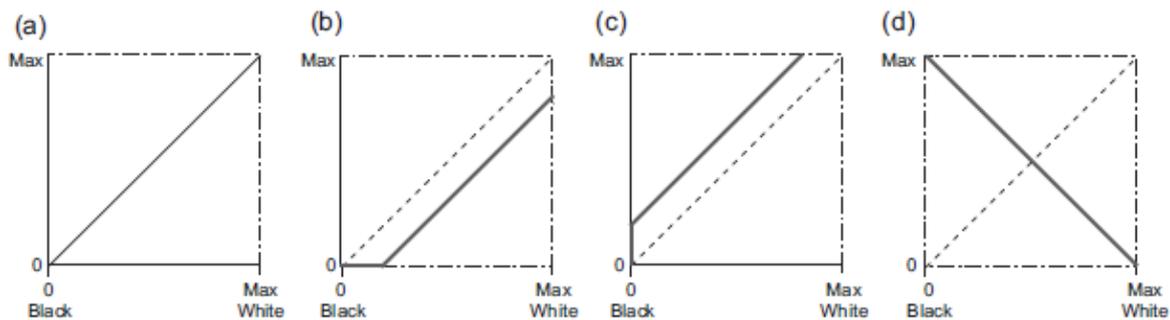
output. Fungsi khusus ini menunjukkan tidak ada perubahan pada gambar; semua nilai masukan dan nilai keluaran adalah sama. Fungsi ini dapat dijelaskan dengan ekspresi:

Ekuasi 27.5

$$g(i, j) = mf(i, j) + c$$

Ini adalah ekuasi garis lurus berbentuk $y = mx + c$, dengan konstanta m dan c (gradien dan perpotongan y) adalah 1 dan 0. Dengan mengubah nilai konstanta, perubahan global pada kontras dan kecerahan dapat dicapai.

Mengubah nilai c menjadi nilai negatif akan menghasilkan pengurangan kecerahan keseluruhan gambar, menghasilkan fungsi pada Gambar 27.3b, sedangkan nilai positif akan menyebabkan efek sebaliknya (Gambar 27.3c). Perhatikan bahwa dalam kasus sebelumnya sejumlah besar nilai output yang lebih rendah akan disetel ke 0 dan di kasus terakhir nilai output yang lebih tinggi akan disetel ke nilai maksimum, masing-masing mewakili pemotongan dalam bayangan dan sorotan. Ini adalah jenis fungsi yang diterapkan saat perubahan kecerahan diterapkan menggunakan penggeser. Kedua fungsi tersebut juga menunjukkan pengurangan dynamic range dari gambar keluaran, sebagai hasil dari nilai yang terpotong. Hasil yang sama dapat dicapai dengan menggunakan slide histogram, di mana nilai ditambahkan atau dikurangkan ke nilai histogram. Hasil penerapan fungsi pada Gambar 27.3b dan c pada gambar diilustrasikan dengan histogramnya pada Gambar 27.4.



Gambar 3.3 Perubahan kecerahan menggunakan fungsi linier. (A) Fungsi identitas (tidak ada perubahan antara input dan output). (b) Pengurangan kecerahan global (terpotong dalam bayangan). (c) Peningkatan kecerahan global (pemotongan sorotan). (d) Konversi gambar dari positif ke negatif.

Pembalikan gambar dari positif ke negatif (diilustrasikan dengan fungsi pada Gambar 27.3d) diperoleh dari Ekuasi 27.5 dengan nilai $m = -1$ dan $c = 1$ (dengan asumsi fungsi tersebut dinormalisasi). Ini dapat digeneralisasikan ke gambar yang tidak dinormalisasi menggunakan ekspresi:

Ekuasi 27.6

$$g(i, j) = f_{max} - f(i, j)$$

di mana f_{max} adalah nilai piksel maksimum yang terkandung dalam f .

Setiap penyimpangan dalam gradien fungsi akan menunjukkan perubahan kontras gambar (Gambar 27.5): kemiringan yang lebih curam ($m > 1$, $c < 0$) menunjukkan peningkatan kontras dari nilai yang terpengaruh; $m < 1$, $c > 0$ menghasilkan pengurangan kontras (juga dikenal sebagai kompresi nada). Fungsi ini adalah versi fungsi identitas yang dirotasi di sekitar tingkat abu-abu tengah. Dalam kasus peningkatan kontras, pemisahan

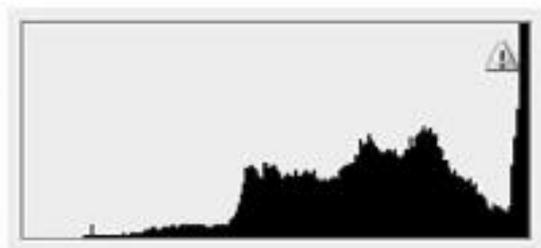
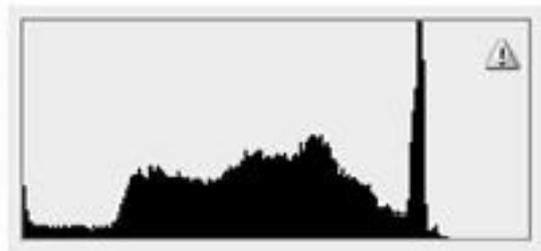
antara rona tengah akan meningkat, dengan dynamic range diperluas agar sesuai dengan dynamic range gambar input, sehingga terjadi pemotongan sorotan dan bayangan.

78. Fungsi Linear Piecewise

Fungsi pada Gambar 27.6a dan b mengilustrasikan perubahan kontras menggunakan fungsi linier yang diterapkan dalam segmen di seluruh rentang nada. Mereka digunakan dalam situasi di mana tujuannya adalah untuk meningkatkan kontras dari satu atau beberapa subjek yang terdiri dari tingkat abu-abu dalam kisaran sempit tertentu. Mereka dikenal sebagai peningkatan kontras linier sepotong-sepotong. Fungsi-fungsi ini dicirikan oleh fakta bahwa gradien diubah secara linier antara titik kontrol yang ditentukan, P1 dan P2. Pada Gambar 27.6a, kontras tingkat abu-abu antara dua titik telah ditingkatkan dengan menerapkan gradien 1,5. Di bawah P1 dan di atas P2, kemiringan telah dikurangi, yang mempertahankan dynamic range keseluruhan gambar tanpa memotong nilai apa pun. Rentang warna bayangan dan sorotan (di atas dan di bawah titik kontrol) telah dikompresi, sedangkan kontras warna tengah telah ditingkatkan. Pada Gambar 27.6b, kontras rona tengah antara dua titik kontrol telah dikurangi dengan menerapkan gradien 0,5. Di atas dan di bawah titik kontrol gradien telah dipertahankan pada 1, oleh karena itu mempertahankan pemisahan tonal untuk bayangan dan sorotan. Hasil dari kompresi tonal pada mid-tone, bagaimanapun, adalah bahwa keseluruhan dynamic range gambar berkurang.

Meskipun fungsi linier mudah untuk diterapkan, fungsi tersebut dibatasi karena semua nilai input (dari gambar, atau rentang di dalam gambar) akan diubah dengan cara yang sama. Sebuah alternatif untuk fungsi linier sepotong-sepotong adalah dengan menggunakan fungsi sigmoidal (Gambar 27.6c), yang memiliki keuntungan untuk mengubah nilai dengan mulus, dengan lebih sedikit pemotongan pada kedua ujung rentang nada.

Gambar thresholding dan kuantisasi



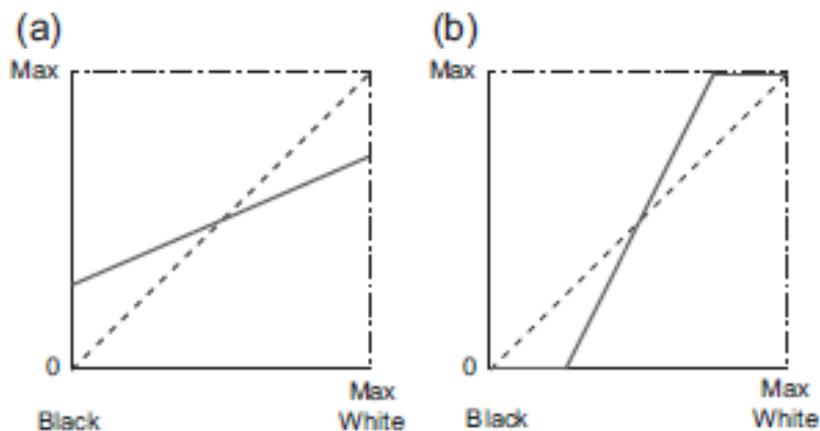
Gambar 4.4 Hasil penerapan fungsi pada Gambar 27.3b dan c pada gambar (gambar tengah dan bawah dan histogram masing-masing). Lonjakan di akhir setiap histogram menunjukkan nilai yang terpotong dalam bayangan atau sorotan.

Konversi dari grayscale ke gambar biner dicapai dengan menggunakan operasi thresholding. Ini adalah kasus khusus untuk peningkatan kontras linier sepotong-sepotong,

di mana nilai input untuk titik kontrol P1 dan P2 sama dan mewakili ambang gambar. Dalam hal ini, semua nilai di bawah titik ini disetel ke 0 pada keluaran dan semua nilai di atas disetel ke nilai maksimum (sebelum diubah menjadi 1 dalam representasi biner gambar). Posisi ambang akan bergantung pada aplikasinya. Gambar 27.7 mengilustrasikan fungsi untuk gambar 8-bit yang di-threshold pada nilai 128. Thresholding digunakan secara luas dalam segmentasi citra. Ambang batas dapat diatur secara otomatis atau interaktif berdasarkan pemeriksaan gambar dan histogramnya

Perpanjangan lebih lanjut dari thresholding diilustrasikan pada Gambar 27.8, yang merupakan fungsi yang digunakan untuk mengukur gambar, dalam hal ini dari 255 level dalam gambar 8-bit, turun ke empat level dalam gambar 2-bit. Fungsi kuantisasi dapat diterapkan di beberapa titik dalam imaging chain : contohnya termasuk pengambilan gambar menggunakan scanner, yang sering menangkap pada 10 atau 12 bit per piksel (per saluran) dan kemudian mengambil sampel sinyal luminansi, mengukur output menjadi 8 bit; Kamera digital tentu saja melibatkan kuantisasi dalam konversi analog-ke-digital (lihat Bab 9 dan 14), dan saat ini cukup umum untuk bekerja dengan gambar 16-bit di seluruh imaging chain sampai selesai mengedit dan kemudian mengubahnya menjadi 8 gambar - bit setelah selesai.

Transformasi Power-Law : Koreksi Gamma



Gambar 4.5 Perubahan kontras. (a) Penurunan kontras ($m < 1$). (b) Peningkatan kontras ($m > 1$) dengan pemotongan dalam bayangan

Proses koreksi gamma (dirinci dalam Bab 21) melibatkan koreksi sinyal input untuk mengubah respons output perangkat. Mungkin untuk mengoreksi non-linearitas dalam fungsi transfer asli perangkat. Atau, ini juga dapat diterapkan ke perangkat untuk mengimbangi non-linearitas perangkat lain yang mendahului atau mengikutinya dalam imaging chain. Pada kenyataannya, banyak perangkat menunjukkan respons non-linier mengikuti hukum kekuatan. Fungsi transformasi power-law berupa:

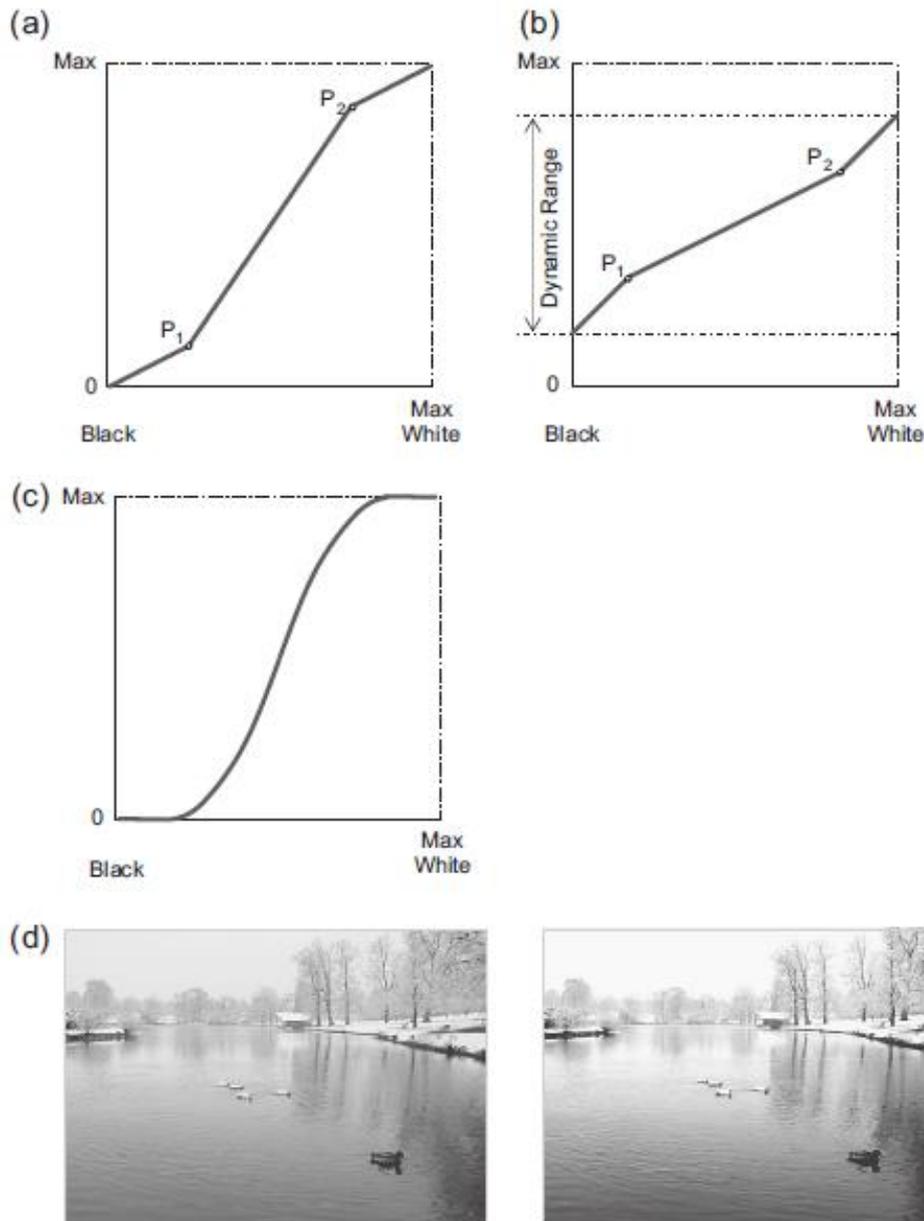
Ekuasi 27.7

$$g(i, j) = cf(i, j)^{\gamma}$$

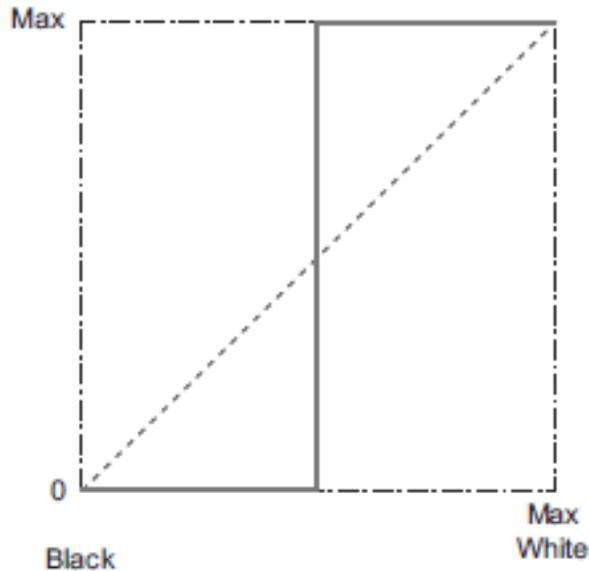
dimana c dan g keduanya adalah konstanta. Gambar 27.9 mengilustrasikan fungsi ini dengan $c = 1$ untuk dua nilai gamma yang berbeda, di atas dan di bawah 1. Nilai gamma yang lebih besar dari 1 menghasilkan kompresi tonal (penurunan kontras) di area bayangan dan pemisahan tonal di sorotan. Jenis fungsi ini adalah tipikal dari respons tegangan

tampilan berdasarkan teknologi tabung sinar katoda (CRT) (lihat Bab 15 dan 21). Koreksi respons tersebut dicapai dengan menerapkan fungsi transformasi dalam ekspresi $27,7$ menggunakan $1/g$ sebagai eksponen. Fungsi koreksi gamma dalam imaging chain, meskipun didasarkan pada model gamma jenis ini, cenderung jauh lebih kompleks (lihat Bab 21 untuk lebih jelasnya).

Fungsi power-law juga dapat digunakan untuk peningkatan kontras, pada gambar yang mengharuskan kontras bayangan atau sorotan ditingkatkan.



Gambar 4.6 Peningkatan kontras. (a) Peningkatan linier sedikit demi sedikit - peningkatan kontras. (b) Peningkatan linier sedikit demi sedikit - penurunan kontras. (c) Peningkatan kontras menggunakan fungsi sigmoid. (d) Gambar dan gambar kontras rendah asli ditingkatkan menggunakan fungsi sigmoid dari (c). Kontras mid-tone ditingkatkan, dengan mengorbankan detail yang hilang dalam bayangan dan sorotan, karena kliping.



Gambar 4.7 Gambar thresholding. Fungsi thresholding untuk gambar 8-bit, threshold = 128.

Pemrosesan titik: operasi beberapa gambar

Proses titik dapat digunakan dengan beberapa gambar sebagai metode untuk menggabungkan atau membandingkan nilai piksel dalam gambar. Mereka dapat diringkas dengan ungkapan berikut:

Ekuasi 27.8

$$g(i, j) = f_1(i, j)[operator]f_2(i, j)[operator]f_3(i, j) \dots f_n(i, j)$$

Artinya, setiap posisi piksel (i, j) pada gambar keluaran merupakan kombinasi piksel demi piksel, menggunakan [operator] dari semua piksel pada posisi yang sama dari semua gambar masukan.

Beberapa contoh paling umum dari operasi pemrosesan titik yang menggunakan beberapa gambar diberikan di bawah ini.

79. Peningkatan menggunakan operasi aritmatika

Ada berbagai teknik yang menggunakan penjumlahan, pengurangan, atau perkalian nilai citra. Salah satu yang paling sederhana adalah rata-rata gambar, yang menghitung rata-rata piksel demi piksel untuk setiap koordinat piksel dari sekumpulan gambar masukan dengan dimensi yang sama. Operasi ini memiliki aplikasi khusus dalam pencitraan tingkat cahaya rendah, terutama astrofotografi, di mana beberapa gambar dapat ditangkap dari subjek statis atau hampir statis. Eksposur panjang dan intensitas rendah menghasilkan derau foton tingkat tinggi, yang muncul sebagai pola derau acak pada setiap frame, berbeda di antara frame. Rata-rata dari sekumpulan frame berurutan yang ditangkap pada interval waktu singkat mempertahankan informasi gambar yang tidak berubah, tetapi membatalkan berbagai informasi acak, seperti noise (Gambar 27.10). Ini adalah metode yang sangat kuat untuk menghilangkan noise tanpa kerugian dari pengaburan tepi yang dihasilkan oleh metode penyaringan (lihat nanti), selama gambar benar-benar dalam register.

Mengurangkan satu gambar dari yang lain meningkatkan perbedaannya. Contoh penerapannya adalah dalam evaluasi kesalahan yang disebabkan oleh algoritma kompresi lossy, di mana gambar yang dikompresi dikurangi pikselnya dengan piksel dari aslinya. Gambar perbedaan kemudian dapat digunakan untuk mendapatkan ukuran obyektif dari distorsi, seperti rasio sinyal bicara terhadap noise (PSNR) - lihat Bab 29 untuk detail ukuran distorsi.

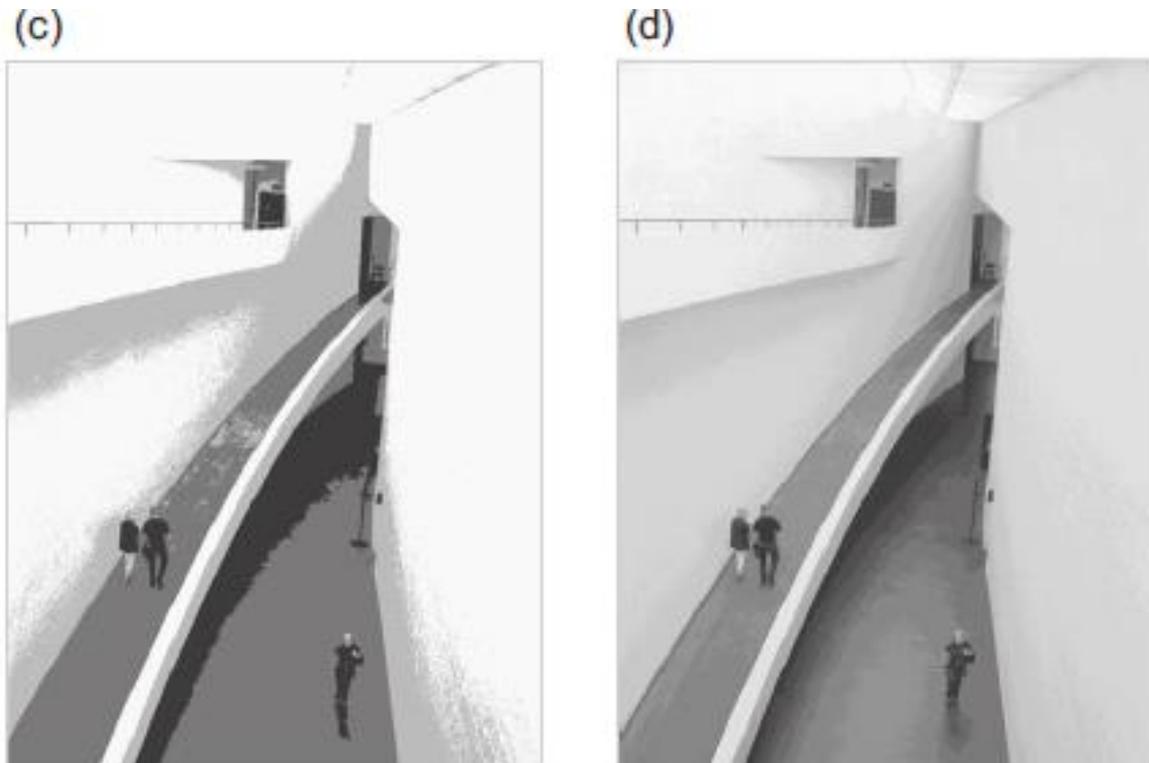
Pengurangan gambar juga dapat digunakan untuk mengurangi latar belakang dari gambar untuk menyempurnakan fitur yang menarik. Hal ini dicapai dengan menangkap gambar objek pada latar belakangnya, diikuti dengan gambar latar belakang saja dan kemudian mengurangnya, mengisolasi objek pada area flare pada nada. Operasi ini menghapus elemen latar belakang yang tidak diinginkan, atau gradien yang disebabkan oleh iluminasi yang tidak seragam, dan digunakan dalam aplikasi computer vision untuk meningkatkan pengenalan dan segmentasi objek. Perkalian dapat digunakan antara gambar skala abu-abu untuk menerapkan topeng skala abu-abu, digunakan dalam beberapa kasus untuk memadukan lapisan dalam aplikasi pengeditan gambar.

80. Peningkatan menggunakan operasi logis

Beberapa gambar juga dapat digabungkan menggunakan operasi logika. Operasi logika seperti AND, OR dan NOT memeriksa satu (dalam kasus NOT) atau beberapa nilai dan mengembalikan hasil 1 atau 0 tergantung pada kriteria tertentu. Mereka digunakan dalam masking gambar, di mana topeng biner digabungkan dengan gambar menggunakan operasi DAN atau ATAU. Operasi logis cenderung digunakan dalam pengomposisian gambar untuk menutupi dan menggabungkan elemen tertentu dari gambar yang berbeda. Mereka adalah dasar dari beberapa metode penopengan dan pencampuran yang digunakan dalam lapisan gambar dalam aplikasi seperti Adobe Photoshop.

81. Pemrosesan titik: Operasi statistik

Histogram Gambar



Gambar 6.8 Fungsi Kuantisasi. (a) Sebuah fungsi yang menghasilkan empat level output (gambar 2-bit). (b) Gambar asli. (c) Gambar dikuantisasi menjadi empat tingkat keluaran. (d) Gambar dikuantisasi hingga 16 tingkat keluaran.

Nilai piksel gambar dapat dianggap sebagai variabel acak yang mengambil nilai antara 0 dan nilai maksimum (255 untuk gambar 8-bit). Histogram adalah grafik batang statistik (diskrit) dari sebuah distribusi frekuensi, di mana sumbu x mewakili rentang nilai data dan sumbu y untuk frekuensi kemunculannya. Histogram gambar adalah alat penting, yang memungkinkan kita untuk mengevaluasi kisaran intensitas dalam gambar (Gambar 27.11). Mari kita tunjukkan histogram $h(f)$, dan setiap nilai individu dalam histogram adalah:

Ekuasi 27.9

$$h(f_k) \approx n_k$$

di mana f_k adalah tingkat keabuan ke- k pada fungsi gambar $f(i, j)$ dan n_k adalah jumlah piksel pada tingkat tersebut.

82. Fungsi Densitas Probabilitas dan Fungsi Distribusi Probabilitas

Fungsi densitas probabilitas (PDF) gambar adalah plot $p(f)$ dari probabilitas piksel yang mengambil setiap tingkat abu-abu. Ini dapat diperkirakan dengan menormalkan histogram:

Ekuasi 27.10

$$P(f_k) \approx \frac{n_k}{N}$$

dimana N adalah jumlah total piksel pada gambar.

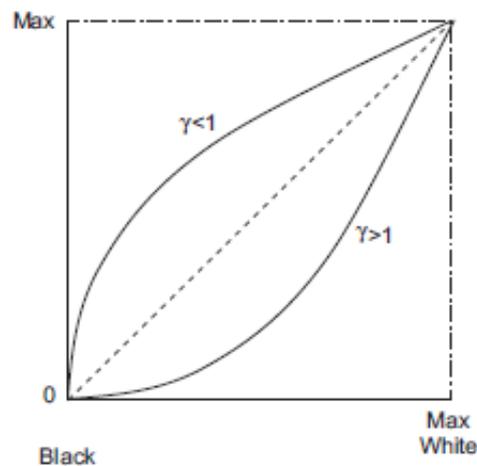
Distribusi lain yang terkait dengan variabel acak adalah fungsi distribusi probabilitas, atau fungsi distribusi kumulatif, di mana $P(f_k)$ adalah probabilitas bahwa $f \leq f_k$. Dalam gambar, ini adalah plot probabilitas kumulatif terhadap nilai piksel, dengan setiap nilai distribusi sesuai dengan probabilitas bahwa piksel akan memiliki nilai kurang dari atau sama dengannya. Karena distribusinya kumulatif, fungsinya selalu meningkat secara monoton, dan rentangnya adalah $0 \leq P(f) \leq 1$ (karena probabilitas piksel akan mengambil nilai kurang dari atau sama dengan nilai piksel maksimum adalah 1).

Fungsi distribusi probabilitas adalah integral dari fungsi densitas probabilitas dan oleh karena itu:

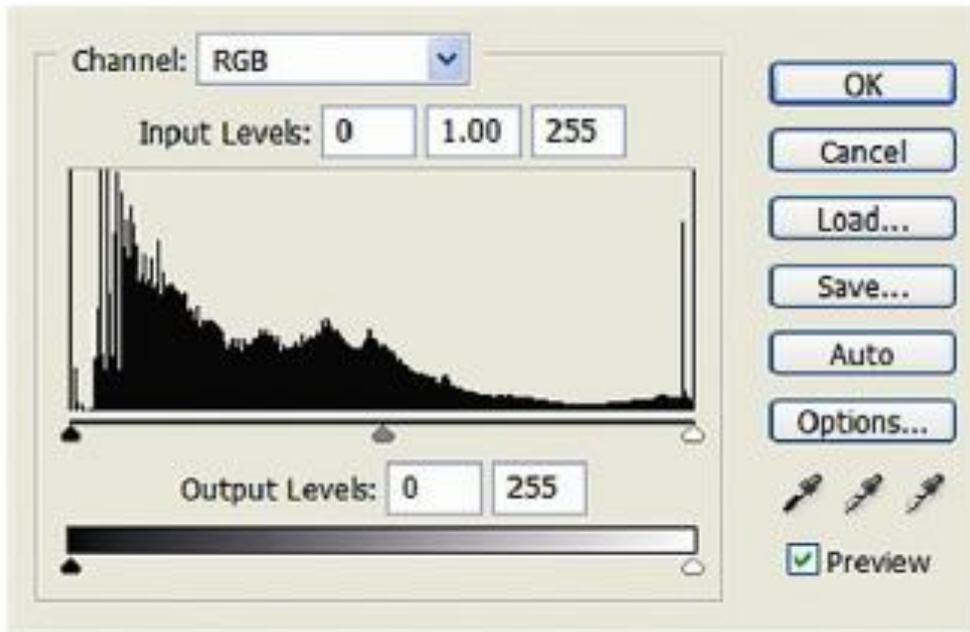
Ekuasi 27.11

$$f(f) = \frac{dP(f)}{df}$$

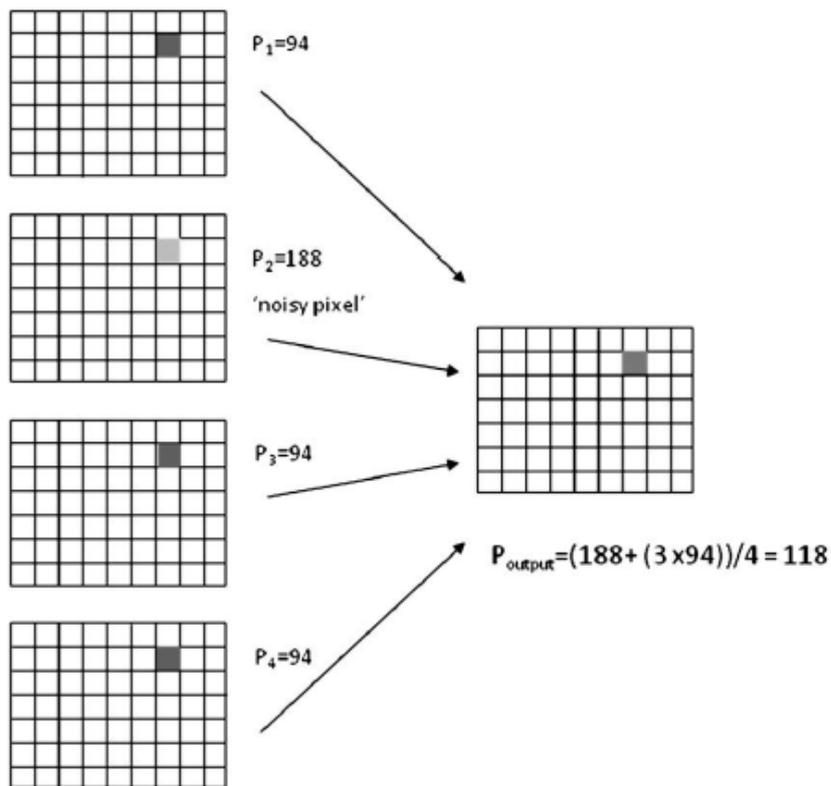
Seperti yang dijelaskan di Bab 25, menggunakan tangkapan atimage histogram adalah metode yang akurat untuk menilai eksposur. Tampilan histogram memberikan informasi yang berguna tentang gambar, seperti eksposur dan kontras keseluruhan, nada dominan dalam gambar, dan yang terpenting apakah eksposur telah memotong sorotan atau bayangan dan perlu penyesuaian. Penyesuaian pada histogram dikenal sebagai operasi statistik.



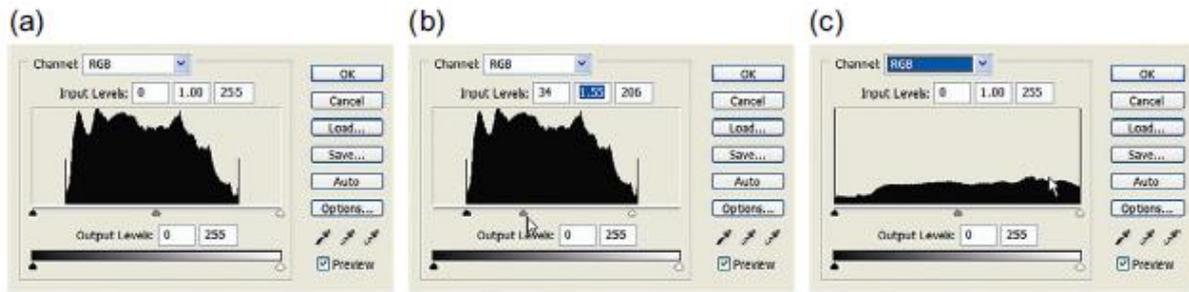
Gambar 4.9 Transformasi intensitas power-law. Kedua fungsi tersebut menggambarkan $c = 1, g > 1$ dan $c = 1, g < 1$. Setiap fungsi gamma saling mengoreksi.



Gambar 4.11 Gambar histogram.



Gambar4.10 Penghapusan noise menggunakan image averaging. Nilai piksel keluaran dihitung sebagai rata-rata nilai piksel pada posisi yang sama dari keempat gambar masukan. Nilai piksel tinggi tunggal pada gambar masukan kedua secara efektif dihapus



Gambar 4.12 Histogram geser dan peregangan menggunakan penyesuaian level. (a) Histogram asli tidak menggunakan berbagai nilai. (b) Memindahkan bayangan dan menyoroti slider ke tepi nilai histogram gambar menerapkan peregangan histogram ke nilai. Menggeser nilai nada tengah melakukan slide histogram. (c) Histogram akhir yang mencakup berbagai nilai.

83. Slide histogram dan perentangan

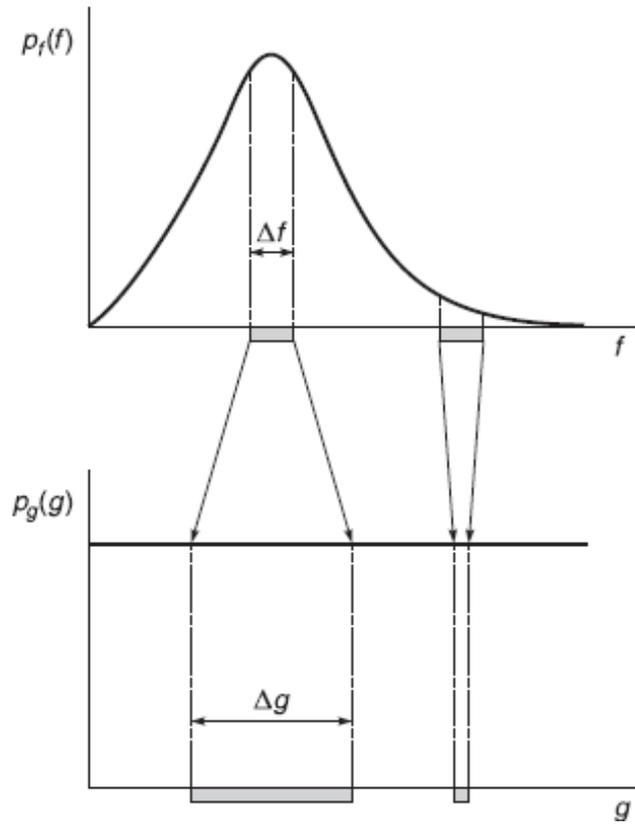
Operasi peningkatan histogram paling sederhana melibatkan menggeser semua nilai ke satu arah atau yang lain, atau merentangkannya untuk menutupi rentang nilai piksel yang tersedia. Slide histogram dilakukan dengan menambahkan atau mengurangi konstanta ke semua nilai piksel dalam histogram, yang menggeser semua nilai secara lateral di sepanjang sumbu intensitas horizontal. Ini mencapai perubahan dalam eksposur keseluruhan gambar dan dapat mengakibatkan kompresi dalam dynamic range dan pemotongan nilai. Peregangan histogram dilakukan dengan mengalikan semua nilai piksel dengan konstanta yang, jika lebih besar dari 1, akan merentangkan nilai. Sebuah bentangan histogram umumnya akan menghasilkan posterisasi nilai. Histogram poster memiliki tampilan seperti sisir sebagai hasil dari celah di antara level, yang menunjukkan bahwa beberapa nilai piksel tidak akan muncul dalam gambar dan ini dapat menghasilkan kontur visual di area dengan gradasi warna yang mulus; oleh karena itu, harus digunakan dengan hati-hati. Untuk mempertahankan nilai tergelap dalam gambar, slide histogram dapat dilakukan untuk ‘mematok ‘ nilai terendah di nol sebelum histogram membenteng. Penyesuaian ‘Level ‘ dalam aplikasi seperti Adobe Photoshop melibatkan kombinasi operasi ini (Gambar 27.12).

84. Ekuasi histogram

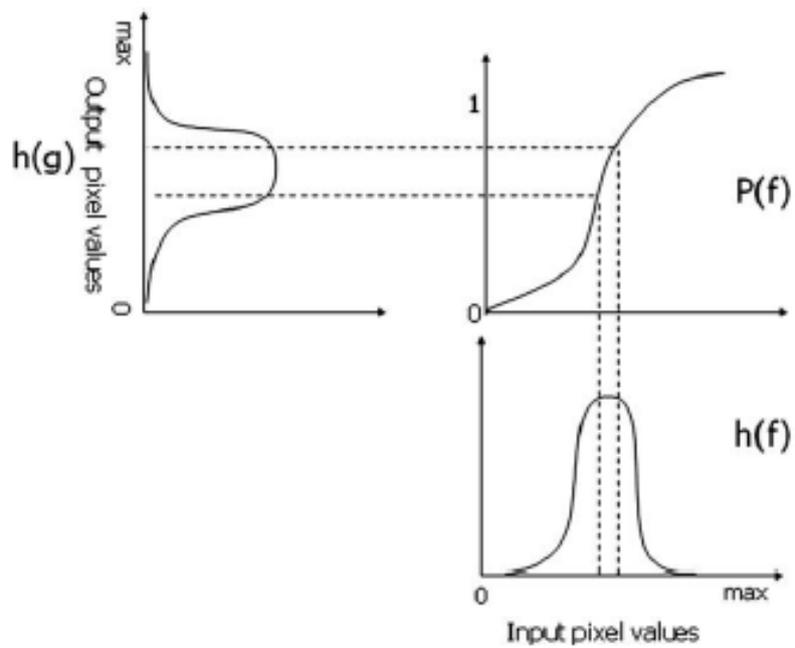
Metode yang lebih kompleks untuk peningkatan histogram, pemerataan histogram adalah proses otomatis, menghasilkan fungsi transformasi untuk gambar dari distribusi nilai itu sendiri. Ini didasarkan pada asumsi bahwa informasi penting dalam gambar terkandung di area PDF tinggi (puncak dalam histogram). Dengan merentangkan nilai histogram secara selektif, kontras dapat ditingkatkan di area PDF tinggi, sambil mengompresi area PDF rendah, yang berisi nilai lebih sedikit.

Prinsip di balik metode tersebut dapat dipahami dengan mengacu pada Gambar 27.13.

Tujuan dari pemerataan histogram adalah untuk mengubah gambar input PDF $p_f(f)$ menjadi fungsi aflat seperti $p_g(g)$, di mana semua nilai kemungkinannya sama, sebagai hasil dari peregangan selektif dan kompresi nilai. Karena kedua fungsi dinormalisasi, jumlah piksel dalam interval level abu-abu Δf sama dengan jumlah piksel dalam Δg , yaitu.



Gambar 4.13 Prinsip pemerataan histogram.



Gambar 4.14 Fungsi distribusi probabilitas digunakan sebagai fungsi transformasi untuk menghasilkan histogram yang disamakan.

Ekuasi 27.12

$$P_f(f)\Delta f = P_g(g)\Delta g$$

yang seperti itu:

Ekuasi 27.13

$$P_g(g) = p_f(f) \frac{\Delta f}{\Delta g}$$

yang karena Δf dan Δg cenderung menghasilkan nol:

Ekuasi 27.14

$$P_g(g) = p_f(f) \frac{df}{dg} = \text{konstan}$$

Membiarkan konstanta = k:

Ekuasi 27.15

$$\frac{df}{dg} = k p_f(f)$$

Mengintegrasikan kedua sisi sehubungan dengan f memberikan:

Ekuasi 27.16

$$g = k \int_0^f p_f(x) dx$$

di mana x adalah variabel dummy integrasi. Mengingat bahwa fungsi distribusi probabilitas adalah integral dari PDF:

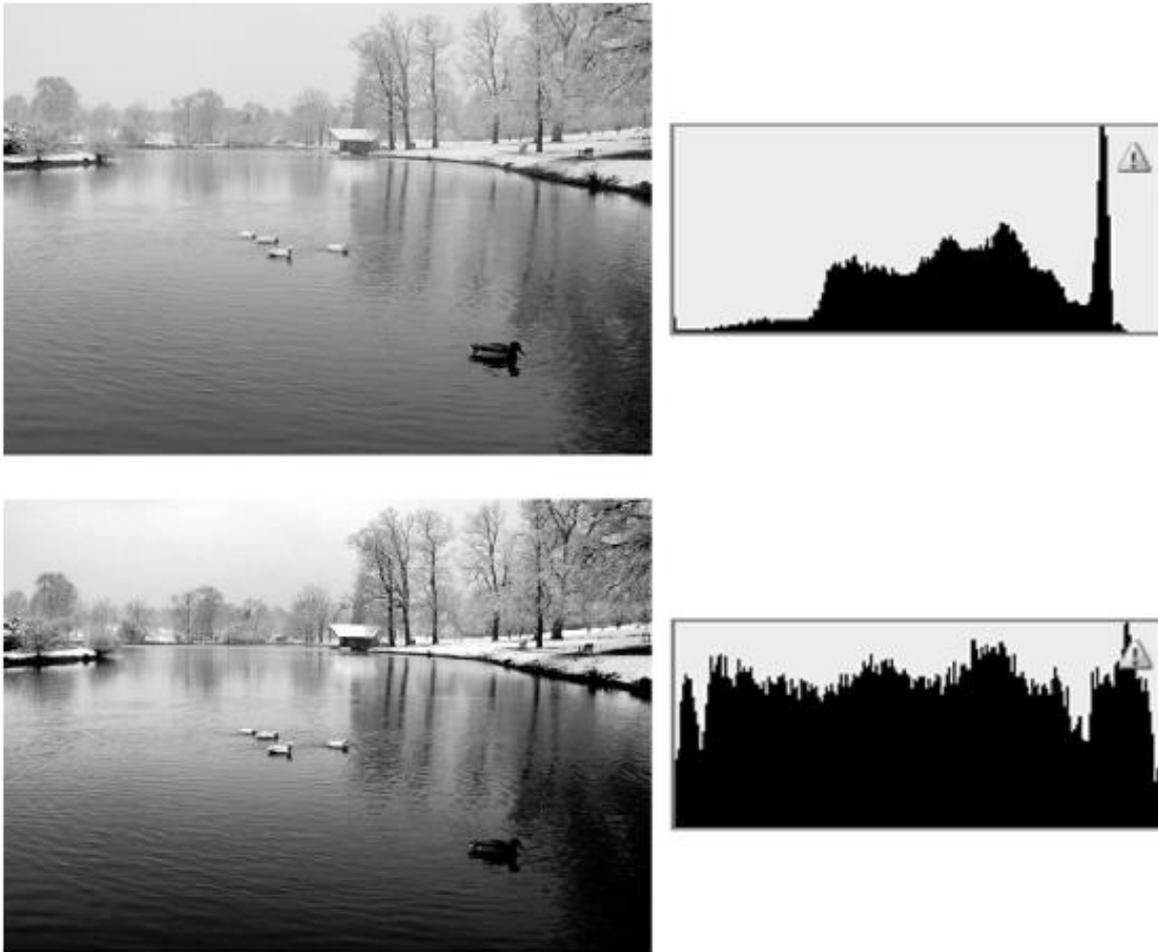
Ekuasi 27.17

$$g = k P_f(f)$$

Oleh karena itu, transformasi intensitas yang diperlukan untuk mendapatkan g adalah versi berskala dari fungsi distribusi probabilitas gambar masukan. Faktor skala adalah nilai maksimum L-1.

Dalam praktiknya, nilai piksel adalah bilangan bulat dan integral diperkirakan dengan mengambil jumlah berjalan dari histogram. Karena gambar keluaran juga harus dikuantisasi menjadi bilangan bulat, histogram tidak datar seperti yang digambarkan pada Gambar 27.13. Ini diregangkan dan dikompresi untuk mempertahankan integral lokal yang konstan, tetapi kuantisasi berarti bahwa beberapa nilai piksel tidak digunakan dan celah muncul di histogram. Proses menggunakan fungsi distribusi probabilitas diilustrasikan pada Gambar 27.14 dan contoh menggunakan gambar skala abu-abu 8-bit pada Gambar 27.15.

Perlu diketahui bahwa pemerataan histogram merupakan proses otomatis yang selalu memberikan hasil yang sama pada gambar tertentu. Ini hanya berguna jika informasi penting terkandung dalam nilai piksel yang paling sering muncul. Dalam keadaan lain, salah satu metode interaktif yang sudah dijelaskan, atau metode alternatif yang langsung mengedit fungsi transformasi, seperti dalam penyesuaian kurva, akan lebih cocok.



Gambar 4.15 gambar dari Gambar 27.4 beserta histogramnya sebelum dan sesudah pemerataan histogram.

85. Pemrosesan Titik : Transformasi Geometri

Ada beberapa persilangan antara operasi yang dilakukan untuk menyempurnakan gambar dan yang diterapkan untuk pemulihan gambar. Meskipun beberapa metode yang dijelaskan di sini mengoreksi cacat citra, metode tersebut harus dibedakan dari pendekatan yang lebih formal yang digunakan dalam restorasi citra, yang dibahas dalam Bab 28. Secara umum, koreksi gambar yang diterapkan dalam domain spasial cenderung membutuhkan masukan pengguna, hasil dinilai secara subyektif sebelum pemrosesan lebih lanjut diterapkan. Sebaliknya, metode yang diterapkan dalam pemulihan citra, yang mungkin juga mengoreksi degradasi (seperti kabur, misalnya) yang diperkenalkan oleh sistem atau kondisi pencitraan, menghasilkan model degradasi yang obyektif dan memulihkan gambar menggunakan model ini. Seperti yang ditunjukkan pada Bab 28, metode seperti itu biasanya diterapkan dalam domain frekuensi.

Koreksi distorsi geometris, seperti distorsi barel atau bantalan, sering dilakukan secara interaktif menggunakan transformasi geometris, juga disebut transformasi spasial, yang didasarkan pada proses pengambilan sampel. Juga digunakan saat bagian gambar dipilih dan dipindahkan di sekitar gambar. Operasi pemetaan yang mengubah posisi gambar nilai piksel, menggunakan transformasi matriks pada koordinat piksel. Mereka dapat diterapkan sebagai transformasi maju atau terbalik, misalnya posisi piksel dalam gambar asli diubah

ke posisi baru dalam gambar keluaran, atau posisi piksel dalam gambar keluaran dipetakan kembali untuk menemukan nilainya sesuai dengan posisinya di gambar asli (lihat Gambar 25.2). Metode mana pun yang digunakan umumnya melibatkan dua tahap, transformasi spasial itu sendiri dan interpolasi tingkat abu-abu (atau warna). Pengecualiannya adalah saat gambar diterjemahkan dengan bilangan bulat piksel atau saat diputar 90° atau kelipatannya. Dalam kasus ini, setiap posisi koordinat piksel akan dipetakan secara tepat ke posisi piksel lain dan tidak diperlukan interpolasi. Namun, dalam banyak kasus, proses pemetaan menghasilkan koordinat spasial yang berada di antara piksel dalam keluaran atau gambar asli (tergantung pada arah pemetaan). Jika pemetaan berada pada posisi antara piksel pada gambar keluaran, maka nilai piksel yang dipetakan harus dirata-ratakan dalam beberapa cara antara posisi piksel yang paling dekat dengannya. Jika pemetaan mundur ke gambar asli dan berada di antara piksel, maka nilai keluaran akan diinterpolasi dari piksel yang paling dekat dengan posisinya pada masukan. Penggunaan interpolasi tentu saja akan menurunkan kualitas gambar, menghasilkan berbagai artefak, seperti bagian tepi yang kabur. Metode interpolasi dibahas secara rinci di Bab 25.

Transformasi spasial yang paling sederhana adalah transformasi linier, seperti translasi, penskalaan, dan rotasi, yang dapat di-cascade atau digabungkan ke dalam matriks transformasi tunggal, yang mengurangi jumlah interpolasi. Garis yang lurus dan sejajar pada gambar masukan akan tetap demikian pada gambar keluaran. Untuk koreksi gambar, bagaimanapun, transformasi nonlinier lebih umum digunakan, yang dapat dianggap sebagai proses penyesuaian kurva dua dimensi. Gambar dimasukkan ke grid pengambilan sampel non-linier untuk menghilangkan distorsi.

86. Pemrosesan lingkungan: teknik penyaringan spasial

Metode yang dijelaskan sejauh ini merupakan proses berdasarkan operator yang diterapkan pada piksel individu, yang masing-masing dapat dianggap sebagai lingkungan 1×1 . Pendekatan yang dibahas dalam bagian ini, lebih dikenal sebagai filter spasial, melibatkan penghitungan setiap nilai piksel keluaran berdasarkan beberapa penghitungan dari lingkungan sekitar piksel masukan pada posisi yang sama. Ada dua kelas filter spasial, yang dibedakan berdasarkan pendekatan yang digunakan untuk memproses lingkungan sekitar.

87. Pemfilteran Linier

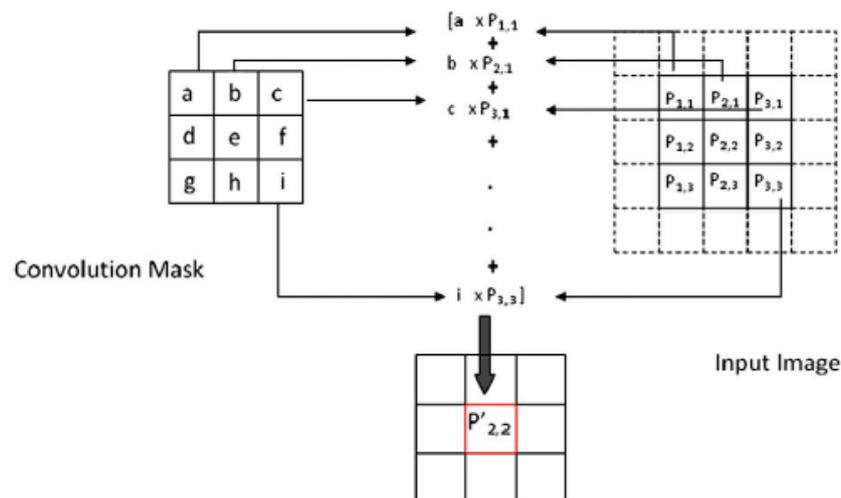
Konvolusi penting dalam pemrosesan gambar digital sebagai dasar penyaringan spasial linier, tetapi diterapkan sebagai operasi diskrit. Konvolusi kontinu diperkenalkan pada Bab 7. Integral dalam konvolusi kontinu (Ekuasi 7.30) diganti dengan penjumlahan dalam konvolusi diskrit, yang jauh lebih sederhana untuk dipahami dan diterapkan. Sekali lagi, fungsi konvolusi diputar dan digeser di atas fungsi statis. Ini dijelaskan sebelumnya untuk dua dimensi dalam Ekuasi 27.4.

Fungsi konvolusi dalam filter spasial linier adalah filter mask atau kernel, yang merupakan larik angka (biasanya persegi), yang nilainya akan menentukan efek filter pada gambar. Topeng umumnya lebih kecil dibandingkan dengan gambar dan dimensi ganjil, biasanya 3×3 atau 5×5 . Pada setiap posisi piksel pada gambar, topeng dipusatkan di atas piksel dan nilainya dikalikan dengan nilai piksel gambar di lingkungan yang sesuai, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 27.16. Nilai yang dihasilkan kemudian dijumlahkan untuk menghasilkan nilai keluaran. Ini diringkas oleh:

Ekuasi 27.18

$$g(i, j) = f \otimes h = \sum_{m=-a}^a \sum_{n=-b}^b h(m, n)g(i - m, j - n)$$

dimana bayangannya adalah f , filter h , ukurannya $M \times M$ dan $a = b = (M-1)/2$. Perhatikan kesamaannya dengan Ekuasi 27.4: perbedaannya ada pada batas penjumlahan, a dan b , yang hanya mendefinisikan lingkungan sebagai setengah lebar filter dari piksel pusat di kedua sisi dan di atas dan di bawah. Keluaran, $h(i, j)$ adalah nilai konvolusi pada posisi (i, j) dan menjadi nilai piksel pada posisi ini pada gambar keluaran. Mask kemudian dipusatkan di atas piksel masukan berikutnya, dan proses ini diulangi melintasi baris dan kolom bawah sampai semua nilai piksel telah diproses.



Gambar 4.16 Pemfilteran konvolusi. (a-i) Nilai pada mask digunakan untuk mengalikan nilai gambar sebelum penjumlahan untuk menghasilkan keluaran. Subskrip piksel mengacu pada posisi yang sesuai di topong.

Masalah dalam implementasi muncul di batas gambar, karena filter overhang saat berada di tengah piksel di bagian paling tepi gambar, dengan beberapa nilai mask tidak memiliki nilai piksel yang sesuai dalam gambar. Ada sejumlah solusi untuk masalah ini:

1. Pertahankan filter dalam batas gambar, yang berarti piksel tepi tidak akan diproses dan gambar keluaran akan lebih kecil. Untuk mempertahankan ukuran gambar yang sama, nilai piksel masukan untuk baris dan kolom ini dapat disimpan dalam gambar keluaran, tetapi kemungkinan akan terlihat berbeda dari yang lain.
2. Ubah ukuran dan bentuk filter di sudut dan tepi gambar, sehingga hanya nilai gambar nyata yang digunakan dalam penghitungan. Kesalahan dalam nilai keluaran tidak mungkin terlihat seperti pada metode di atas, meskipun ini bisa jadi rumit untuk diterapkan.
3. Padatkan tepi gambar dengan nol, atau tingkat abu-abu konstan lainnya, dengan memberikan nilai 'salah' untuk penghitungan. Gambar keluaran akan memiliki ukuran yang sama dengan masukan, tetapi nilai yang salah akan mengubah nilai yang dihitung dan akan menjadi lebih terlihat saat ukuran filter bertambah.
4. Asumsikan bahwa gambar melampaui batasnya, baik sebagai fungsi periodik, di mana baris dan kolom pertama diulang setelah yang terakhir, atau dengan mencerminkan nilai

tepi di tepinya. Gunakan nilai ekstra untuk kalkulasi tetapi kembalikan gambar dengan ukuran yang sama seperti aslinya.

88. Properti Filter Linier

Ada sejumlah sifat konvolusi. Mereka diringkas di sini karena penting dalam pemrosesan gambar. Yang pertama adalah komutatifitas, didefinisikan oleh aturan berikut:

Ekuasi 27.19

$$f \otimes g = g \otimes f$$

Yang kedua adalah konvolusi bersifat asosiatif, yaitu

Ekuasi 27.20

$$f \otimes g \otimes h = (f \otimes g) \otimes h = f \otimes (g \otimes h)$$

Filter linier memiliki sejumlah properti penting berdasarkan properti konvolusi:

Jika dua atau lebih filter linier diterapkan secara berurutan ke sebuah gambar, mereka akan menghasilkan hasil yang sama terlepas dari urutan penerapannya.

Saat dua atau lebih filter digabungkan dan hasilnya diterapkan pada gambar, ini menghasilkan hasil yang sama seperti jika filter diterapkan secara terpisah.

Filter linier dapat diterapkan dalam domain spasial atau frekuensi, menggunakan teorema konvolusi (dijelaskan dalam Bab 7), yaitu filter linier spasial apa pun memiliki ekuivalen domain frekuensi.

89. Jenis Filter Linier dan Pengaplikasiannya

Filter linier secara umum terbagi menjadi dua kategori, meskipun ada banyak adaptasi untuk tujuan tertentu. Secara umum, menghaluskan filter spasial, seperti namanya, mengaburkan gambar dengan menghilangkan detail halus sambil mempertahankan struktur besar dalam gambar. Aplikasi utamanya adalah menghilangkan noise, meskipun ada sejumlah filter non-linier yang dapat bekerja lebih baik, meskipun dengan hasil yang kurang dapat diprediksi. Jenis filter utama lainnya memiliki efek sebaliknya, yaitu meningkatkan detail halus. Ini dikenal sebagai filter pendeteksian tepi atau penajaman, tergantung pada bagaimana penerapannya dan untuk tujuan apa.

Seperti dijelaskan dalam Bab 7, konten gambar dapat dipertimbangkan dalam istilah frekuensi spasial. Area dengan perubahan intensitas yang halus dapat digolongkan sebagai frekuensi rendah, sedangkan perubahan intensitas yang tiba-tiba seperti tepi mengandung frekuensi tinggi. Efek dari dua kelas filter yang berbeda juga dapat dipertimbangkan dalam kaitannya dengan efeknya pada frekuensi dalam gambar: filter penghalus akan mengurangi nilai yang berubah dengan cepat, yaitu frekuensi tinggi, tetapi meninggalkan area yang berubah dengan mulus sebagian besar tidak terpengaruh. Karena itu, kadang-kadang mereka disebut filter lintasan lambat (mereka melewati frekuensi rendah). Dengan cara yang sama, filter deteksi tepi meningkatkan atau melewatkan frekuensi tinggi. Karenanya mereka dikenal sebagai filter high-pass. Sebenarnya, nama-nama ini merujuk pada ekuasi domain frekuensi dari filter spasial, tetapi digunakan secara bergantian dalam beberapa teks.

Karena salah satu aplikasi utama filter linier adalah untuk menghasilkan rata-rata tertimbang lingkungan, beberapa implementasi menyertakan langkah akhir, di mana nilai dari konvolusi dibagi dengan bobot topeng untuk rata-rata keluar nilai piksel dalam input gambar. Pendekatan yang lebih sederhana adalah memasukkan pembagian dalam nilai topeng, yang berarti bahwa hal itu secara otomatis dilakukan oleh proses konvolusi. Beberapa filter memiliki bobot nol, karena berisi nilai positif dan negatif. Contohnya adalah filter Laplacian, sejenis filter high-pass. Dalam kasus seperti itu, langkah pembagian harus dihilangkan.

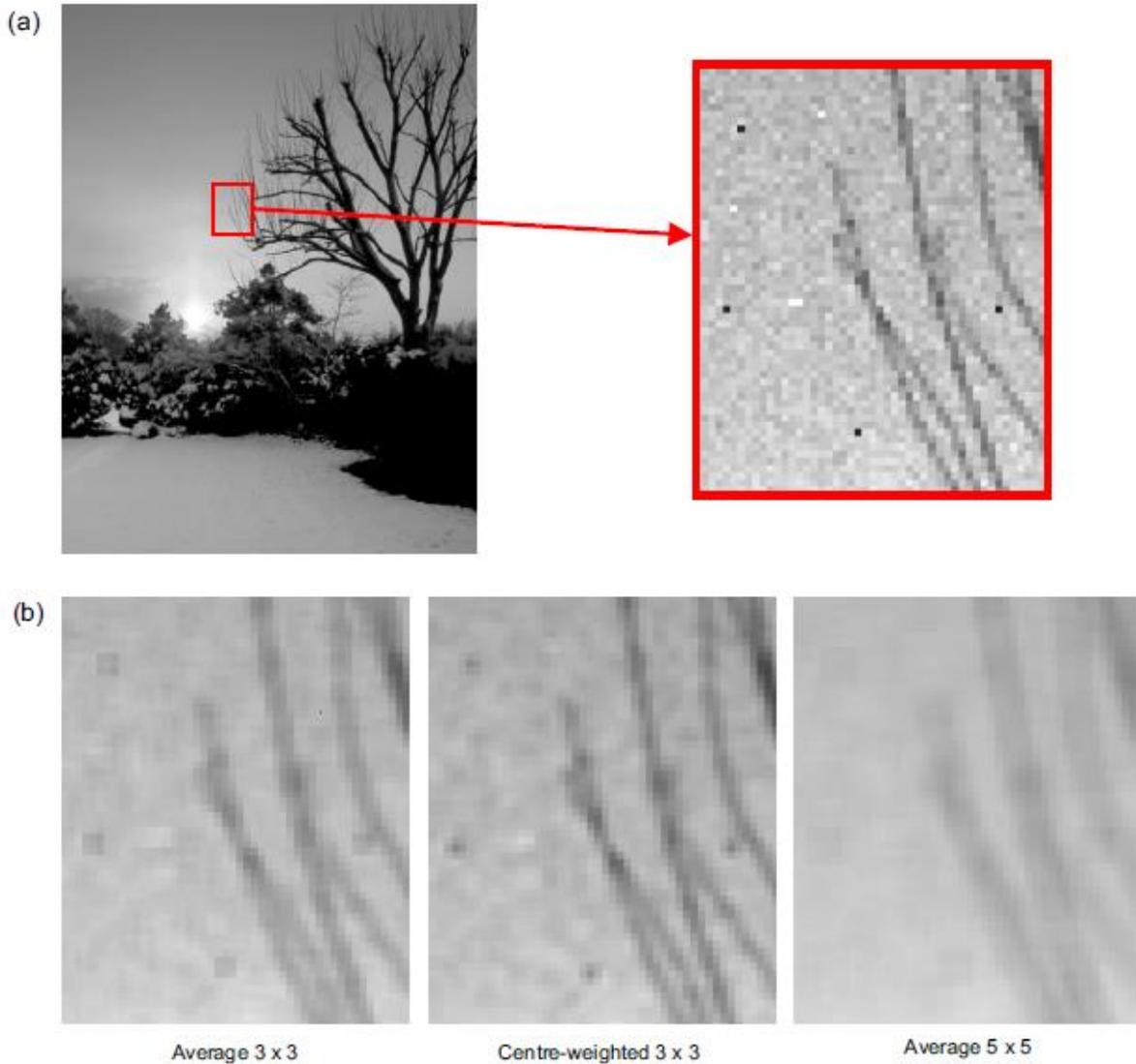
90. Filter spasial smoothing

Filter ini hanya berisi koefisien positif dalam mask dan digunakan untuk menghitung rata-rata lingkungan, oleh karena itu mereka disebut filter rata-rata. Hasil rata-rata adalah untuk menghilangkan atau mengurangi perubahan nilai intensitas secara tiba-tiba, dengan tetap mempertahankan nilai di wilayah yang homogen. Kernel filter untuk tipe paling sederhana dari rata-rata filter 3x3 ditunjukkan pada Gambar 27.17a. Seperti dibahas sebelumnya, rata-rata dapat dihitung dengan menggunakan topeng satu untuk memilih lingkungan dan membaginya dengan berat topeng setelah mengalikan dan menjumlahkan lingkungan. Atau dapat dihitung dengan memasukkan bobot dalam nilai topeng, seperti dijelaskan di atas, yang berarti bahwa semua nilai topeng pada Gambar 27.17a menjadi 1/9.

(a)	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1								
1	1	1								
1	1	1								

(b)	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	1	2	1	2	4	2	1	2	1
1	2	1								
2	4	2								
1	2	1								

Gambar 4.17 Filter rata-rata: (a) filter rata-rata 3x3; (b) Filter rata-rata ruang tengah 3x3



Gambar 4.18 (a) Gambar asli dan close-up. Perhatikan piksel berisik yang aneh. (b) Perbandingan hasil yang diperoleh. Dari kiri ke kanan: filter rata-rata 3x3 sederhana, filter penghalus beban tengah, dan filter rata-rata 5x5.

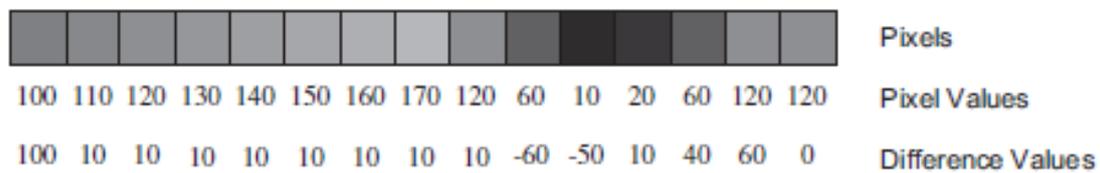
Menerapkan filter seperti itu ke gambar memiliki efek mengaburkan gambar; tujuan utamanya adalah untuk mengurangi noise gambar acak. Noise acak muncul sebagai fluktuasi mendadak dalam nilai piksel dibandingkan dengan tetangganya dan paling terlihat di area gambar yang seragam. Dengan rata-rata nilai piksel, diskontinuitas mendadak ini berkurang, menjadi lebih dekat dengan nilai tetangganya. Efek dari penerapan filter pada Gambar 27.17a ke gambar ditunjukkan pada Gambar 27.18b. Setelah penerapan filter, jelas bahwa noise telah dikurangi tetapi dengan mengorbankan sharpness gambar. Hasil yang lebih baik dapat diperoleh dengan menggunakan filter pada Gambar 27.17b. Filter ‘rata-rata pembobotan tengah’ ini memiliki nilai yang lebih tinggi di tengah topeng, yang berarti bahwa nilai piksel asli akan diberi bobot lebih tinggi daripada tetangganya. Lebih banyak fitur gambar asli akan dipertahankan, sehingga mengurangi keburaman tepi yang tidak diinginkan di dalam gambar (tengah, Gambar 27.18b). Output dari filter ini dibagi dengan 16, berat topeng.

Lingkungan yang lebih besar meningkatkan derajat keburaman gambar, karena jumlah nilai yang lebih besar digunakan untuk menghitung rata-rata (gambar terakhir pada Gambar

27.18). Dalam praktiknya, lingkungan yang lebih besar hanya digunakan dalam aplikasi khusus seperti segmentasi gambar, di mana tujuannya adalah untuk menghapus objek dengan ukuran tertentu dan biasanya dikombinasikan dengan teknik pemrosesan spasial lainnya untuk lebih meningkatkan objek tersisa yang diperlukan dan menangkalkan kaburnya tepi objek .

91. Deteksi edge dan mempertajam filter spasial

Jenis filter ini berisi nilai positif dan negatif di filter filter dan, dalam sebagian besar kasus, nilai mask saling meniadakan. Jadi, berat topeng adalah nol. Bentuk paling sederhana dari filter deteksi tepi adalah filter turunan pertama, yang mengambil perbedaan antara piksel yang berdekatan dalam arah tertentu sebagai perkiraan dari turunan pertama. Jenis filter ini terdiri dari set topeng arah, digunakan untuk mengidentifikasi tepi orientasi yang berbeda. Mereka sering digunakan dalam aplikasi segmentasi gambar.



Gambar 27.19 Turunan pertama dari baris piksel.

Perhatikan deretan nilai piksel pada Gambar 27.19. Perbedaan tersebut diperoleh dengan mengurangkan nilai sebelumnya dari setiap nilai piksel. Blok piksel pertama mewakili area dengan nada halus dalam gambar, yang diikuti oleh tepi gambar yang gelap. Catat hasil dalam perbedaan nilai dari operasi sederhana ini. Area nada halus menjadi nilai tunggal yang rendah (karena gradien berubah dengan jumlah yang sama). Namun, di tepi, nilai tiba-tiba menjadi besar, baik positif atau negatif, tergantung pada apakah tepi lebih terang atau lebih gelap dari nilai sebelumnya. Ada berbagai macam filter turunan pertama. Mereka cenderung memiliki lingkungan minimal 3x3, karena topeng yang lebih kecil dari ini sulit untuk diterapkan. Satu pengecualian adalah operator Roberts, yang terdiri dari dua topeng yang menyoroti tepi pada +45° dan -45°. Gambar 27.20 mengilustrasikan operator Roberts dan masker filter Prewitt 3x3 untuk tepi horizontal, vertikal, dan diagonal. Biasanya topeng digabungkan, menggunakan keempat atau lebih umum hanya topeng horizontal dan vertikal. Gambar terakhir dihasilkan dengan mengambil besaran gradien pada setiap titik yang didekati dengan menggunakan:

Ekuasi 27.21

$$Magnitud = \{(G_x)^2 + (G_y)^2\}^{\frac{1}{2}} \approx |G_x| + |G_y|$$

Karena ada perubahan gradien yang mengarah ke dalam dan ke luar tepi, filter turunan pertama menghasilkan tepi yang tebal, oleh karena itu filter ini cenderung lebih sering digunakan dalam mendeteksi tepi daripada dalam penajaman gambar. Filter turunan kedua lebih umum digunakan dalam peningkatan citra, khususnya penajaman, karena filter ini mendeteksi tepi ke segala arah menggunakan topeng tunggal dan cenderung menghasilkan tepi yang lebih halus daripada turunan pertama. Turunan kedua didekati dengan mengambil selisih antara nilai selisih yang diturunkan dari turunan pertama. Ini diimplementasikan menggunakan filter Laplacian, suatu bentuk filter high-pass, dua versi diilustrasikan pada

Gambar 27.21. Dalam kasus ini, nilai di tengahnya positif dan semua nilai lainnya negatif. Namun, topeng dapat memiliki nilai sentral negatif dan nilai positif disekitarnya.

(a)

-1	0	1	0
0	1	0	-1

(b)

-1	-1	-1	-1	0	1
0	0	0	-1	0	1
1	1	1	-1	0	1
-1	-1	0	1	1	0
-1	0	1	1	0	-1
0	1	1	0	-1	-1

Gambar 4.20 (a) topeng filter Roberts. (b) Masker prewittfilter.

Karena nilai tinggi (positif atau negatif) di tengah filter Laplacian, dikelilingi oleh nilai-nilai kecil dari tanda yang berlawanan, efek pada gambar lebih terasa daripada yang dihasilkan oleh operator turunan pertama. Filter secara dramatis menekankan perubahan mendadak pada area lokal, menghasilkan nilai tinggi, sementara frekuensi rendah secara efektif disetel ke frekuensi nol yang muncul sebagai flare pada nada abu-abu atau hitam. Gambar pada Gambar 27.21b mengilustrasikan properti Laplacian untuk menghasilkan tepian halus, tetapi dalam beberapa kasus tepian ganda, dan kecenderungannya untuk menekankan noise. Masalah implementasi muncul sebagai akibat dari berbagai nilai yang dihasilkan, yang dapat mencakup nilai positif negatif dan sangat tinggi. Jika gambar seperti itu ditampilkan pada monitor 8-bit, maka nilai negatif akan dipotong menjadi hitam dan nilai positif tinggi menjadi putih. Beberapa metode skala intensitas harus diterapkan pada gambar sebelum ditampilkan untuk menginterpretasikan hasil dengan benar, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 27.21c.

Gambar keluaran dari high-pass filter yang diilustrasikan sejauh ini hanya terdiri dari tepi yang disempurnakan dengan dalam gambar, karena semua informasi lain telah disetel ke nilai 'latar belakang'. Proses ini dapat dilihat dari segi pengurangan informasi frekuensi rendah (yang merupakan keluaran dari filter low-pass) dari gambar asli:

Ekuasi 27.22

$$\text{High pass} = \text{Original} - \text{Low pass}$$

Metode kamar gelap yang banyak digunakan, dikembangkan pada tahun 1930-an, untuk meningkatkan tampilan sharpness gambar fotografis yang dikenal sebagai penyamaran tidak tajam. Ini telah menginspirasi pengembangan berbagai padanan digital untuk mempertajam gambar. Topeng tak tajam fotografis adalah positif yang sedikit kabur yang diperoleh dengan mencetak kontak negatif ke bagian film kontras rendah lainnya, yang kemudian diapit dengan gambar negatif untuk menghasilkan gambar yang dipertajam. Ketika keduanya diapit bersama dan cahaya menyinari mereka, sebagian positif (karena

kontrasnya yang lebih rendah) mengurangi sebagian informasi frekuensi rendah dari negatif. Meskipun kedua gambar tersebut dalam register, tepinya tidak terlalu cocok; oleh karena itu, lebih sedikit informasi yang dibatalkan di area tepi. Efeknya adalah peningkatan kontras lokal di bagian tepi dibandingkan dengan gambar keseluruhan. Menggabungkan keduanya mengurangi dynamic range dari gambar yang diperbesar, yang karenanya dicetak pada kertas kontras tinggi untuk mengatasi hal ini, tetapi peningkatan kontras tepi tetap ada. Kontras tepi yang lebih tinggi dibandingkan dengan hasil gambar lainnya dalam pemotretan berlebih dan penurunan dalam densitas di kedua sisi tepi. Kombinasi efek tepi ini sering disebut garis Mackie.

(a)

-1	-1	-1	0	-1	0
-1	8	-1	-1	4	-1
-1	-1	-1	0	-1	0



Gambar 4.21 (a) Masker filter Laplacian. (b) gambar dengan filter Laplacian. (c) gambar berskala Laplacian berskala.

Penajaman gambar digital menggunakan high-pass filter menggunakan prinsip yang sama seperti unsharp masking, menggunakan kombinasi output filter dengan gambar asli; tepinya secara efektif ditambahkan kembali ke dalam gambar. Kasus paling sederhana menambahkan (atau mengurangi, tergantung pada apakah koefisien pusat Laplacian positif atau negatif) gambar yang disaring Laplacian ke gambar asli. Namun, hasil yang lebih baik mungkin diperoleh dengan menggunakan variasi dari metode ini, yang dikenal sebagai high-boost filtering, yang merupakan adaptasi digital dari unsharp masking. Metode masking unsharp yang dijelaskan di atas bukan hanya pengurangan yang dijelaskan oleh

Ekuasi 27.22. Kontras gambar ditingkatkan untuk memperhitungkan pengurangan dynamic range sebagai akibat dari penjepitan positif dan negatif. Dalam pemfilteran tingkat tinggi, hal ini dicapai dengan mengalikan gambar dengan konstanta A yang lebih besar dari 1:

Ekuasi 27,23

$$\text{High boost} = A(\text{Original}) - \text{low pass}$$

Ini sama dengan:

Ekuasi 27.34

$$\text{High boost} = (A - 1)(\text{Original}) + \text{Original} = \text{Low pass}$$

Dan mengganti Ekuasi 27.22 menjadi Ekuasi 27.24 mengarah ke:

Ekuasi 27.25

$$\text{High boost} = (A - 1)(\text{Original}) + \text{High pass}$$

Jika A sama dengan 1, maka ini adalah penambahan sederhana dari gambar Laplacian yang dijelaskan sebelumnya. Ini dapat dicapai dalam satu operasi dengan sedikit mengadaptasi topeng seperti pada Gambar 27.22. Penajaman gambar digital harus digunakan dengan hati-hati, karena penajaman berlebihan dapat menghasilkan artefak yang tidak diinginkan pada gambar, seperti peningkatan noise dan karakteristik halo artefak, terlihat pada Gambar 27.22, yang tampak dekat dengan tepi yang tajam. Ini adalah kelebihan dari efek overshoot dan undershoot yang dijelaskan di atas, muncul sebagai lingkaran terang atau gelap di sekitar tepi, yang muncul sebagai wilayah terang di sekitar tepi gelap (atau sebaliknya).

Di sini perlu disebutkan filter unsharp mask yang biasanya tersedia dalam perangkat lunak pengedit gambar. Ini biasanya merupakan filter adaptif, menggunakan prinsip yang sama seperti masking unsharp tradisional karena filter tersebut menggunakan versi gambar yang kabur sebagai mask (bukan filter high-pass yang digunakan dalam filter high-boost). Versi buram dibandingkan dengan versi asli dan, dengan menggunakan nilai 'ambang', hanya nilai piksel yang perbedaannya lebih besar dari ambang batas yang diubah. Hal ini mengurangi masalah peningkatan noise, yang berarti bahwa filter hanya menyempurnakan tepi, tetapi berarti bahwa prosesnya tidak lagi linier.

(a)

-1	-1	-1
-1	9	-1
-1	-1	-1



Gambar 4.22 (a) Kernel filter dengan peningkatan tinggi. (b) Gambar dipertajam menggunakan filter penguat tinggi. Perhatikan artefak halo di sekitar cabang pohon dalam versi yang diasah.

92. Filter spasial non-linier

Metode pemfilteran non-linier, tidak seperti metode linier, tidak melibatkan kombinasi gambar dengan nilai mask. Masker hanya digunakan untuk memilih nilai piksel lingkungan. Nilai piksel diurutkan berdasarkan intensitasnya (karenanya ini juga dikenal sebagai statistik urutan atau filter peringkat) dan nilai keluaran untuk piksel pusat ditentukan berdasarkan statistik lingkungan dan efek yang diperlukan. Mask kemudian melangkah ke piksel berikutnya, sepanjang baris dan kolom bawah. Filter non-linier bukanlah pelestarian informasi: tidak mungkin untuk kembali ke gambar asli setelah difilter. Selain itu dan yang paling penting, karena tidak didasarkan pada teori sistem konvolusi dan linier, tidak ada ekuasi domain frekuensi. Mereka bisa sangat berguna dalam peningkatan citra, bagaimanapun, seringkali menghasilkan hasil yang lebih baik daripada operasi yang setara dengan menggunakan filter linier.

93. Filter median

Mungkin filter non-linier yang paling banyak digunakan, filter median hanya memilih nilai median dari lingkungan tersebut. Ini adalah cara yang efektif untuk menghilangkan

nilai ekstrim, yang sering kali berhubungan dengan noise pixel dan merupakan ciri khas dari beberapa jenis gangguan digital. Keuntungan utama penghilangan noise menggunakan median filter daripada menghaluskan filter linier adalah fakta bahwa filter ini mempertahankan lebih banyak kontras lokal dan posisi serta lokalisasi tepinya. Gambar 27.23 membandingkan hasil dari filter linier bobot tengah 3x3 dan filter median 3x3 yang diterapkan secara tunggal dan pada sejumlah iterasi. Jelas terlihat bahwa pinggirannya jauh lebih lunak oleh filter median. Penerapan berulang-ulang dari filter penghalus akan menghasilkan tepi yang semakin kabur dan nilai piksel semakin mendekati nilai rata-rata.

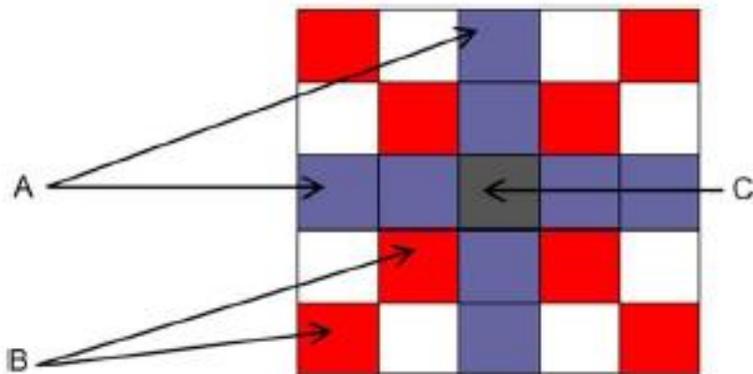
Bagian close-up gambar pada Gambar 27.23e mengilustrasikan salah satu masalah dengan median filter yang dapat membuatnya kurang cocok untuk peningkatan gambar gambar. Gambar dengan filter median akan mulai menampilkan artefak posterization, yang muncul sebagai blok nada, di mana banyak nilai telah bergerak menuju nilai median yang sama. Namun, ini mungkin tidak menjadi masalah dalam aplikasi analisis gambar yang memerlukan penghilangan noise, tetapi sharpness dan posisi tepi harus dipertahankan.

Sifat median yang non-linier berarti bahwa hasil yang diperoleh tidak selalu dapat diprediksi, terutama jika median tersebut diterapkan pada gambar berwarna. Median pada saluran red, green, dan blue mungkin sangat berbeda, dan kombinasi ketiganya mungkin tidak menghasilkan warna yang terkait dengan warna di lingkungan aslinya. Hal ini dapat diatasi dengan mengubah gambar ke mode $L^*a^*b^*$ dan hanya menyaring saluran lightness (L^*). Karena nilai yang diasosiasikan dengan noise gambar seringkali berbeda ringan dengan tetangganya, maka penghilangan noise dapat dicapai tanpa memengaruhi rona piksel aslinya.

Kerugian lebih lanjut dari filter statistik pesanan adalah bahwa proses pengurutan setiap lingkungan bisa lambat. Jumlah nilai yang akan disortir dapat dikurangi dengan menggunakan lingkungan parsial, dicapai dengan mengubah bentuk lingkungan tetapi tetap mempertahankan tingkat piksel yang dicakupnya. Contohnya adalah filter median hybrid, yang digambarkan pada Gambar 27.24. Lingkungan ini dibagi menjadi tiga sub-lingkungan, yang ditunjukkan pada gambar; A adalah himpunan piksel horizontal dan vertikal sejajar dengan piksel pusat, B piksel sejajar dengan piksel pusat dan C piksel pusat. Median A dan B diambil, lalu median himpunan dari dua nilai ini dan C adalah nilai keluaran akhir. Median hibrid juga dikenal sebagai median pengawet tepi, karena mempertahankan garis halus dan tidak membulat, karakteristik dari filter median standar.



Gambar 4.23 Penghapusan noise. (a) Gambar asli dengan debu dan goresan. (b) filter pemulusan linier beban tengah 3x3. (c) filter median 3x3, satu aplikasi. (d) filter median 3x3, lima aplikasi. (e) Close-up bagian dari (d), menggambarkan artefak dari median filter.



Gambar 4.24 Filter median hibrid. Nilai keluaran diperoleh dari: Hybrid median = Median {Median (A), Median (B), C}.

Alternatif lain adalah filter median terpotong, yang bertujuan untuk menggeser nilai median yang dihitung lebih dekat ke mode distribusi nilai. Tidak mungkin menghitung mode untuk lingkungan kecil yang mungkin tidak memiliki nilai yang terjadi lebih dari sekali. Filter median yang terpotong memperkirakan mode dengan menghitung rata-rata lingkungan dan membuang nilai atau nilai terjauh darinya, kemudian menghitung median dari piksel yang tersisa.

94. Filter Minimum dan maksimum

Menghasilkan nilai minimum dan maksimum di lingkungan dapat bermanfaat. Mengekstrak nilai minimum menghilangkan nilai tinggi ganjil dari lingkungan. Saat filter minimum berpindah dari area gelap ke area terang, nilai di tepi area terang akan disetel ke nilai gelap, yang secara efektif mengikis tepinya. Oleh karena itu, filter ini terkadang dikenal sebagai filter erosi. Erosi adalah jenis operasi morfologi. Ini adalah proses yang memeriksa atau mengekstrak struktur dari suatu gambar. Filter maksimum atau dilasi memiliki efek sebaliknya, menghilangkan nilai tinggi yang aneh dan melebarkan tepi area terang dalam gambar.

Filter ini berguna untuk tujuan pencitraan yang lebih umum bila digabungkan untuk menghasilkan filter penghilang noise adaptif, filter pseudomedian, yang umumnya dikenal sebagai filter degraining. Filter ini dirancang untuk menghilangkan bintik gelap dan terang di lingkungan sekitar, terutama karakteristik noise gambar. Lingkungan parsial 5x5, yang hanya terdiri dari sembilan piksel termasuk yang pusat, dibagi menjadi set tiga piksel berturut-turut: [(a,b, c), (b, c, d), (c, d, e), (c, h, i)] (Gambar 27.25). Dua operasi kemudian diterapkan; yang pertama adalah operasi maximin, memilih nilai maksimum dari himpunan semua minimum lingkungan:

Ekuasi 27.26

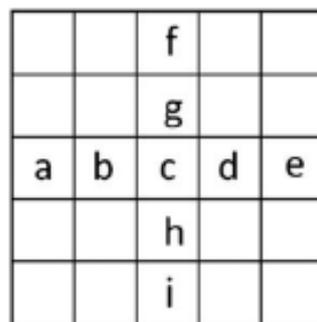
$$Maximin = Max[\min(a, b, c), \min(v, c, d), \min(c, d, e) \dots \min(c, h, i)]$$

yang menghilangkan titik terang dari lingkungan, diikuti oleh operator minimax:

Ekuasi 27.27

$$minimax = Min[\max(a, b, c), \max(v, c, d), \max(c, d, e) \dots \max(c, h, i)]$$

yang menghilangkan bintik-bintik hitam di lingkungan sekitar.



Gambar 4.25 Filter pseudomedian.

BIBLIOGRAFI

- Eggleston, J., 1984. *Sensitometry for Photographers*. Focal Press, London, UK.
- James, T.H., 1977. *The Theory of the Photographic Process*, fourth ed. Macmillan, New York, USA.
- Proudfoot, C.N. (Ed.), 1997. *Handbook of Photographic Science and Engineering*. IS&T Springfield, VA, USA.
- SMPTE, 1963. *Principles of Colour Sensitometry*. Society of Motion Picture and Television Engineers, New York, USA.
- Thomas, W. (Ed.), 1973. *SPSE Handbook of Photographic Science and Engineering*. Wiley, New York, USA.
- Todd, H.N., Zakia, R.D., 1974. *Photographic Sensitometry*. Morgan & Morgan, Hastings-on-Hudson second ed., New York, NY, USA.
- Barten, P.G.J., 2000. *Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality*. SPIE Press, USA.
- Bruce, V., Green, P.R., Georgeson, M.A., 1996. *Visual Perception: Physiology, Psychology and Ecology*. Psychology Press, Hove, UK.
- Dowling, J.E., 1987. *The Retina: An Approachable Part of the Brain*. Belknap Press of the Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.
- Falk, D., Stork, D., 1986. *Seeing the Light: Optics in Nature, Photography, Color Vision and Holography*. Harper & Row, New York, USA.
- Gordon, S., 2000. *The Aging Eye*. Simon & Schuster, New York, USA.
- Hubel, D.H., 1989. *Eye, Brain and Vision*. Scientific American Library, New York, USA.
- Jackson, R., MacDonald, L., Freeman, K., 1994. *Computer Generated Colour*. Wiley, Chichester, UK.
- Marr, D., 1982. *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. W.H. Freeman, San Francisco, UK.
- McDonald, R. (Ed.), 1987. *Colour Physics for Industry*. Society of Dyers and Colorists, Bradford, UK.
- Ray, S., 1994. *Applied Photographic Optics*, second ed. Focal Press, London, UK.
- Weizer, J.S., Fekrat, S. (Eds.), 2006. *All About Your Eyes*. Duke University Press, Durham, USA.
- Fraser, B., Murphy, C., Bunting, F., 2005. *Real World Color Management*, second ed. Peachpit Press, Berkeley, CA, USA.
- Green, P., MacDonald, L., 2002. *Colour Engineering: Achieving Device Independent Colour*. Wiley, Chichester, UK.

Sharma, A., 2004. Understanding Color Management. Delmar Learning, Thomson Learning, New York, USA.

Sharma, G. (Ed.), 2003. Color Imaging Handbook. CRC Press LLC, New York. Wallner, D. Building ICC Profiles - The Mechanics and Engineering. Available to download from www.color.org Available online from the International Color Consortium website. www.color.org.

International Color Consortium 2004. Specification ICC.1:2004-10 (profile version 4.2.0.0). Image Technology Colour Management - architecture, profile format, and data structure available online from the International Color Consortium website, www.color.org

International Standards Organization 2004. ISO 22028-1:2004. Photography and Graphic Technology - Extended Colour Encodings for Digital Image Storage, Manipulation and Interchange, Part 1: Architecture and Requirements. Available online from www.ISO.org Evolution, Structure and Color Rendering Options. ICC white paper 6 2004.

Adobe RGB 1998 Color Image Encoding, version 2005-05, 2005. Adobe Systems Inc.

Day, E.A., Taplin, L., Berns, R.S., 2004. Colorimetric characterization of a computer-controlled liquid crystal display. Color Research and Application 29 (5), 365e373.

Fairchild, M.D., Wyble, D.R., Johnson, G.M., 2008. Matching image color from different cameras. Proceedings of the SPIE/IS&T 's Electronic Imaging 2008: Image Quality & System Performance Conference, Vol. 6808.

Green, P., MacDonald, L. (Eds.), 2002. Colour Engineering: Achieving Device Independent Colour. Wiley, Chichester, UK.

IEC 61966-2-1:1999, 1999. Multimedia Systems and Equipment - Colour Measurement and Management, Part 2-1: Colour Management - Default RGB Colour Space - sRGB.

IEC 61966-2-2:2003, 2003. Multimedia Systems and Equipment - Colour Measurement and Management, Part 2-2: Colour Management - Extended RGB Colour Space - scRGB.

IEC 61966-2-4:2006, 2006. Multimedia systems and equipment - Colour Measurement and Management, Parts 2e4: Colour Management - Extended-Gamut YCC Colour Space for Video Applications - xvYCC.

ISO 22028-1:2004, 2004. Photography and Graphic Technology - Extended Colour Encodings for Digital Image Storage, Manipulation and Interchange, Part 1: Architecture and Requirements.

ISO 17321-1:2006, 2006. Graphic Technology and Photography – Colour Characterisation of Digital Still Cameras (DSCs), Part 1: Stimuli, Metrology and Test Procedures.

ISO/TS 22028-2:2006, 2006. Photography and Graphic Technology - Extended Colour Encodings for Digital Image Storage, Manipulation and Interchange, Part 2: Reference Output Medium Metric RGB Colour Image Encoding (ROMM RGB).

ISO/TS 22028-3:2006, 2006. Photography and Graphic Technology - Extended Colour Encodings for Digital Image Storage, Manipulation and Interchange, Part 3: Reference Input Medium Metric RGB Colour Image Encoding (RIMM RGB).

Kang, H.R, 2006. Computational Color Technology. SPIE, WA, USA.

MacDonald, L.W., 1993. Gamut mapping in perceptual colour space. Proceedings of the IS&T/SID 's 1st Color Imaging Conference, 193-196.

Sharma, G. (Ed.), 2003. Digital Color Imaging Handbook. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Spaulding, K., 1999. Requirements for unambiguous specification of a color encoding: ISO 22028-1. Proceedings of the IS&T/SID 's 10th Color Imaging Conference, 106-111.

Susstrunck,S.,Buckley,R.,Swen,S,1999. Standard RGB color spaces. Proceedings of the IS&T/SID 's 7th Color Imaging Conference, 127-134.

Triantaphillidou, S., 2001. Aspects of Image Quality in the Digitisation of Photographic Collections. Ph.D. thesis, University of Westminster, UK.

ICC Version 2 and Version 4 Display Profile Differences.

ICC white paper 7 2004. The Role of ICC Profiles in a Colour Reproduction System.

ICCwhitepaper92005.CommonColor Management Workflows and Rendering Intent Usage.

ICC white paper 17 2005. Using ICC Profiles with Digital Camera Images.

ICC white paper 20 2005. Digital Photography Color Management Basics.

ICC white paper 23 2008. RGB Color Managed Workflow Example. All the above are available to download from www.color.org

Standards and specifications

International Color Consortium, 2001. Specification ICC.1:2001-04. File Format for Color Profiles.

White papers

ICC white paper 4 2004. Color Management Conceptual Overview,

SEMIOTIKA DESAIN

Sarwo Nugroho, S.Kom., M.Kom.



YAYASAN PRIMA AGUSTEKNIK

ISBN 978-623-96089-0-3 (PDF)



9 786239 608903