

NIRMANA

PENGANTAR ILMU WARNA



NIRMANA

PENGANTAR ILMU WARNA

Edy Jogatama Purhita, S.Sn., M.Ds.



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :

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

ISBN 978-623-6141-12-0



9 786236 141120

NIRMANA PENGANTAR ILMU WARNA

Edy Jogatama Purhita, S.Sn., M.Ds.



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

NIRMANA, PENGANTAR ILMU WARNA

Penulis :

Edy Jogatama Purhita, S.Sn., M.Ds.

ISBN : 9 786236 141120

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 **NIRMANA** dengan harapan untuk dapat dipergunakan oleh kalangan para akademisi.

Tujuan utama penyusunan buku ini adalah untuk memudahkan mahasiswa dalam memahami dan mengerti tentang pengantar ilmu warna. Buku teks ini mempelajari tentang berbagai jenis gambar serta teori warna, 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

Edy Jogatama Purhita, S.Sn., M.Ds.

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
PENGANTAR ILMU WARNA.....	1
Pengantar.....	1
Fisika Warna.....	1
Terminologi Warna.....	2
Warna Benda.....	4
Absorptansi Spektral, Pantulan Dan Transmittansi.....	4
Illuminasi Standar CIE Dan Tampilan Geometri.....	6
Sumber Dan Illuminasi Standar CIE.....	7
Model Colour Vision.....	8
Dasar-Dasar Kolorimetri.....	11
Fungsi Pencocokan Warna Dan Pengamat Standar CIE.....	14
Menghitung Nilai Tristimulus Dari Data Spektral.....	16
Diagram Kromatisitas.....	19
Perbedaan Warna Dan Ruang Warna Sragam CIE.....	22
Metamerisme Dan Jenis Kecocokan Metamerik.....	25
Munculnya Warna.....	28
Adaptasi Visual Dan Mekanisme Terkait.....	28
Fenomena Penampilan Warna Lainnya.....	31
Pengantar CAT Dan CAM.....	34
CAT Umum.....	34
Colour Appearance Models(CAM)/Model Penampakan Warna.....	35
Reproduksi Warna.....	36
Tujuan Reproduksi Warna.....	37
Instrumen Yang Digunakan Dalam Pengukuran Warna.....	38
Melihat Kondisi.....	39

SISTEM MANAJEMEN WARNA	41
Pengantar.....	41
Tugas Manajemen Warna	41
Manajemen warna Closed-Loop versus Open-Loop	42
ICC (International Color Consortium).....	44
Arsitektur Manajemen Warna ICC	45
PCS (Profile Connection Space).....	46
Rendering Intens	47
Media referensi perseptual intens ICC dan kondisi tampilan referensi	50
Profil ICC.....	50
Penggunaan Profil.....	52
Model Pemrosesan Profil.....	54
Struktur Profil.	57
Struktur Profil Device (Perangkat).....	59
Struktur profil konversi ruang warna.....	61
Membuat profil perangkat kustom.....	62
Profil Display	64
Profil Input.....	64
Profiling Scanner	65
Profiling Kamera Digital.....	65
Menggunakan Profil Kamera.....	66
Profil Output	66
Alur Kerja Manajemen Warna.....	70
Opsi Rendering Warna.....	70
Alur kerja Early-binding versus Late-binding	71
Alur Kerja RGB dan CMYK	72
Menggunakan Color Space (Ruang warna) tingkat menengah.....	73
Gambar Proofing dan Soft-Proofing.....	75
BIBLIOGRAFI	76

Pengantar Ilmu Warna

Pengantar

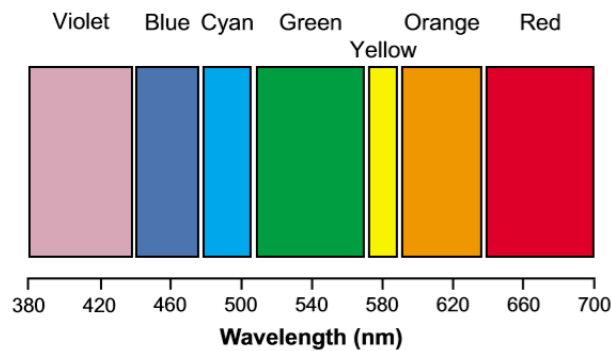
Pengantar fundamental dari deskripsi warna, pengukuran, evaluasi, dan penampilan. Pengetahuan tentang teori dan praktik terkini yang terkait dengan topik ini sangat penting dalam memahami bagaimana warna direkam, direproduksi, dan dikelola dalam media pencitraan, subjek yang akan diperkenalkan di pembahasan selanjutnya. Warna dievaluasi dengan berbagai cara. Fisikawan menggambarkan variasi intensitas panjang gelombang radiasi yang terlihat. Colorimetrists menjelaskan jumlah referensi primer yang, jika dicampur secara aditif, cocok dengan cahaya referensi tertentu. Ilmuwan sensorik menggambarkan respons pengamat sebagai hasil dari stimulasi mekanisme sensorik visual mereka. Tidak ada makna atau definisi tunggal yang melekat pada kata 'warna'. Meski kata tersebut bisa dimengerti oleh semua orang, jika kita diminta untuk mendefinisikan warna, jawabannya tidak begitu jelas. Lebih lanjut, jika diminta untuk mendeskripsikan warna tertentu, misalnya 'biru'. sulit untuk melakukannya tanpa menggunakan contoh, seperti 'biru adalah warna laut'.

Terlepas dari bagaimana kita menafsirkan kata tersebut, warna ada karena cara sistem visual kita menafsirkan cahaya dengan panjang gelombang yang berbeda. Ini bukan hanya fenomena fisik tetapi fenomena psikofisik (yaitu respons sensorik yang dihasilkan dari rangsangan fisik) atau hanya aspek persepsi visual. Bekerja dengan pencitraan warna telah membuat klasifikasi warna dan deskripsinya dalam hal angka menjadi penting. Beberapa sistem telah dirancang selama bertahun-tahun untuk tujuan tersebut. Metode Commission Internationale de l'Éclairage (CIE, atau International Commission of Illumination) diadopsi secara luas dan akan menjadi fokus utama pembahasan ini. CIE telah, sejak didirikan pada tahun 1913, mengembangkan standar dan prosedur metrologi di bidang pencahayaan, penglihatan, warna dan, yang lebih baru, pencitraan.

Fisika Warna

Bahwa cahaya putih dapat disebarkan melalui prisma menjadi cahaya dengan warna yang berbeda - ungu, nila, biru, hijau, kuning, oranye dan merah, 'semua warna pelangi' - dan bahwa rona ini sesuai dengan panjang gelombang yang berbeda. Panjang gelombang radiasi elektromagnetik yang terlihat berkisar dari sekitar 380 hingga 780 nm. Dalam praktiknya, cahaya tidak pernah terbuat dari satu panjang gelombang tetapi dari pita sempit atau kombinasi panjang gelombang yang besar. Cahaya yang terdiri dari satu panjang gelombang - atau pita sempit panjang gelombang - sangat jenuh warnanya. Warna-warna ini disebut sebagai warna spektral, atau warna spektral. Ini adalah kesempatan bagi kita untuk mencatat bahwa 'hue' dan 'color' bukanlah hal yang sama, seperti yang akan kita lihat selanjutnya, meskipun istilah tersebut sering digunakan secara bergantian.

Sementara Newton mengidentifikasi tujuh warna spektral yang tercantum di atas, deskripsinya sedikit berbeda dari yang dipahami saat ini. Secara khusus dia menggambarkan apa yang kita sebut 'biru' sebagai 'nila' dan 'biru-hijau' (atau 'cyan'), sebagai biru.



Gambar 1 Tujuh warna diidentifikasi dalam spektrum tampak, bersama dengan perkiraan rentang panjang gelombangnya.

Satu set nama yang direvisi ditunjukkan pada Gambar 1, yang menunjukkan warna spektral dan pita panjang gelombang yang sesuai.

Terminologi warna

Di bagian ini kami memberikan beberapa terminologi warna penting yang digunakan di seluruh buku ini. Definisi yang disajikan didasarkan pada definisi dari CIE International Lighting Vocabulary dan dari R.W.G. Publikasi Hunt (lihat Bibliografi).

Diterima secara luas bahwa warna memiliki tiga atribut persepsi utama, yang berkaitan dengan respons pengamat terhadap suatu warna, dan inilah mengapa warna sering disebut sebagai tiga dimensi:

- Istilah hue mengacu pada penampilan suatu warna yang didefinisikan serupa dengan salah satu warna primer perseptual, merah, kuning, hijau dan biru, atau kombinasi dari keduanya. Warna Achromatic adalah warna yang dipersepsikan tanpa rona (yaitu netral) dan warna kromatik adalah warna yang dipersepsikan memiliki rona.
- Colourfulness menunjukkan sejauh mana corak itu terlihat. Karenanya, pewarnaan nol untuk warna akromatis, rendah untuk warna pastel, tinggi untuk cat minyak, dan sangat tinggi untuk warna spektral. Untuk sebagian besar tingkat pencahayaan, warna yang dirasakan meningkat dengan peningkatan pencahayaan.
- Kecerahan (di masa lalu disebut sebagai luminositas) menunjukkan sejauh mana warna tampak menunjukkan lebih banyak atau lebih sedikit cahaya. Ini sangat tinggi untuk sumber cahaya, tinggi untuk putih, sedang untuk abu-abu dan coklat, dan rendah untuk kulit hitam. Warna yang dilihat dalam tingkat iluminasi tinggi biasanya terlihat lebih cerah daripada saat dilihat dalam tingkat iluminasi rendah. Misalnya, kaos berwarna Anda tampak lebih berwarna di bawah sinar matahari cerah daripada di hari yang membosankan.

Warna dapat dilihat dan dinilai dalam hubungannya dengan warna lain (dikenal sebagai warna terkait), atau dalam isolasi (warna yang tidak terkait), dan atribut persepsi dapat didefinisikan sesuai dengan situasi masing-masing.

Contoh nyata dari warna yang tidak berhubungan adalah lampu lalu lintas yang terlihat di malam hari. Sebagian besar aplikasi pencitraan menangani warna terkait, karena warna dalam gambar bercampur dan dinilai dalam hubungannya satu sama lain.

Hue, colourfulness dan brightness adalah atribut dari warna yang berhubungan dan tidak berhubungan; semuanya mengacu pada tingkat persepsi absolut. Sebaliknya, atribut persepsi

chroma dan lightness didefinisikan hanya untuk warna terkait dan mereka mengacu pada tingkat persepsi relatif, atau lebih khusus lagi penilaian relatif terhadap 'area yang sama diterangi:

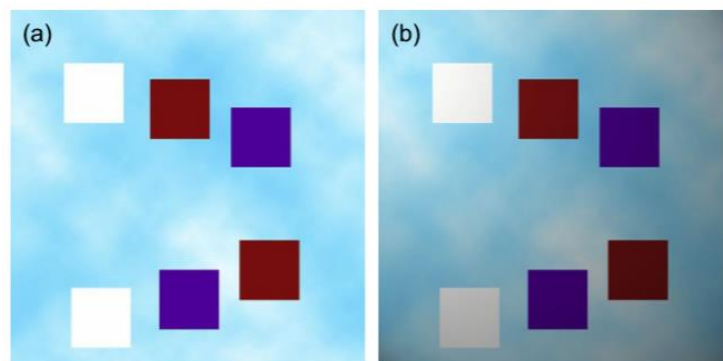
- Chroma didefinisikan sebagai warna suatu area yang dinilai sebanding dengan kecerahan dari area yang diterangi serupa yang tampak putih (atau sangat bertransmisi). Karenanya Chroma adalah warna yang relatif, yaitu relatif terhadap putih.
- Lightness didefinisikan sebagai kecerahan suatu area yang dinilai sebanding dengan kecerahan area yang diterangi serupa yang tampak putih (atau sangat bertransmisi). Karenanya Lightness adalah kecerahan relatif, yaitu relatif terhadap putih.

Kata sifat terang dan redup digunakan sehubungan dengan kecerahan, terang dan gelap sehubungan dengan terang, dan kuat dan lemah sehubungan dengan kroma.

Atribut persepsi lain yang berhubungan dengan warna-warni adalah saturasi, yang didefinisikan sebagai warna-warni suatu area yang dinilai secara proporsional dengan kecerahannya sendiri (bukan putih). Saturasi juga merupakan atribut relatif, tetapi itu relatif terhadap atribut lain dari objek itu sendiri, dan karenanya dapat digunakan untuk warna yang terkait dan tidak terkait.

Gambar 2 memberikan contoh atribut warna persepsi yang diperkenalkan di bagian ini. Pemandangan yang sama disajikan dalam dua kondisi iluminasi yang berbeda: di sebelah kiri pemandangan diterangi oleh sinar matahari langsung yang terang dan di sebelah kanan oleh cahaya yang menyebar pada hari musim dingin yang suram. Warna dalam pemandangan akan memiliki kecerahan dan kroma yang sama di kedua kondisi tampilan, karena terang dan kroma adalah atribut relatif; mereka dinilai sehubungan dengan orang kulit putih di tempat kejadian. Mereka juga akan memiliki saturasi yang sama, karena saturasi dinilai dengan memperhatikan kecerahan area itu sendiri. Sebaliknya, kecerahan dan warna-warni warna akan lebih tinggi pada hari yang cerah daripada pada hari yang suram, karena kedua atribut ini mengacu pada tingkat persepsi absolut.

Dalam warna kita berurusan dengan sifat persepsi dari stimulus dan kita menggunakan ukuran objektif untuk mengkomunikasikan kesan subjektif. Oleh karena itu penting untuk membedakan antara aspek persepsi, atau subyektif, dan objektif dari warna dan istilah subjektif dan objektif yang relevan. Semua istilah yang disebutkan hingga saat ini di bagian ini adalah istilah subjektif. Istilah obyektif umum yang relevan tercantum dalam Tabel 1. Beberapa di antaranya akan dijelaskan secara mendetail nanti.



Gambar 2 Gambar komputer simulasi warna yang terlihat pada hari yang cerah (a) dan pada hari berawan (b). Lightness, chroma dan saturation akan sama di kedua kondisi, sedangkan brightness dan colourfulness akan lebih tinggi pada hari yang cerah.

Tabel 1 Atribut warna perseptual dan ukuran objektif yang relevan		
Istilah subjektif	Istilah objektif	Simbol objektif
Hue	CIE 1976 hue angle	H^*_{uv}, h^*_{ab}
	Dominant wavelength	λ_d
Brightness	CIECAM02 brightness	Q
Colorfulness	CIECAM02 colourfulness	M
Lightness	CIE 1976 lightness	L^*
	CIECAM02 lightness	J
Chroma	CIE 1976 chroma	C^*_{uv}, C^*_{ab}
	CIECAM02 chroma	C
Saturation	CIE 1976 saturation	S_{uv}
	CIECAM02 saturation	S
	Purity	P_{uv}
Hue and Saturation	Chromacity	x, y, u', v'

Warna benda

Objek terlihat karena cahaya yang mereka pantulkan atau pancarkan. Objek berwarna tampak berwarna karena mereka menyerap beberapa panjang gelombang yang terjadi padanya dan selanjutnya memantulkan atau mengirimkan yang lain. Atap merah yang diterangi oleh cahaya putih, misalnya, tampak merah karena memantulkan lebih banyak panjang gelombang yang sesuai dengan rona merah daripada panjang gelombang yang sesuai dengan warna biru atau hijau yang diserap oleh bahan atap.

Jadi, warna objek ada karena interaksi tiga komponen: (1) kualitas spektral sumber cahaya yang menerangi objek; (2) sifat fisik dan kimia benda, yang memodulasi energi elektromagnetik yang berasal dari sumbernya; dan (3) sistem visual manusia. Energi elektromagnetik termodulasi yang berasal dari objek dicitrakan oleh mata, dideteksi oleh fotoreseptor dan diproses oleh mekanisme saraf untuk menghasilkan persepsi warna. Komponen-komponen tersebut menurut Fairchild (2004) membentuk 'segitiga warna'. yang ditunjukkan pada Gambar 3. Penting untuk dicatat bahwa sumber cahaya itu sendiri tidak hanya berinteraksi dengan objek tetapi juga dengan sistem visual manusia, karena keluaran spektral dan intensitas sumber cahaya memainkan peran penting dalam tampilan warna objek melalui adaptasi.

Absorptansi spektral, pantulan dan transmitansi

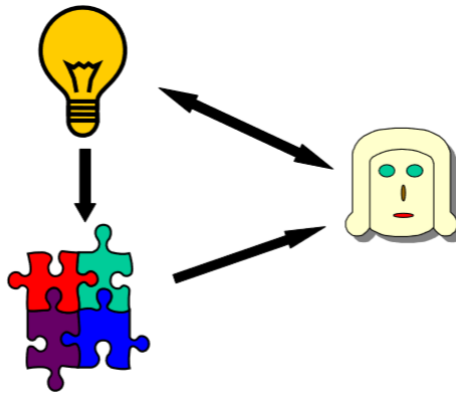
Absorpsi, refleksi dan transmisi adalah fenomena fisik yang terjadi ketika cahaya berinteraksi dengan materi. Energi radiasi yang diserap, dipantulkan atau ditransmisikan oleh suatu objek dapat dijelaskan dengan grafik di mana absorptansi absolut atau relatif, refleksi atau transmitansi diplot versus panjang gelombang (absorptansi spektral, reflektansi atau transmitansi), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Representasi ini, sering disebut sebagai spektrum objek, adalah ekuivalen untuk objek distribusi daya spektral relatif untuk media pemancar pancaran sendiri, seperti sumber cahaya. Jumlah daya radiasi yang diserap, dipantulkan, dan ditransmisikan harus berjumlah sama dengan energi radiasi yang terjadi pada suatu objek:

Ekuasi 1

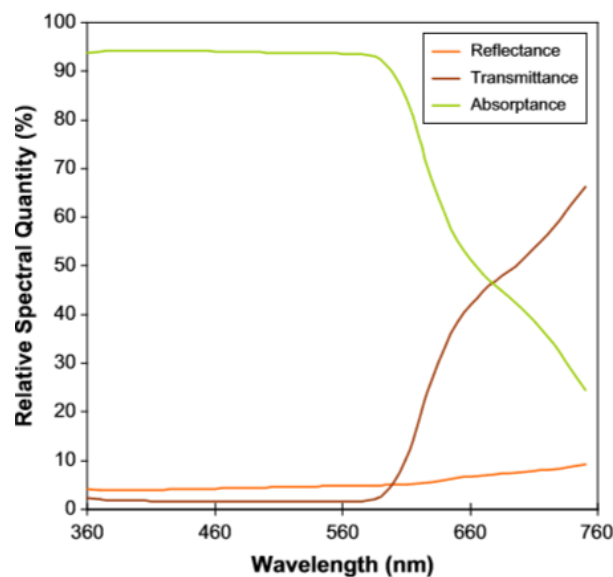
$$\Phi(\lambda) = A(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda)$$

dimana $\Phi(\lambda)$ adalah energi radiasi yang datang dalam radiasi flux, $A(\lambda)$ adalah flux yang diserap, $R(\lambda)$ adalah flux yang dipantulkan dan $T(\lambda)$ adalah flux yang ditransmisikan. Karena tiga kuantitas terakhir menjumlahkan energi insiden, mereka biasanya diukur dan disajikan dalam istilah relatif, seperti rasio fluks yang diserap, ditransmisikan atau dipantulkan dengan fluks yang datang, atau sebagai persentase (yaitu rasio $\times 100$). Perhatikan bahwa pengukuran rasio adalah subjek spektrofotometri, yang merupakan pengukuran rasio besaran radiometrik. Refleksi spektral dari beberapa objek berwarna diilustrasikan pada Gambar 5.

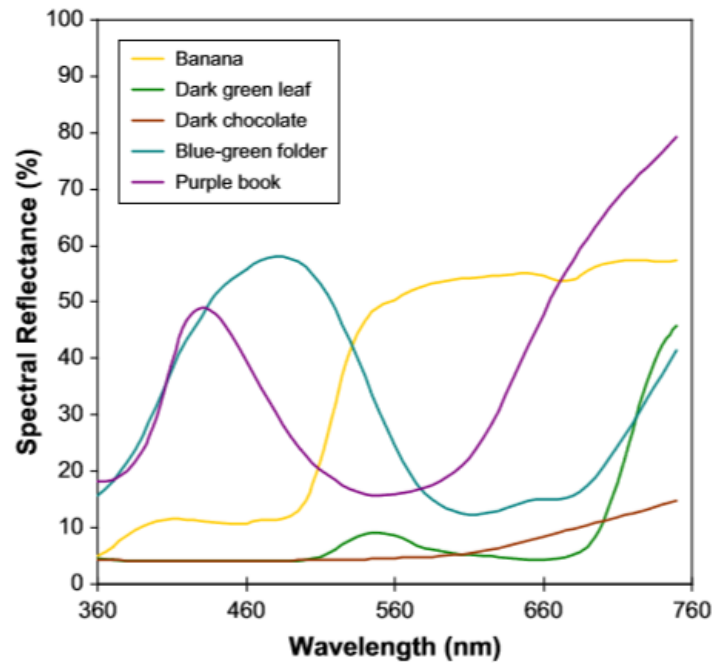
Interaksi energi elektromagnetik dengan objek bukan hanya fenomena spektral tetapi juga bergantung pada sudut pandang pengamat (atau alat ukur) terhadap objek, serta sudut iluminasi - iluminasi dan geometri. Contoh klasik adalah kertas foto gloss versus matte. Karena karakteristik geometris dari permukaan kertas gloss, cahaya dipantulkan secara spekuler dan warna tampak lebih hidup atau tersaturasi dibandingkan dengan warna pada kertas matte, yang darinya cahaya dipantulkan secara menyebar.



Gambar 3 Segitiga warna. Diadaptasi dari Fairchild (2004)



Gambar 4 Refleksi spektral relatif, transmitansi dan absorptansinya dari slide foto yang terkena cahaya merah.



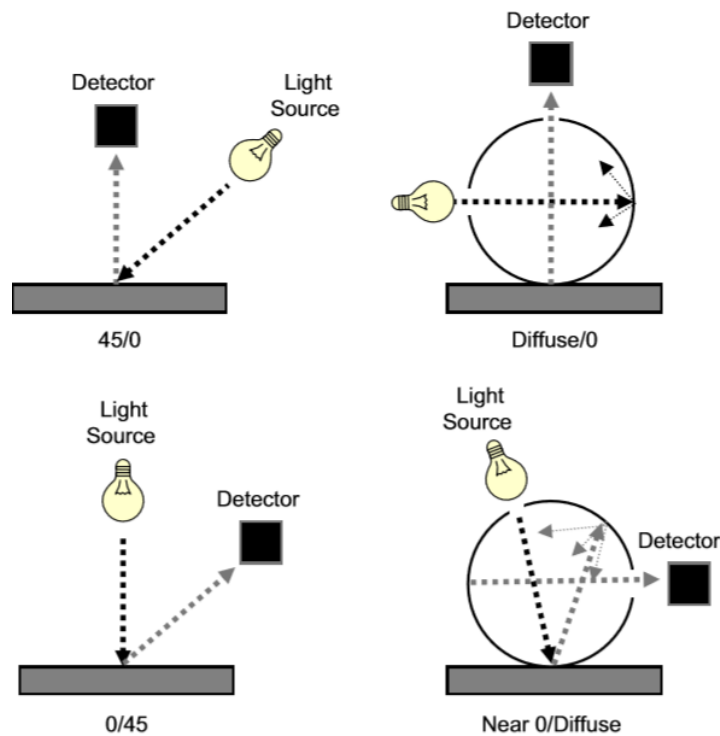
Gambar 5 Refleksi spektral benda umum

Iluminasi standar CIE dan tampilan geometri

Geometri iluminasi dan tampilan menjadi signifikan ketika warna objek dan material diukur. CIE telah menetapkan dua pasang iluminasi standar dan geometri tampilan untuk mengukur pantulan objek, diilustrasikan pada Gambar 6. Ini adalah:

1. *Diffuse/normal (d/0) dan normal/diffuse (0/d)*. Dalam geometri diffuse/normal, objek diterangi dengan cara menyebar, yaitu dari semua sudut, dan diukur dari sudut normal (yaitu tegak lurus) ke permukaan objek. Bola pengintegrasian digunakan untuk memberikan iluminasi difus; alat pengukur dipasang tegak lurus dengan permukaan pengukur. Dalam geometri diffuse/normal, objek diterangi pada sudut normal terhadap permukaannya dan diukur menggunakan bola terintegrasi. Pengukuran yang dilakukan dengan dua susunan geometris terbalik ini biasanya menghasilkan hasil yang sama. Mereka adalah pengukuran refleksi total dan digunakan untuk memberikan refleksi objek, didefinisikan sebelumnya sebagai rasio yang dipantulkan terhadap energi cahaya datang.
2. *45/normal (45/0) dan normal/45 (0/45)*. Pada geometri 45/normal benda diterangi dengan berkas sorotan cahaya pada sudut 45 dari normal dan diukur dari normal. Dalam susunan berlawanan, normal/45, benda diterangi pada sudut normal terhadap permukaannya dan pengukuran dilakukan dengan menggunakan balok pada sudut 45° dari normal. Kedua pengaturan geometris ini digunakan dalam aplikasi di mana objek berwarna mungkin memiliki berbagai tingkat kilap, misalnya kertas foto. Dalam pengukuran yang diperoleh dengan pengaturan ini, rasio pantulan energi cahaya datang sangat kecil, karena hanya sebagian kecil dari berkas pantulan yang dicatat. Mereka biasanya digunakan ketika faktor refleksi (lihat nanti) dari warna adalah tujuannya. Dalam hal ini pantulan objek dibandingkan dengan diffuser sempurna, media teoritis yang merupakan reflektor sempurna (yaitu memiliki 100% pantulan) dan pemancar Lambertian yang sempurna (yaitu menghasilkan fluks yang sama ke segala arah).

Pengukuran yang menyebar adalah hal yang biasa akhir-akhir ini; 45/0 atau 0/45 memberikan masalah dengan tekstur permukaan terarah, misalnya cetakan foto dengan tekstur seperti matte, mutiara, dll.



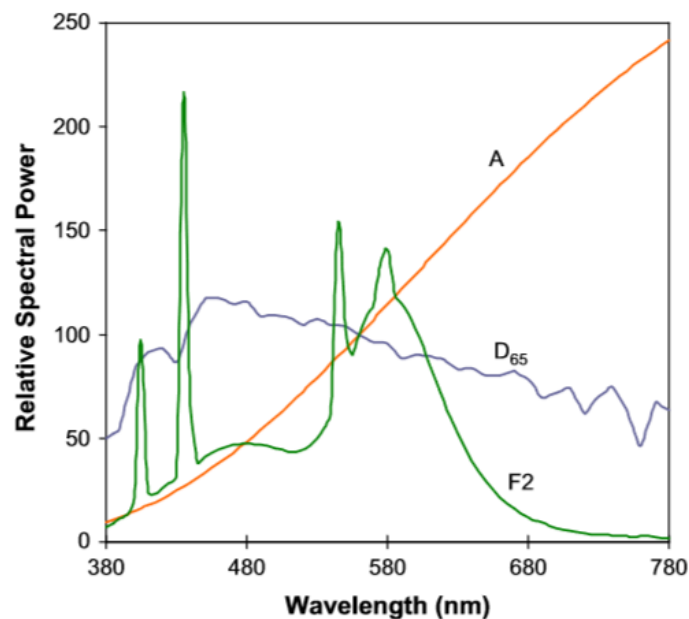
Gambar 6 Geometri tampilan standar.

Sumber dan Iluminasi standar CIE

CIE juga merekomendasikan sejumlah distribusi daya spektral, iluminan standar CIE, untuk digunakan dalam pengukuran warna (lihat contoh pada Gambar 7). Beberapa iluminan ini sesuai dengan ‘sumber cahaya nyata’ sedangkan beberapa lainnya mewakili distribusi ‘tujuan’. Penting untuk membedakan antara ‘sumber’ dan ‘iluminan’: sumber mewakili sumber cahaya fisik dengan distribusi daya spektral tertentu sedangkan iluminan adalah tujuan distribusi daya spektral, yang sengaja didefinisikan untuk melayani pengukuran warna dengan data spektral yang ditentukan oleh CIE. Iluminan CIE yang paling umum digunakan adalah:

1. *Penerangan CIE A.* Ini mewakili cahaya dari radiator Planckian pada suhu 2856K. Ini digunakan saat iluminasi pijar diinginkan.
2. *Penerangan CIE C.* Ini mewakili fase siang hari (yaitu sinar matahari ditambah cahaya langit) dengan suhu warna berkorelasi (CCT) 6774 K.
3. *Seri siang hari CIE.* Iluminan yang secara statistik ditentukan dari sejumlah besar pengukuran siang hari. Yang paling umum digunakan adalah: D65, dengan aCCT 6504 K, iluminan yang direkomendasikan jika diperlukan pengukuran siang hari, biasanya digunakan dalam aplikasi fotografi dan pencitraan; D55, dengan CCT 5500 K, dikenal sebagai sinar matahari sensitometrik, di mana film warna siang hari seimbang; D50, dengan CCT 5000 K, sering digunakan dalam aplikasi seni grafis.
4. *Seri lampu neon CIE.* Ada total 12, mewakili distribusi daya spektral untuk berbagai sumber fluoresen.
5. *Iluminan CIE E.* Yang disebut iluminan energi sama, atau spektrum energi sama, didefinisikan sebagai sumber yang daya spektral relatifnya sama dengan 100,0 pada

semua panjang gelombang. Tidak ada sumber fisik yang memancarkan daya yang sama di semua panjang gelombang dalam spektrum tampak. Iluminan ini menarik untuk penggunaan matematika dalam kolorimetri (lihat nanti).

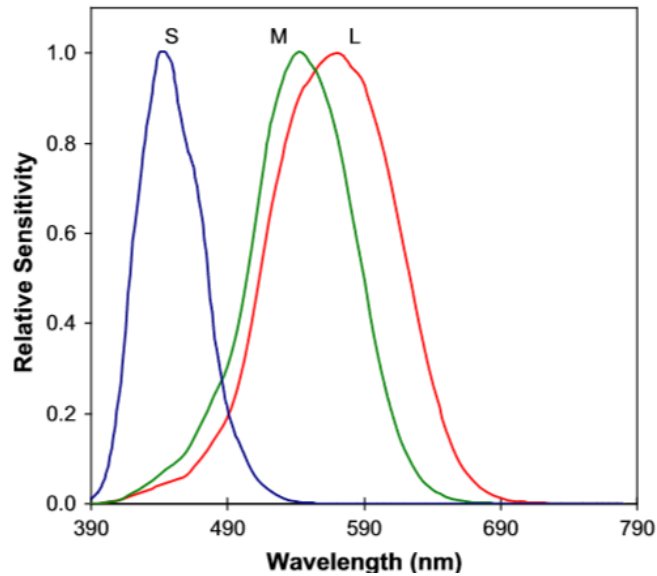


Gambar 7 Distribusi daya spektral relatif iluminan standar CIEa, D65 dan F2.

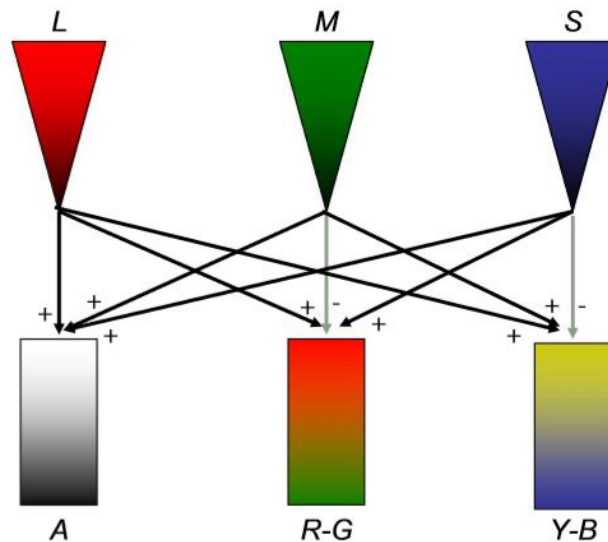
Model colour vision

Komponen terakhir dalam segitiga warna adalah pengamat manusia. CIE telah mendefinisikan dua yang disebut pengamat standar. Namun sebelum kami memperkenalkannya, ada baiknya meninjau kembali model penglihatan warna manusia.

Teori trikromatik penglihatan warna didasarkan pada teori Young-Helmholtz dan pada karya eksperimental Maxwell, dan menyatakan bahwa semua warna yang mungkin berpotensi dapat dicocokkan dengan kombinasi yang sangat mengesankan dari tiga rangsangan cahaya dengan panjang gelombang yang berbeda. . Apa yang disebut pencocokan aditif ini dimungkinkan karena respons spektral dari tiga konetipe yang ditemukan di retina manusia, sering dicatat sebagai $L(\lambda)$, $M(\lambda)$ dan $S(\lambda)$ - L berarti panjang gelombang panjang, M berarti panjang gelombang. panjang gelombang tengah dan S berarti panjang gelombang pendek. Gambar 8 mengilustrasikan responsivitas spektral dari kerucut L, M dan S.

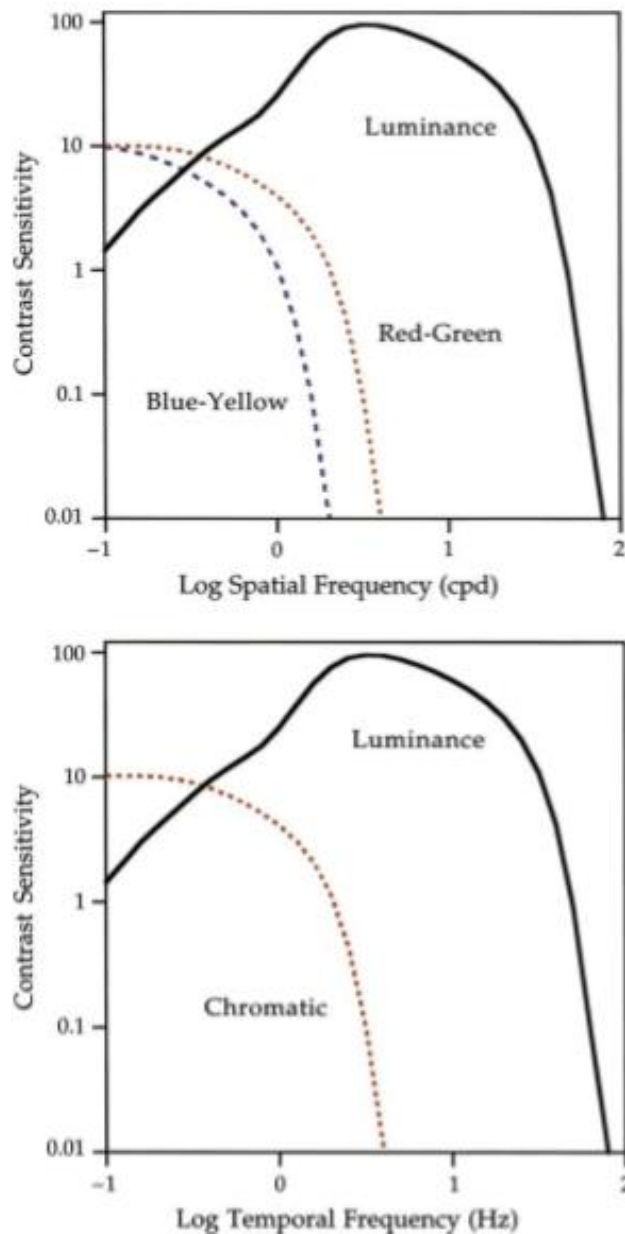


Gambar 8 Responsivitas spektral dari retinal cone L, M dan S.



Gambar 9 Ilustrasi skema sinyal kerucut L, M dan S menjadi sinyal warna lawan akromatik (A), redegreen (R-G) dan kuning-biru (Y-B). Diadaptasi dari Fairchild (2004)

Sejalan dengan perkembangan teori trikromatik, teori yang didasarkan pada sinyal warna lawan, gelap terang, redegreen dan yellowblue, dikemukakan oleh Hering (seorang ahli fisiologi Jerman lahir tahun 1834 yang melakukan penelitian tentang penglihatan warna dan persepsi spasial) dan didukung oleh pengamatan subjektif pada tampilan warna. Hering, yang di antara fenomena visual lainnya mengamati bahwa warna kemerahan kehijauan atau kekuningan-kebiruan tidak dapat dirasakan secara bersamaan, mengusulkan bahwa ada tiga jenis reseptor visual dengan respon bipolar terhadap light – dark, red – green dan yellow – blue.

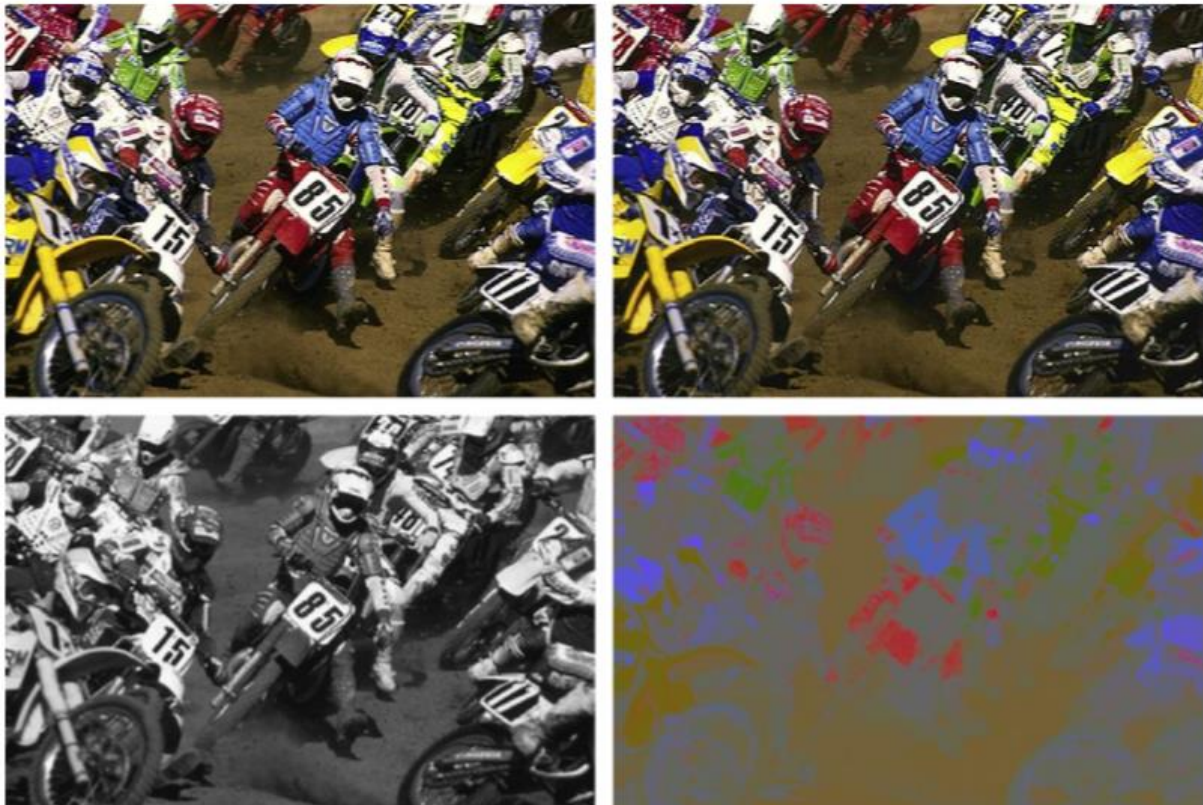


Gambar 10 Fungsi sensitivitas kontras spasial dan temporal yang khas untuk pencahayaan dan dua saluran visual berwarna. Atas: sensitivitas kontras spasial. Bawah: sensitivitas kontras temporal. Dari Fairchild (2004); direproduksi dengan izin Wiley-Blackwell

Saat ini, teori penglihatan warna kontemporer, yang dikenal sebagai teori panggung, melibatkan dua tahap. Tahap pertama adalah trikromatik, seperti yang dijelaskan oleh teori Young-Helmholtz. Namun, ketiga gambar yang dipisahkan warna tersebut tidak dikirim langsung ke otak. Sebaliknya, neuron retina menyandikan warna menjadi sinyal lawan. Pada tahap kedua, keluaran dari tiga kerucut dijumlahkan ($L + M + S$) untuk menghasilkan respon akromatik yang sesuai dengan distribusi CIE $V(\lambda)$. Pemisahan sinyal kerucut juga memungkinkan konstruksi sinyal lawan redgreen ($L - M + S$) dan kuning-biru ($L + M - S$). Transformasi dari L, M, S ke sinyal lawan berfungsi untuk memisahkan pencahayaan dan informasi warna. Ilustrasi pengkodean sinyal kerucut menjadi sinyal lawan ditunjukkan pada Gambar 9.

Jalur achromatic dan chromatic juga memiliki karakteristik temporal individu, dengan jalur luminansi memiliki sensitivitas kontras yang lebih tinggi dan sensitivitas yang meluas ke frekuensi temporal yang lebih tinggi.

Perhatikan bahwa sensitivitas kontras temporal sebagian besar relevan dengan gambar yang bergerak (yaitu yang berubah-ubah waktu) seperti video digital, yang dapat dikirimkan pada frekuensi gambar yang berbeda. Disosiasi luminansi dan informasi warna dapat dilihat sebagai keuntungan dalam kompresi, pengkodean dan transmisi informasi pencitraan, di mana informasi kromatik dapat dikompresi ke tingkat yang lebih tinggi daripada informasi luminansi tanpa kompresi yang terlihat (lihat contoh pada Gambar 11).



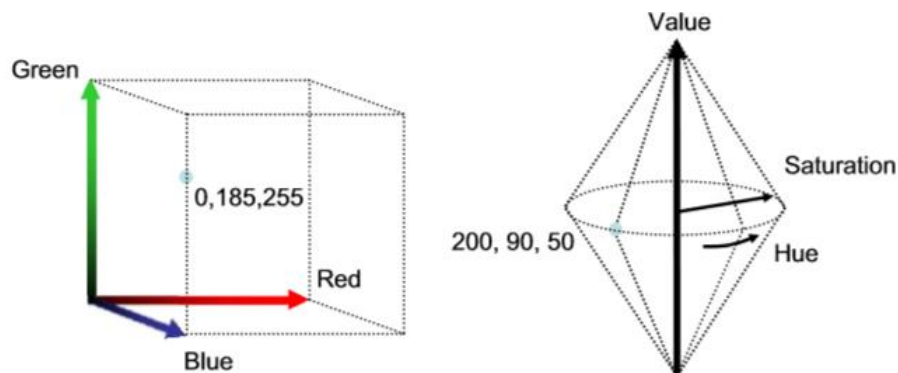
Gambar 11 Kiri atas: gambar asli. Kanan atas: gambar yang direkonstruksi dengan saluran pencahayaan resolusi penuh dan saluran chrominance yang dikompresi pada rasio 10: 1. Kiri bawah: saluran pencahayaan. Kanan bawah: saluran chrominance redgreen dan yellowblue. Gambar asli dari Kodak Master PhotoCD

Dasar-dasar kolorimetri

Kolorimetri berhubungan dengan metode menentukan, mengukur dan mengevaluasi warna. Ketika kita berbicara tentang warna, kita biasanya merujuk, seperti yang kita lihat sebelumnya, pada pengalaman visual. Ketika kita mengacu pada warna objek, kita biasanya menggunakan istilah subjektif, seperti gelap atau terang, putih, abu-abu atau hitam; kami menggunakan nama warna seperti merah, kuning, hijau atau biru, atau kami mengacu pada warna kaya atau pucat. Oleh karena itu, penting untuk menentukan dan mengukur warna dalam kaitannya dengan atribut subjektif ini seperti yang terlihat oleh pengamat biasa. Pengamat seperti itu didefinisikan oleh CIE.

Salah satu peran kolorimetri CIE adalah untuk mendeskripsikan dengan satu set nilai - biasanya tiga - setiap stimulus warna yang diberikan dari distribusi kekuatan spektralnya, sambil mempertimbangkan pengamat manusia 'standar'. Nilai yang menentukan stimulus warna adalah koordinat matematis dari ruang warna yang sesuai. Yang terakhir ini didefinisikan sebagai model geometris - n-dimensi biasanya tiga dimensi, di mana warna ditentukan oleh koordinat vektor atau komponen warnanya. Contoh dua ruang warna yang berbeda diilustrasikan pada Gambar 12, dengan warna yang sama ditentukan oleh koordinat warnanya di setiap ruang.

Perhatikan bahwa distribusi kekuatan spektral di sini mengacu pada hal yang berbeda untuk jenis rangsangan yang berbeda. Untuk rangsangan self-luminous, sumber cahaya, tampilan, dll., Ini adalah pancaran spektral atau distribusi daya spektral relatif, $P(\lambda)$. Untuk memantulkan atau mentransmisikan rangsangan, yaitu objek, itu adalah produk dari pantulan spektral atau transmisi objek, $R(\lambda)$ (spektrum objek) dan pancaran spektral atau distribusi daya spektral relatif dari sumber cahaya atau iluminan yang menarik, $P(\lambda)$ (yaitu produk $P(\lambda) R(\lambda)$).



Gambar 12 Warna yang sama diwakili oleh koordinat warna yang berbeda dalam dua ruang warna yang berbeda

Metode kolorimetri CIE didasarkan pada aturan pencocokan warna menggunakan campuran warna aditif. Aturan campuran warna aditif, yang dikenal sebagai hukum Grassmann, melibatkan kombinasi sejumlah rangsangan cahaya (yaitu sumber cahaya) yang mencapai retina mata secara bersamaan untuk mencocokkan sensasi yang dihasilkan oleh stimulus cahaya monokromatik (Gambar 13). Tiga hukum menyatakan:

1. Tiga variabel independen diperlukan dan cukup untuk menentukan campuran warna. Secara matematis, prinsip yang disebut trikromasi ini dapat diungkapkan dengan:

Ekuasi 2

$$C = X(X) + Y(Y) + Z(Z)$$

di mana X, Y, Z adalah apa yang disebut nilai tristimulus dari stimulus warna, C, dan X, Y dan Z adalah unit dari rangsangan referensi, yang disebut primer, digunakan dalam campuran warna. Menurut trikromasi, warna apa pun dapat dicocokkan dengan jumlah tertentu dari tiga warna primer, sehingga jumlah (yaitu nilai tristimulus) dan warna primer (yaitu rangsangan referensi) memungkinkan spesifikasi warna.

2. Rangsangan yang menimbulkan tampilan warna yang sama menghasilkan hasil yang identik dalam campuran warna aditif, terlepas dari komposisi spektralnya. Ambil dua rangsangan warna C_1 dan C_2 dengan spesifikasi:

Ekuasi 3

$$C_1 = X_1(X_1) + Y_1(Y_1) + Z_1(Z_1)$$

$$C_2 = X_2(X_2) + Y_2(Y_2) + Z_2(Z_2)$$

Jika

$$C_1 = C_2$$

Maka

$$X_1(X_1) + Y_1(Y_1) + Z_1(Z_1) = X_2(X_2) + Y_2(Y_2) + Z_2(Z_2)$$

Prinsip ini menyiratkan bahwa rangsangan dengan karakteristik spektral yang berbeda (yaitu distribusi daya spektral, pantulan spektral, atau transmisi spektral) dapat menghasilkan warna yang sama. Fenomena ini disebut sebagai metamerisme dan rangsangan yang membangkitkan kecocokan yang sama disebut metamers (lihat nanti untuk jenis metamerisme).

3. Jika salah satu komponen campuran warna berubah, warna campuran berubah dengan cara yang sesuai. Hukum ketiga ini menetapkan proporsionalitas (Ekuasi 4) dan aditivitas (Ekuasi 5) metrik stimulus untuk pencampuran warna. Jika Ekuasi 2 benar maka menurut hukum ketiga hal berikut juga benar:

Ekuasi 4

$$kC = k(X) + k(Y) + k(Z)$$

di mana k adalah faktor konstan di mana kekuatan pancaran stimulus warna meningkat atau menurun, sementara distribusi/pantulan/transmitansi daya spektral relatifnya tetap sama.

Ekuasi 5a

Jika:

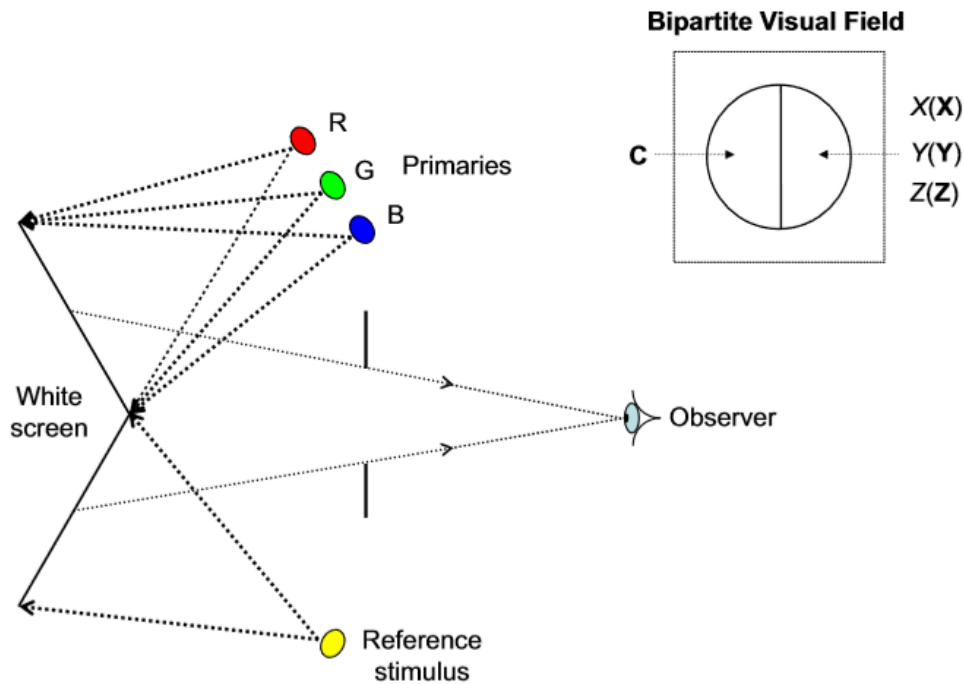
$$C_1 = C_2 \text{ dan } C_3 = C_4 \text{ kemudian } C_1 + C_3 = C_2 + C_4$$

Ekuasi 5b

Juga, Jika:

$$C_1 = C_2 \text{ dan } C_1 + C_3 = C_2 + C_4 \text{ kemudian } C_3 = C_4$$

dimana C_1, C_2, C_3 dan C_4 adalah empat rangsangan warna yang berbeda. Simbol '+' dalam konteks ini menunjukkan campuran warna aditif.



Gambar 13 Pengaturan pencocokan trikromatik dan bidang visual bipartit yang digunakan dalam eksperimen pencocokan warna.

Fungsi pencocokan warna dan pengamat standar CIE

Menurut hukum pertama Grassmann, melalui campuran aditif dari tiga rangsangan dimungkinkan untuk mencocokkan semua warna spektrum (yaitu warna spektral). Ketika ini dilakukan, hasilnya disajikan oleh tiga kurva, yang disebut fungsi pencocokan warna, umumnya dilambangkan sebagai $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ dan $b(\lambda)$ (Gambar 14). Ini adalah kurva kekuatan pancaran tiga lampu utama - mis. R, G dan B - per panjang gelombang λ , diperlukan untuk menghasilkan sensasi warna yang sama dengan kekuatan satuan cahaya monokromatik dengan panjang gelombang λ melalui campuran aditif. Secara matematis, hal ini diungkapkan dengan:

Ekuasi 6

$$1.0(\lambda) = \bar{r}(\lambda)(\mathbf{R}) + \bar{g}(\lambda)(\mathbf{G}) + b(\lambda)(\mathbf{B})$$

di mana R, G, B adalah primer dan $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ dan $b(\lambda)$ adalah jumlah dari masing-masing primer, yaitu nilai tristimulus untuk warna spektral yang dihasilkan dengan primer tertentu.

Satuan kekuatan pancaran dari ketiga rangsangan bukanlah besaran fisik tetapi dipilih secara sewenang-wenang. Mereka dipilih sehingga campuran (yaitu penambahan) satu unit dari masing-masing tiga rangsangan utama cocok dengan warna putih tertentu, putih energi yang sama, dengan daya pancaran yang sama pada semua panjang gelombang 'terlihat'. Putih hipotetis ini, dilambangkan sebagai SE, sangat penting dalam kolorimetri. Jika putih atau satuan yang berbeda dipilih, kurva akan memiliki ketinggian relatif berbeda tetapi tidak dalam bentuk yang berbeda. Jika pemilihan primer yang berbeda, bentuk fungsinya akan berbeda.

Fungsi pencocokan warna CIE pertama didefinisikan pada tahun 1931 (Gambar 14) dan disebut sebagai fungsi pencocokan warna RGB, $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ dan $b(\lambda)$, atau pengamat standar CIE. Mereka diturunkan dengan rata-rata tanggapan (tampak serupa) dari sejumlah kecil pengamat warna non-cacat, yang mengambil bagian dalam dua percobaan pencocokan trikromatik terpisah dan

menggunakan 2° bidang visual untuk tujuan tersebut (lihat Gambar 13). Penting untuk dicatat di sini bahwa, sebelum tahun 1980-an, tidak mungkin untuk mengukur respons kerucut (ditunjukkan pada Gambar 8) dan dengan demikian pencocokan trikromatik, meskipun tidak memberikan fungsi respons kerucut itu sendiri, memberikan fungsi pencocokan warna yang *kombinasi linier*¹ dari tema dan yang cocok untuk spesifikasi warna. Data pengamat standar ini terdiri dari fungsi pencocokan warna untuk tiga rangsangan utama berikut: **R** (yaitu Red), **G** (yaitu green) dan **B** (yaitu Blue), dengan panjang gelombang masing-masing 700, 546,1 dan 435,8 nm. Satuan pendahuluan begitu didefinisikan sehingga jumlah yang sama dari tiga rangsangan diperlukan untuk mencocokkan cahaya dari iluminan energi yang sama, S_E. Pencahayaan rangsangan ini, L_R, L_G dan L_B pada kesatuan kolorimetrik, berada di rasio 0,17697 hingga 0,81240 hingga 0,01063.

Segera setelah definisi fungsi pencocokan warna RGB, CIE memutuskan untuk mengubah RGB ke set primer lain, primer XYZ, yang masih digunakan sampai sekarang dalam kolorimetri modern. Transformasi ini dimaksudkan untuk menghilangkan nilai negatif dalam fungsi pencocokan warna RGB (yang menunjukkan kekuatan pancaran negatif - sebuah ketidakmungkinan) dan untuk memaksa salah satu fungsi pencocokan warna agar sama dengan fungsi efisiensi cahaya fotopik CIE, V(λ), yang didefinisikan oleh CIE pada tahun 1924. Nilai-nilai negatif dihilangkan dengan memilih dengan transformasi matematis lurus yang mendefinisikan satu set pendahuluan imajiner yang dapat digunakan untuk mencocokkan semua rangsangan warna yang mungkin secara fisik (lihat Gambar 18). Fungsi x(λ), y(λ) dan z(λ) yang dihasilkan berhubungan dengan fungsi $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, dan b(λ):

Ekuasi 7a

$$x(\lambda) = 0.49\bar{r}(\lambda) + 0.31\bar{g}(\lambda) + 0.20b(\lambda)$$

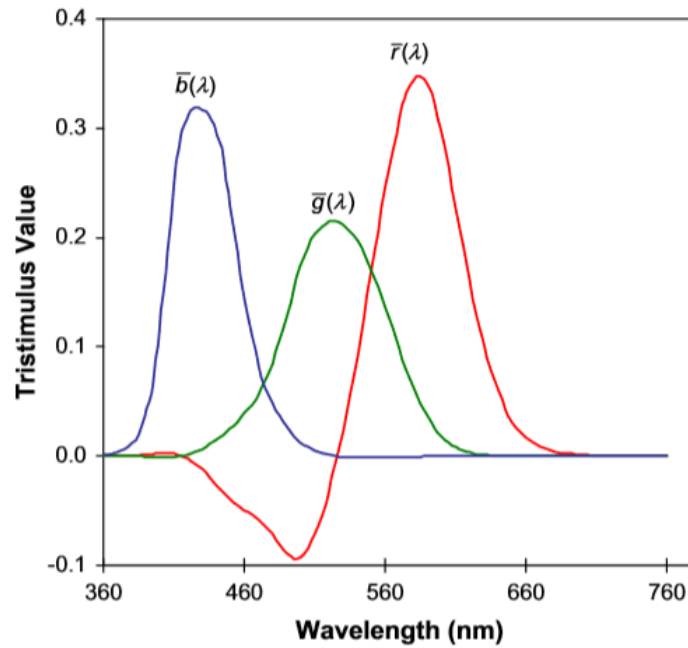
Ekuasi 7b

$$y(\lambda) = 0.17697\bar{r}(\lambda) + 0.8124\bar{g}(\lambda) + 0.1063b(\lambda)$$

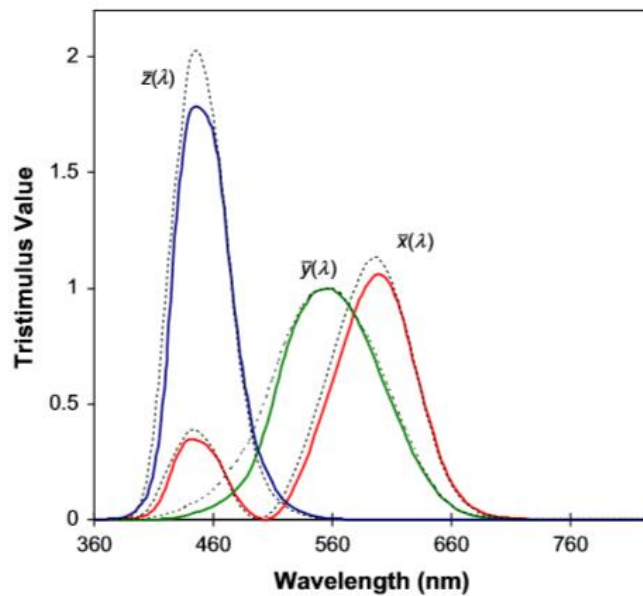
Ekuasi 7c

$$z(\lambda) = 0.00\bar{r}(\lambda) + 0.01\bar{g}(\lambda) + 0.99b(\lambda)$$

Menetapkan salah satu fungsi pencocokan warna sama dengan V(λ) berfungsi untuk menggabungkan fotometri ke dalam kolorimetri CIE. Transformasi yang diproyeksikan membuat fungsi pencocokan warna masing-masing x(λ), y(λ) dan z(λ) positif melintasi spektrum tampak dan y(λ) = V(λ). Fungsi pencocokan warna CIE 1931 untuk pemilihan pendahuluan XYZ mewakili pengamat kolorimetri standar CIE 1931 2°; mereka diilustrasikan pada Gambar 15. Pengamat kolorimetri lain direkomendasikan oleh CIE pada tahun 1964, 10° pengamat kolorimetri standar yang sering digunakan untuk menentukan warna dengan menggunakan bidang visual yang lebih luas juga diilustrasikan pada Gambar 15. Hal tersebut terkait dengan pendahuluan X₁₀, Y₁₀, dan Z₁₀ yang hanya sedikit berbeda dengan pendahuluan XYZ.



Gambar 14 Fungsi pencocokan warna CIE 1931 RGB

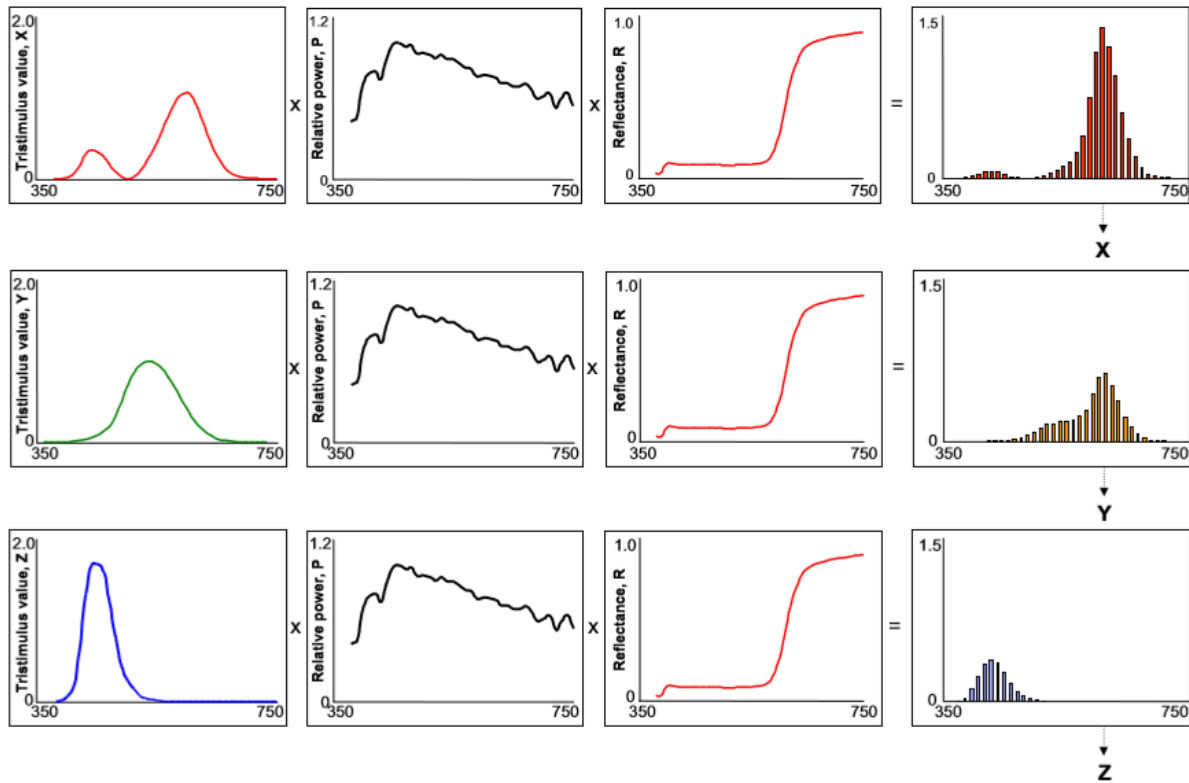


Gambar 15 Pengamat kolorimetri standar CIE 1931 2 (garis tebal) dan CIE 1964 10 (garis tipis).

Menghitung nilai tristimulus dari data spektral

Setelah nilai tristimulus dari semua warna spektral ditentukan, langkah selanjutnya dalam kolorimetri adalah mendapatkan nilai tristimulus untuk warna tertentu. Spesifikasi tristimulus untuk setiap set pendahuluan dibangun di atas hukum aditivitas dan proporsionalitas Grassmanns, dan menggunakan (1) informasi spektral dari sumber cahaya atau iluminan, (2) informasi spektral dari objek dan (3) set yang sesuai dari fungsi pencocokan warna - yaitu pengamat standar. Ingat: segitiga warna!

Jadi, untuk sistem CIEXYZ, masing-masing nilai tristimulus XYZ secara matematis diperoleh dengan mengintegrasikan rentang panjang gelombang yang terlihat - misalnya, λ dari 400 hingga 700nm - produk spektrum sumber atau iluminan, $P(\lambda)$, objek $R(\lambda)$, dan salah satu fungsi pencocokan warna CIE 1931 (lihat juga Gambar 16):



Gambar 16 Representasi grafis dari penurunan nilai tristimulus CIEXYZ untuk warna permukaan dengan pantulan spektral R , menggunakan iluminan dengan distribusi daya spektral relatif P dan pengamat kolorimetri CIE 2° .

Ekuasi 8a

$$X = k \int_{\lambda} P(\lambda)R(\lambda)x(\lambda)d\lambda \cong k \sum P(\lambda_i)R(\lambda_i)x(\lambda_i)\Delta\lambda$$

Ekuasi 8b

$$Y = k \int_{\lambda} P(\lambda)R(\lambda)y(\lambda)d\lambda \cong k \sum P(\lambda_i)R(\lambda_i)y(\lambda_i)\Delta\lambda$$

Ekuasi 8c

$$Z = k \int_{\lambda} P(\lambda)R(\lambda)z(\lambda)d\lambda \cong k \sum P(\lambda_i)R(\lambda_i)z(\lambda_i)\Delta\lambda$$

di mana k adalah konstanta normalisasi yang didefinisikan berbeda untuk kolorimetri relatif dan absolut, dan $\Delta\lambda$ dalam penjumlahan mewakili interval di mana spektrum dan CMF diambil sampelnya. Secara alami, spektrum objek, $R(\lambda)$, dikecualikan dalam integral dalam Ekuasi 8 dalam kasus rangsangan cahaya sendiri.

Dalam kolorimetri absolut, sebagian besar digunakan untuk rangsangan cahaya sendiri, K disetel pada 683 lumens W^{-1} , yang merupakan efisiensi cahaya spektral maksimum, dan spektrum iluminan, $P(\lambda)$, harus dalam unit radiometrik (yaitu $Wm^{-2} str^{-1} nm^{-1}$), sesuai dengan unit fotometrik yang dibutuhkan. Dalam hal ini tristimulus Y menjadi sama dengan luminansi stimulus L dan kolorimetri dibuat kompatibel dengan fotometri. Dalam kolorimetri relatif, K didefinisikan oleh:

Ekuasi 9

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} P(\lambda)y(\lambda)d\lambda} \cong \frac{100}{[\sum P(\lambda)y(\lambda)\Delta\lambda]}$$

Normalisasi dalam kolorimetri relatif ini menghasilkan nilai tristimulus yang berada pada kisaran 0-100. K dipilih sehingga $Y = 100$ untuk sumber cahaya, atau untuk objek dengan pantulan, atau spektrum transmitansi, $R(\lambda)$, sama dengan 1,0 untuk semua panjang gelombang. Nilai tristimulus Y dari benda tersebut kemudian memberikan faktor luminansi dari benda tersebut (yaitu seberapa bercahaya itu sehubungan dengan penyebar sempurna), yang dinyatakan sebagai persentase.

X: 11.5 Y: 10.1 Z: 7.2	X: 39.1 Y: 35.8 Z: 28.8	X: 19.6 Y: 13.3 Z: 38.6	X: 10.6 Y: 13.3 Z: 7.6	X: 26.8 Y: 24.3 Z: 50.1	X: 32.8 Y: 43.1 Z: 49.8
X: 37.4 Y: 30.1 Z: 6.4	X: 14.5 Y: 12.0 Z: 42.1	X: 29.3 Y: 19.8 Z: 15.6	X: 9.3 Y: 6.6 Z: 16.8	X: 34.4 Y: 44.3 Z: 11.9	X: 46.5 Y: 43.1 Z: 8.8
X: 8.8 Y: 6.1 Z: 32.3	X: 14.9 Y: 23.4 Z: 10.6	X: 20.7 Y: 12.0 Z: 5.7	X: 56.3 Y: 59.1 Z: 10.3	X: 32.3 Y: 19.8 Z: 36.7	X: 15.4 Y: 19.8 Z: 43.4
X: 88.3 Y: 90.0 Z: 106.5	X: 58.0 Y: 59.1 Z: 69.9	X: 35.5 Y: 36.2 Z: 42.8	X: 19.4 Y: 19.8 Z: 23.4	X: 8.8 Y: 9.0 Z: 10.7	X: 3.0 Y: 3.1 Z: 3.7

© 2002 GretagMacbeth

Gambar 17 Nilai tristimulus CIEXYZ relatif untuk Bagan Pemeriksa Warna Gretag Macbeth untuk iluminan CIE C.

Dalam beberapa kasus, misalnya dalam seni grafis dan industri reproduksi warna atau dalam teknik pemetaan gamut, nilai tristimulus Y ditetapkan ke 100 untuk putih kertas dan bukan untuk sumber cahaya. Ini adalah praktik kolorimetri yang dinormalisasi dan harus dibedakan dari kolorimetri relatif, yang berhubungan dengan pengukuran warna.

CIE menetapkan bahwa kisaran penjumlahan dalam Ekuasi 8 dan 9 sangat penting dalam spesifikasi tristimulus. Direkomendasikan agar penjumlahan dilakukan pada interval sampling $\Delta\lambda$ 5nm pada rentang 380 hingga 780 nm, menghasilkan 81 sampel. Namun, banyak instrumen, seperti spektrofotometer komersial yang digunakan untuk mengukur data spektral, menggunakan $\Delta\lambda$ 10nm pada rentang 400 hingga 700 nm, menghasilkan 31 sampel.

Definisi warna oleh tiga nilai tristimulus dapat diwakili dengan memplot setiap komponen tristimulus di sepanjang sumbu ortogonal dalam 'ruang warna tristimulus'. yang secara perseptif merupakan ruang yang tidak seragam, yang berarti bahwa jarak persepsi antara warna tidak terdistribusi secara seragam di dalamnya. ruang angkasa.

Contoh nilai tristimulus CIEXYZ relatif untuk Bagan Pemeriksa Warna Gretag Macbeth untuk iluminan CIE ditunjukkan pada Gambar 17.

Diagram kromatisitas

Untuk memberikan metode representasi warna dalam diagram dua dimensi yang lebih nyaman daripada ruang tiga dimensi yang agak 'tidak terbaca'. diagram kromatisitas dikembangkan. Warna stimulus diwakili oleh koordinat kromatisitasnya, yang diturunkan melalui normalisasi nilai tristimulus dari stimulus yang menghilangkan informasi luminansi. Koordinat kromatisitas untuk sistem CIEXYZ 1931 ditentukan oleh:

Ekuasi 10a

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

Ekuasi 10b

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Ekuasi 10c

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Dimana x , y dan z adalah koordinat kromatisitas stimulus warna dengan nilai tristimulus sama dengan X , Y dan Z . Karena x , y dan z mewakili besaran yang dinormalisasi (yaitu $x + y + z = 1$), hanya dua (biasanya x dan y) diperlukan untuk mendefinisikan warna:

Ekuasi 10d

$$z = 1 - y + z$$

Ketahuiilah bahwa koordinat kromatisitas mewakili fenomena tiga dimensi dengan hanya dua variabel. Jadi, untuk menentukan warna secara lengkap, salah satu nilai tristimulus juga harus dilaporkan. Biasanya ini adalah tristimulus Y , yang berhubungan dengan luminansi (dalam kolorimetri absolut) atau faktor pantulan/transmitansi (dalam kolorimetri relatif) dari warna, dan warna tersebut kemudian ditentukan oleh triplet x , y , Y . Hal ini dimungkinkan untuk memulihkan X dan Z dari kromatisitas dan pencahayaan dengan:

Ekuasi 11a

$$X = \frac{xY}{y}$$

Ekuasi 11b

$$Z = \frac{zY}{Y}$$

Diagram CIE 1931 x, y tidak memiliki keseragaman karena perbedaan persepsi antara warna tidak sesuai dengan jarak yang sama dalam diagram. CIE saat ini merekomendasikan diagram skala kromatisitas seragam (UCS) CIE 1976, dengan kromatisitas u', v' didefinisikan oleh:

Ekuasi 12a

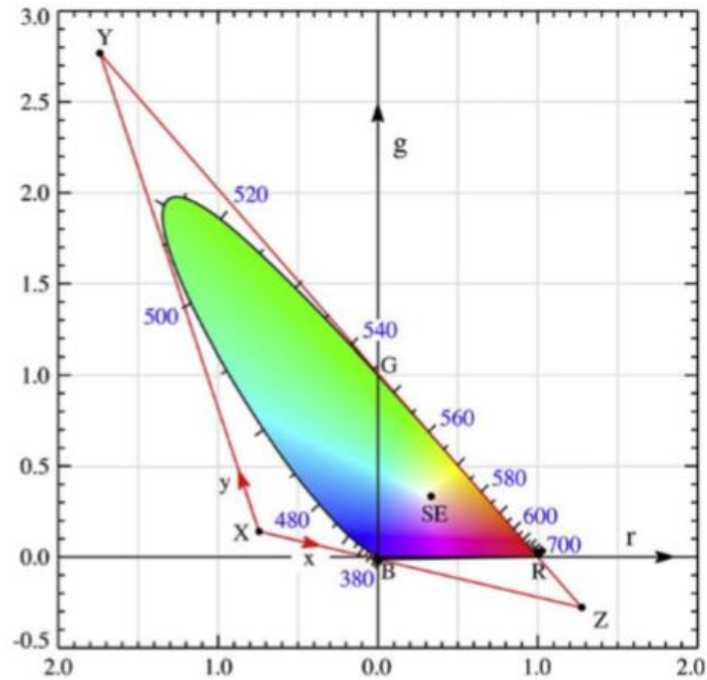
$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{(-2x + 12y + 3)}$$

Ekuasi 12b

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{(-2x + 12y + 3)}$$

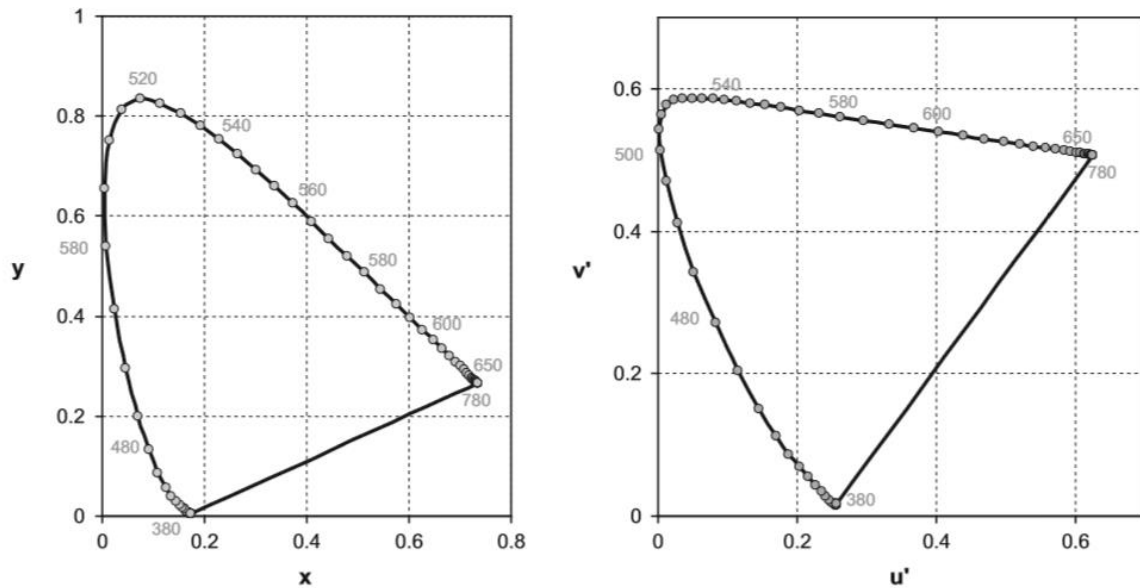
Koordinat kromatisitas ketiga, w' , sama dengan $1 - u' - v'$.

Diagram kromatisitas x, y dan u', v' ditunjukkan pada Gambar 19. Batas lengkung luar dalam diagram disebut lokus spektral, dan ditentukan oleh koordinat kromatisitas warna spektral. Panjang gelombang yang sesuai ditampilkan di sekitar garis lokus. Semua warna yang terlihat diwakili di area antara lokus spektral dan batas ungu, garis lurus yang menghubungkan kedua ujung lokus spektral, di mana tidak ada warna spektral yang sesuai karena 'ungu' hanya dihasilkan dengan mencampurkan cahaya merah dan biru. Warna yang lebih dekat dengan spektralokus lebih jenuh daripada warna yang terletak di area tengah diagram, yang cenderung ke saturasi nol (yaitu kurangnya rona netral atau warna akromatik). Koordinat kromatisitas titik putih, yaitu sumber cahaya yang menerangi objek warna yang diinginkan atau iluminan yang digunakan dalam pengukuran, harus diplot bersama dengan koordinat kromatisitas warna. Perubahan titik putih akan mengubah posisi semua warna dalam diagram kromatisitas, kecuali warna spektral (yang diturunkan sehubungan dengan SE), karena sumber atau iluminan diperhitungkan dalam perhitungan nilai tristimulus semua warna rangsangan (Ekuasi 10).

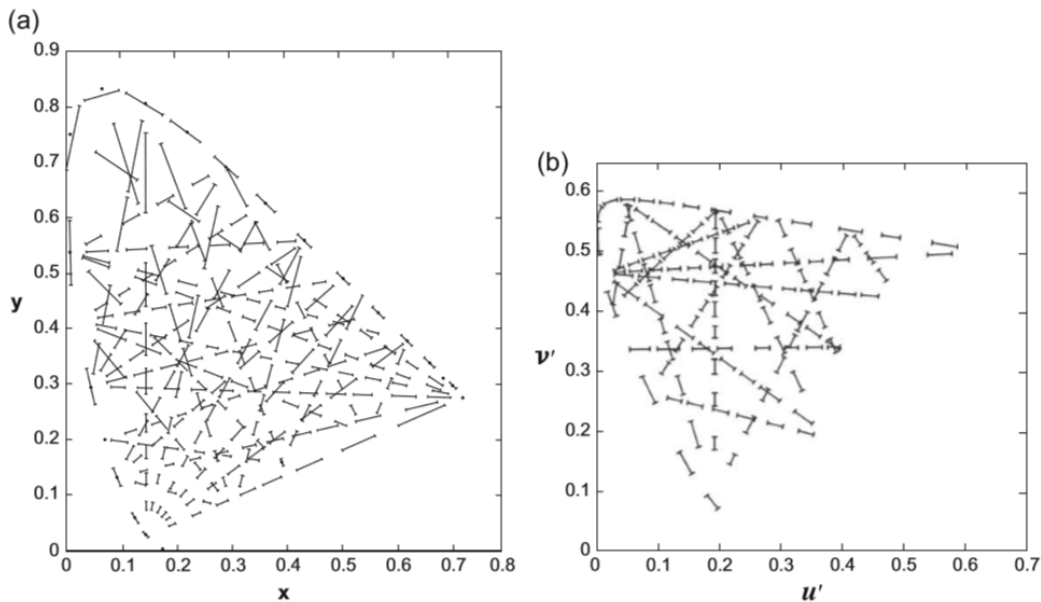


Gambar 18 Turunan dari pendahuluan XYZ sehubungan dengan diagram kromatisitas RGB 1931.

Jarak warna yang diberikan oleh diagram kromatisitas UCS CIE 1976 hampir seragam, dengan perbedaan maksimum dalam garis persepsi antara warna hingga hanya 4: 1, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20, peningkatan yang besar jika membandingkan perbedaan yang sama pada diagram x, y , di mana perbedaan maksimum bisa mencapai 20: 1. Sayangnya, diagram CIE x, y masih digunakan secara luas, terutama dalam literatur gambar digital dan dalam perangkat lunak yang mewakili colour gamut sistem pencitraan. Penggunaannya sering mengarah pada interpretasi yang sangat salah, seperti pada contoh yang diilustrasikan pada Gambar 21, yang menunjukkan RGB primer dari dua ruang warna RGB pada diagram CIE x, y dan u', v' . Menarik untuk dicatat bahwa posisi masing-masing primer tidak berbeda jauh, seperti yang ditunjukkan dalam diagram kromatisitas u', v' seragam. Namun, dalam diagram x, y , warna primer hijau ruang warna B diposisikan lebih jauh dari warna primer hijau ruang warnaa, yang menghasilkan kesan palsu dari nada warna yang jauh lebih besar untuk ruang warna B. Secara umum, perbandingan gamut sistem pencitraan dalam diagram kromatisitas dapat menyesatkan karena kurangnya 'dimensi ketiga'; jadi mereka harus ditafsirkan dengan hati-hati.



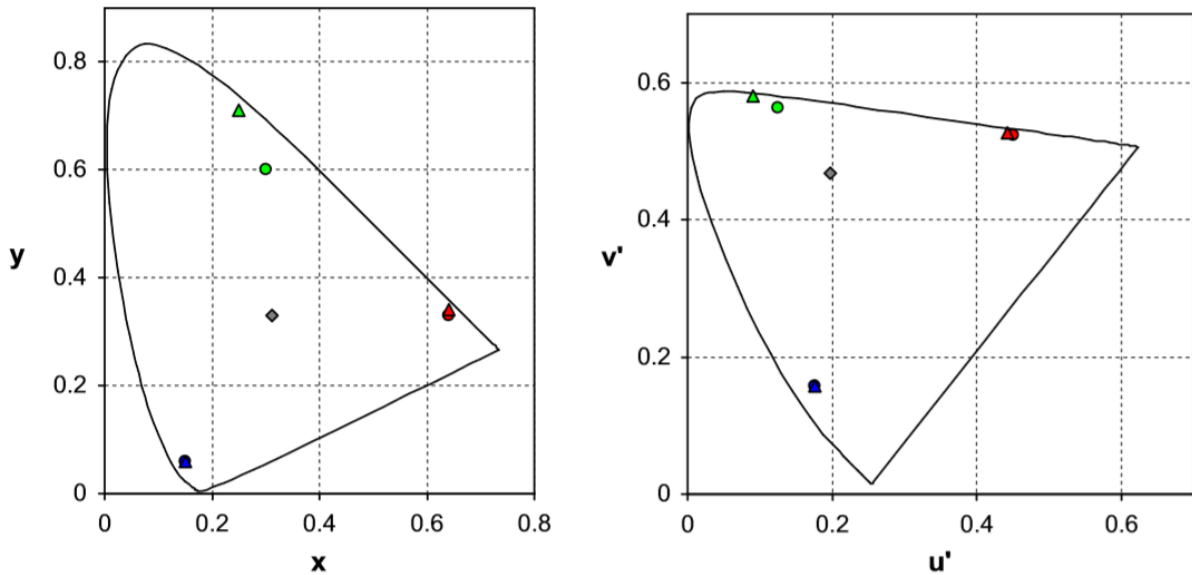
Gambar 19 Lokus spektral pada x , y dan u' , v' .



Gambar 20 Langkah kromatisitas yang sama secara visual pada pencahayaan konstan pada diagram kromatisitas CIE x , y dan u_0 , v_0 . Dari Hunt (2004); direproduksi dengan izin Wiley-Blackwell

Perbedaan warna dan Ruang warna sragam CIE

Pada tahun 1976, CIE mengusulkan dua ruang warna, ruang CIELUV dan CIELAB, yang tidak seperti sistem CIEXYZ yang memperluas kolorimetri tristimulus ke ruang tiga dimensi dengan dimensi yang berkorelasi dengan rona, kecerahan, dan kroma yang dirasakan (yaitu tiga atribut persepsi utama warna). Ini dicapai dengan memasukkan elemen untuk menjelaskan adaptasi kromatik visual dan untuk respons visual non-linier terhadap energi cahaya. Akuntansi untuk respon visual non-linier memberikan keseragaman visual pada ruang warna dan memungkinkan pengukuran perbedaan warna yang bermakna secara visual antara dua rangsangan warna, dengan mengambil perbedaan Euclidean antara dua titik di ruang ini.



Gambar 21 RGB primer untuk dua ruang RGB yang berbeda, A (primer diwakili oleh lingkaran) dan B (primer diwakili oleh segitiga), di kedua diagram kromatisitas x, y dan u'. v'. Berlian mewakili titik putih, D₆₅.

Penurunan koordinat warna ruang CIELUV dan CIELAB tidak berbeda. Kedua ruang menggunakan skala kecerahan seragam yang umum, L^* , yang, jika digabungkan dengan dua koordinat warna (u^* dan v^* untuk CIELUV, atau a^* dan b^* untuk CIELAB), memberikan ruang warna tiga dimensi. Di sini kami hanya akan menampilkan ruang CIELAB, yang merupakan ruang warna CIE utama yang digunakan dalam aplikasi pencitraan warna.

Ruang warna CIE 1976 (L^* , a^* , b^*), disebut sebagai CIELAB, ditentukan dengan menormalkan nilai tristimulus, X, Y dan Z, dari warna ke putih sumber atau iluminan, X_n , Y_n dan Z_n dan kemudian menundukkannya ke akar pangkat tiga. Ini mewakili hubungan antara pengukuran energi fisik dan tanggapan persepsi untuk semua tingkat iluminasi tetapi tingkat yang sangat rendah yang hubungannya linier:

Ekuasi 13a

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

Ekuasi 13b

$$a^* = 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right]$$

Ekuasi 13c

$$b^* = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right]$$

di mana $f(x)$ didefinisikan secara berbeda untuk rasio sangat rendah dan untuk rasio normal dan tinggi:

Ekuasi 13d

Untuk $z > 0.008856$; kemudian: $f(x) = (x)^{1/3}$

Ekuasi 13e

Untuk $x \leq 0.008856$, kemudian: $f(x) = 7.7871(x) + \frac{16}{116}$

Rasio X/X_n , Y/Y_n dan Z/Z_n jarang lebih kecil dari 0,01 dalam aplikasi pencitraan dan oleh karena itu fungsi 13d sebagian besar digunakan dalam Ekuasi 13a, b dan c.

Ukuran L^* adalah korelasi untuk kecerahan yang dirasakan; itu berkisar dari 0,0 untuk hitam hingga 100,0 untuk putih menyebar dan bisa lebih tinggi dari 100,0 hanya dalam kasus sorotan specular. Pengukuran a^* dan b^* adalah perkiraan persepsi merah-hijau dan kuning-kebiruan masing-masing dan mengambil nilai positif (a^* untuk merah, b^* untuk kuning) dan negatif (a^* untuk hijau, b^* untuk biru), sementara keduanya memiliki nilai 0,0 untuk rangsangan akromatik (yaitu netral). Dimensi warna L^* , a^* , b^* dapat dianggap sebagai koordinat Cartesian dari ruang warna tiga dimensi, di mana warna yang sangat kromatik terletak di ujung ruang dan lebih sedikit warna kromatik ke arah tengah, dekat sumbu L^* . Dari a^* dan b^* , prediktor untuk persepsi chroma, C^*_{ab} , dan sudut hue dalam derajat, h_{ab} , diperoleh, dalam hal ini ruang warna dapat direpresentasikan dalam bentuk koordinat silinder, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 22:

Ekuasi 13f

$$C^*_{ab} = (a^2 + b^2)^{1/2}$$

Ekuasi 13g

$$h'_{ab} = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right)$$

Stimulus Achromatic memiliki C^*_{ab} sebesar 0,0. h_{ab} berkisar dari 0 (terletak di positif a^*) hingga 360° .

Penting untuk diperhatikan bahwa lokasi semua warna dalam ruang CIELAB, termasuk warna spektral, bergantung pada putih iluminan (yaitu karena normalisasi nilai tristimulus warna ke putih sumber atau iluminan). Selain itu, lokasi rona unik persepsi (yaitu merah, kuning, hijau, dan biru) tidak sejajar langsung dengan sumbu a^* dan b^* . Di bawah iluminasi siang hari mereka terletak pada sudut rona 24° (merah), 90° (kuning), 162° (hijau) dan 246° (biru), tetapi di bawah iluminasi yang berbeda mereka terletak pada sudut rona yang sedikit berbeda.

Perbedaan warna antara pasangan rangsangan warna, ΔE_{ab} , dalam unit persepsi diukur sebagai jarak Euclidian antara koordinat Kartesius dari dua rangsangan warna (Ekuasi 14a), atau mereka dapat diekspresikan dalam hal kecerahan, perbedaan warna dan kroma (Ekuasi 14b dan c):

Ekuasi 14a

$$\Delta E^*_{ab} = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{1/2}$$

Ekuasi 14b

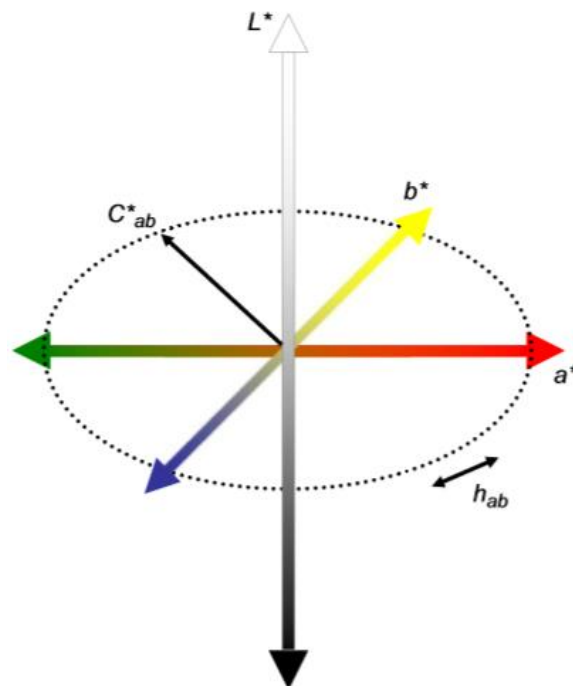
$$\Delta E^*ab = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*ab)^2 + (\Delta H^*ab)^2)^{1/2}$$

Ekuasi 14c

$$\Delta H^*ab = ((\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*ab)^2)^{1/2}$$

Toleransi persepsi khas (yaitu hanya perbedaan yang terlihat) untuk tambalan warna seragam serendah kira-kira 1.0 ΔE^*ab , tetapi untuk pemandangan kompleks (seperti gambar kompleks, di mana warna bercampur) biasanya berkisar antara 2.5 dan 4.0 ΔE^*ab , tergantung pada medium dan tingkat luminansi.

Ruang CIELAB dirancang sedemikian rupa sehingga perbedaan warna seragam secara perseptual di seluruh ruang warna, yaitu perbedaan persepsi yang sama antara pasangan rangsangan sesuai dengan besaran yang sama dalam ruang. Ini tidak sepenuhnya benar. Pemeriksaan penelitian dalam beberapa dekade terakhir telah menggambarkan perbedaan antara perbedaan yang diamati dan diukur. Contoh dari hal ini diilustrasikan dalam garis hue persepsi konstan yang diplot dalam bidang CIELAB a^* , b^* , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 23. Garis-garis ini terlihat melengkung, terutama untuk rona biru dan merah. Dalam upaya untuk mengkompensasi ketidakseragaman ini, CIE telah menerbitkan dua sistem yang lebih baru untuk pengukuran perbedaan warna, CIE94 dan CIE DE2000. Yang terakhir, yang merupakan rekomendasi CIE saat ini, dijelaskan dalam Lampiran B.



Gambar 22 Koordinat silinder CIELAB.

Metamerisme dan jenis kecocokan metamerik

Menurut hukum kedua Grassmann, rangsangan dengan karakteristik spektral yang berbeda dapat menghasilkan warna yang sama. Rangsangan yang cocok dalam tampilan warna tetapi berbeda dalam komposisi spektral dikenal sebagai metamers. Fenomena tersebut disebut sebagai metamerisme dan kecocokan antara dua warna merupakan kecocokan metamerik.

Metamers memiliki kolorimetri yang sama untuk iluminan dan pengamat tertentu. Metamerisme adalah elemen penting dalam kolorimetri. Inilah yang membuat kolorimetri menjadi mungkin: fungsi pencocokan warna yang mendefinisikan pengamat manusia berasal dari fakta bahwa banyak warna dapat dicocokkan dengan campuran aditif dari tiga warna primer yang dipilih. Pengukur warna spektral tidak dapat dicapai, karena memiliki intensitas tertinggi. Namun, masalah ini dapat diselesaikan dengan menambahkan stimulus primer ke stimulus monokromatik (yaitu sisi referensi pertandingan) untuk menurunkan intensitas sehingga campuran (yaitu sisi uji pertandingan) dapat cocok. Secara matematis, kecocokan metamerik dapat dijelaskan untuk sistem CIEXYZ dengan:

Ekuasi 15a

$$\int_{\lambda} s_1(\lambda)x(\lambda)d\lambda = \int_{\lambda} s_2(\lambda)x(\lambda)d\lambda = X$$

Ekuasi 15b

$$\int_{\lambda} s_1(\lambda)y(\lambda)d\lambda = \int_{\lambda} s_2(\lambda)y(\lambda)d\lambda = Y$$

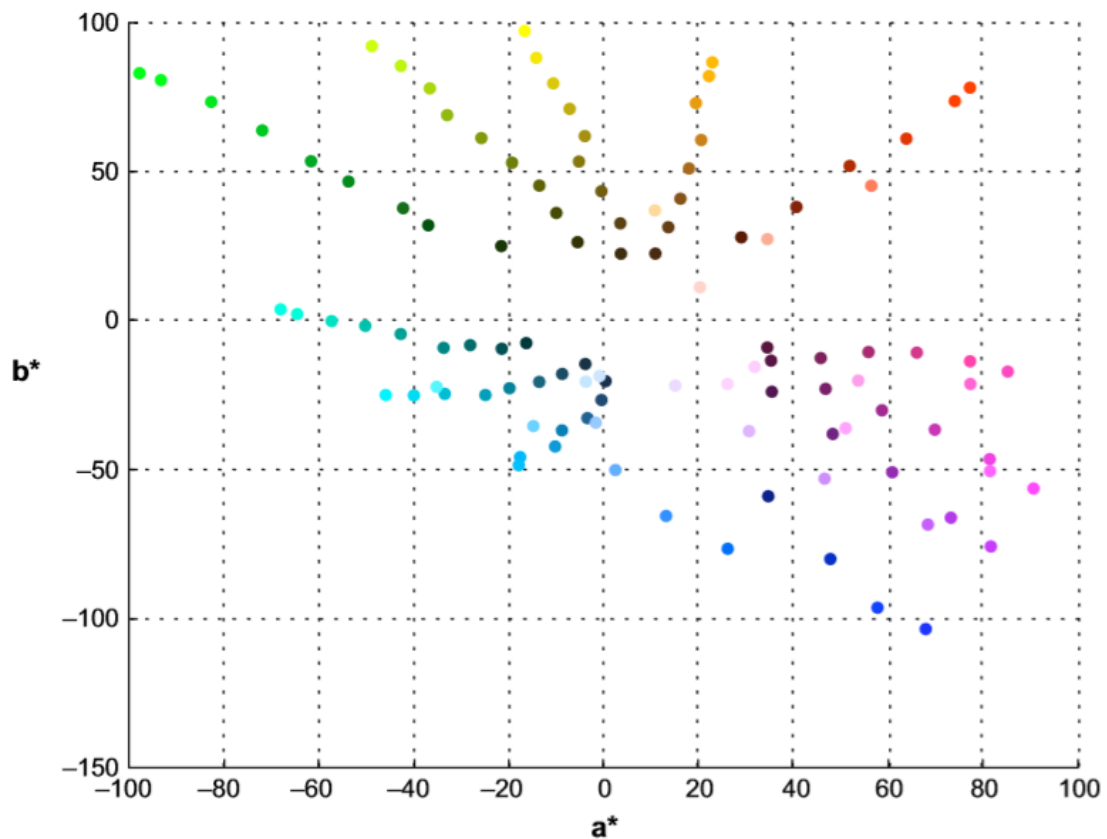
Ekuasi 15c

$$\int_{\lambda} s_1(\lambda)z(\lambda)d\lambda = \int_{\lambda} s_2(\lambda)z(\lambda)d\lambda = Z$$

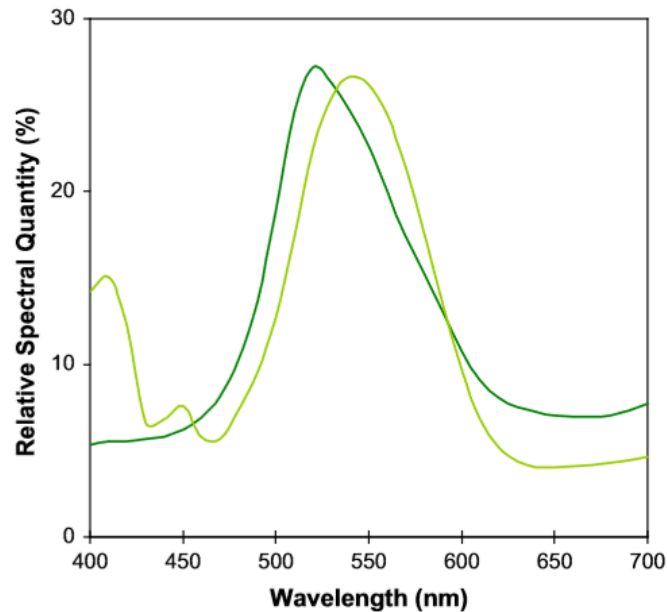
di mana X, Y dan Z adalah nilai tristimulus CIE 1931. Perhatikan bahwa konstanta K dalam definisi nilai tristimulus (lihat Ekuasi 8) dijumpai di sini, atau, lebih tepatnya, digabungkan dalam fungsi stimulus, $S_1(\lambda)$ dan $S_2(\lambda)$, dari dua rangsangan. Fungsi $S_1(\lambda)$ dan $S_2(\lambda)$ dapat mewakili:

- Untuk rangsangan emisi, distribusi daya spektral, $P_1(\lambda)$ dan $P_2(\lambda)$, dari dua sumber atau iluminan yang berbeda (yaitu $s_1(\lambda) = P_1(\lambda)$ dan $s_2(\lambda) = P_2(\lambda)$). Ini adalah kasus di mana dua sumber berbeda memiliki nilai tristimulus yang sama dan tampak memiliki warna yang sama. Biasanya, satu sumber akan memiliki spektrum kontinu dan sumber kedua distribusi daya spektrum pita sempit selektif. Perhatikan bahwa, jika dua sumber menerangi objek yang selektif secara spektral, objek tersebut secara umum tidak akan tampak sama
- Untuk objek, produk dari pantulan spektral atau transmitansi dua objek, $R_1(\lambda)$ dan $R_2(\lambda)$, dan distribusi pancaran spektral (atau distribusi daya spektral relatif) dari sumber cahaya atau iluminan yang menerangi mereka, $P(\lambda)$ (yaitu $S_1(\lambda) = P(\lambda) R_1(\lambda)$ dan $S_2(\lambda) = P(\lambda) R_2(\lambda)$). Dalam kasus ini, jika iluminan berbeda digunakan, warna objek mungkin tidak akan cocok.
- Untuk objek, produk dari pantulan spektral atau transmitansi dua objek, $R_1(\lambda)$ dan $R_2(\lambda)$, dan distribusi pancaran spektral (atau distribusi daya spektral relatif) dari dua sumber cahaya atau iluminan yang berbeda, $P_1(\lambda)$ dan $P_2(\lambda)$, (yaitu $s_1(\lambda) = P_1(\lambda) R_1(\lambda)$ dan $S_2(\lambda) = P_2(\lambda) R_2(\lambda)$). Ini adalah kasus yang jarang terjadi, di mana objek dengan warna berbeda yang diterangi oleh iluminan berbeda cocok dengan tampilannya.

- Dalam banyak kasus, kecocokan metamerik khusus untuk satu iluminan, yaitu metamerisme iluminan, dan satu pengamat, yaitu metamerisme pengamat. Ketika iluminan atau pengamat diganti, korek api tidak ada lagi. Oleh karena itu, jika dalam Ekuasi 15 fungsi pencocokan warna CIEXYZ diganti dengan set lain, kecocokan akan rusak. Biasanya, kecocokan metamerik mungkin berlaku untuk iluminan kedua, jika pantulan spektral puncak atau transmisi dari dua rangsangan sama pada tiga atau lebih panjang gelombang. Metamerisme pengamat tidak dapat dihilangkan dalam situasi praktis, tetapi pengamat kolorimetri CIE 2° mewakili pengamat yang nyata dan tidak cacat warna. Gambar 24 menyajikan pasangan metamerik spektrum reflektif di bawah D_{50} iluminan.
- Pada tahun 1953 Wyszecki menunjukkan bahwa distribusi kekuatan spektral rangsangan, $s(\lambda)$, terdiri dari fungsi fundamental, $jadi(\lambda)$, yang secara inheren terkait dengan nilai tristimulus, dan fungsi, $k(\lambda)$, disebut metamerickblack, $uniquetoeachmetamerwithtristimulusvalues(0,0,0)$ tidak memiliki kontribusi terhadap spesi fi kasi warna. Hitam metamerik tidak terlihat oleh mata dan ketika ditambahkan ke distribusi daya spektral apa pun $jadi(\lambda)$, spektrum yang dihasilkan $s(\lambda) = s_0(\lambda) + k(\lambda)$ akan menjadi metamer dari $s_0(\lambda)$.



Gambar 23 Garis rona persepsi konstan yang diplot pada bidang CIELAB a^* , b^* . Diadaptasi dari Hung dan Berns (1995); direproduksi dengan izin R.S. Berns



Gambar 24 Refleksi spektral dari pasangan metamerik di bawah iluminan D₅₀. Kurva spektral dari spektrum metamerik saling bersilangan setidaknya tiga kali.

Munculnya warna

Meskipun telah menghabiskan sebagian besar pembahasan ini tentang kolorimetri CIE, sekarang saatnya untuk memahami bahwa penampilan warna dipengaruhi oleh kondisi di mana mereka dilihat (yaitu kondisi tampilan yang akan dilihat), seperti tingkat dan warna iluminasi, warna latar belakang, derajat adaptasi visual, dan sejauh mana iluminansi diabaikan, serta struktur spasial rangsangan. Meskipun sistem kolorimetri CIE sangat berguna, sistem ini tidak memperhitungkan kondisi tampilan. Dua rangsangan dengan nilai tristimulus CIEXYZ yang identik hanya akan cocok dalam kondisi tampilan yang sangat spesifik. Misalnya, biasanya tidak tepat untuk merepresentasikan warna pada cetakan refleksi dengan nilai tristimulus yang sama seperti pada LCD. Pada bagian ini, kami memperkenalkan sejumlah mekanisme visual dan fenomena visual yang entah bagaimana membuat kolorimetri tidak valid dan menunjukkan bahwa penggunaan nilai tristimulus sederhana memerlukan penanganan lebih lanjut agar pencocokan warna berhasil.

Adaptasi visual dan mekanisme terkait

Bahwa kisaran penuh luminansi yang sensitif terhadap sistem visual kita kira-kira 13 kali lipat (dari sekitar 10^{-6} hingga 10^6 cdm^{-2}). Namun, tidak semua level ini dapat dirasakan secara bersamaan. Sistem visual manusia mampu menurunkan atau meningkatkan kepekaan visualnya sesuai dengan tingkat rata-rata iluminasi, yaitu adaptasi terang dan gelap. Karena adaptasi cahaya, kita tidak dapat melihat bintang-bintang pada siang hari, meskipun bintang-bintang itu hadir di langit. Rata-rata tingkat pencahayaan pada waktu siang hari, ada beberapa urutan yang lebih besar dari pada waktu malam dan kita tidak bisa melihatnya. Sebaliknya, ini disebabkan oleh adaptasi gelap yang, meskipun kita tidak dapat melihat objek yang ada di ruangan gelap saat pertama kali masuk dari tempat yang cukup terang, kita dapat mulai membedakannya setelah beberapa menit.

Proses adaptasi terang dan gelap memiliki dampak yang cukup besar pada warna objek yang dirasakan, tetapi tipe adaptasi ketiga jauh lebih penting: adaptasi kromatik, kemampuan sistem

visual untuk menyesuaikan - secara luas - sensitivitas warnanya sesuai dengan warna iluminasi. Hal ini dapat dianggap sebagai kemampuan sistem visual untuk menjaga titik putih dalam pemandangan yang kurang lebih konsisten putih, terlepas dari warna sumber cahaya yang menerangi, dan menggeser semua warna dalam pemandangan secara relatif. Ini umumnya berlaku untuk kisaran iluminan benda hitam.

Saat membaca novel, kami selalu menganggap halaman buku berwarna putih, terlepas dari apakah kami membaca di kamar tidur, paling sering diterangi oleh lampu pijar, yang didominasi warna kuning, atau di taman di bawah siang hari, yang didominasi warna biru. Lebih lanjut, ketika kita mencari pakaian yang familiar di rumah kita, kita sering dapat mengidentifikasinya meskipun ada perubahan warna iluminasi. Jumlah cahaya yang dipantulkan dari objek serta nilai tristimulusnya dalam sumber yang berbeda sangat berbeda. Misalnya, nilai tristimulus Z berubah dengan faktor 3 ketika iluminan berubah dari A ke D untuk sampel yang tampak putih di bawah kedua sumber. Gambar 25 mengilustrasikan sebuah buku yang diterangi oleh siang hari dan oleh cahaya pijar, seperti yang terlihat oleh sistem yang tidak mampu beradaptasi dengan warna.

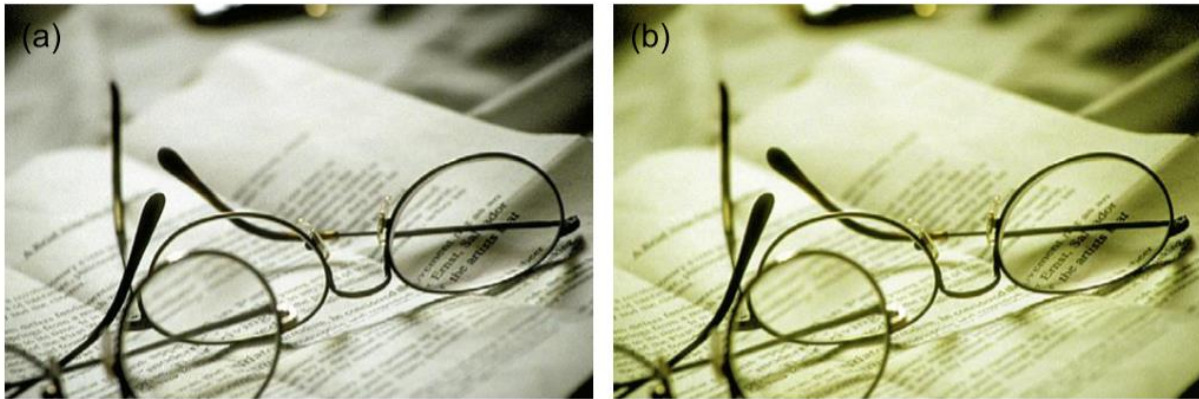
Contoh di atas menunjukkan bahwa adaptasi kromatik penting dalam mempertahankan warna objek yang dirasakan meskipun ada perubahan iluminan. Fenomena ini dikenal sebagai keteguhan warna, yang juga dibantu oleh dua mekanisme lain: warna memori (yaitu kemampuan untuk mengenali objek karena memiliki warna 'khas' yang terkait dengannya) dan mengabaikan iluminan (yaitu kemampuan untuk melihat warna objek). Setelah menafsirkan warna iluminan dan mendiskontokannya), semua memiliki pengaruh yang cukup besar dalam penampilan warna objek.

Situasi lain di mana adaptasi kromatik terbukti adalah dalam gambar-belakang (negatif), yang terjadi ketika kerucut mata terlalu dirangsang oleh stimulus konstan dan sebagai akibatnya mereka beradaptasi, yaitu menurunkan, kepekaannya. Afterimages adalah hasil dari perubahan independen dalam sensitivitas kerucut dan dimanifestasikan sebagai warna yang melengkapi stimulus asli. Oleh karena itu, gambar sisa cyan akan dihasilkan saat mata dirangsang secara berlebihan oleh stimulus merah yang melemahkan fotoreseptor merah dan akibatnya sensitivitasnya menurun dan menghasilkan sinyal yang lebih lemah. Gambar-sisa 'terlihat' ketika mata, setelah stimulasi berlebihan, dialihkan ke warna yang relatif netral, seperti area putih. Kurangnya stimulus merah di area putih akan menghasilkan gambar sisa cyan. Penjelasan serupa akan berlaku untuk semua bayangan belakang yang diamati. Gambar 26 mengilustrasikan contoh gambar setelah.

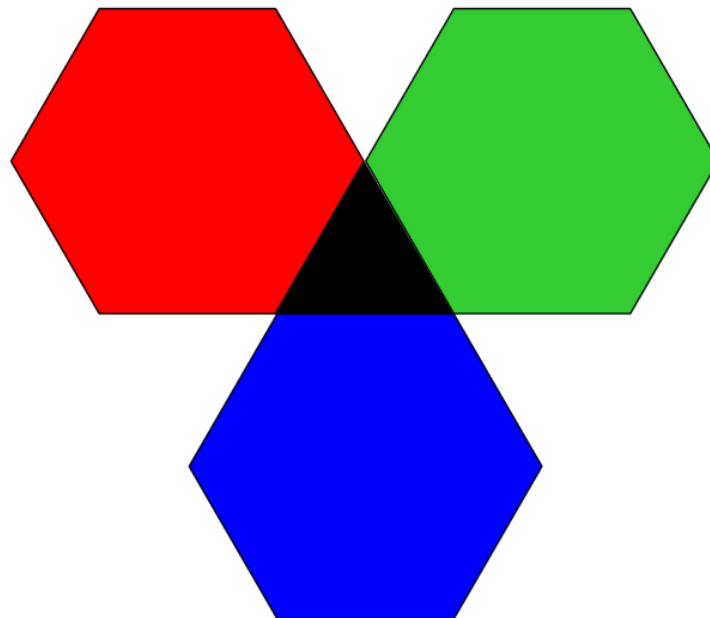
Setara dengan adaptasi cahaya dan gelap visual dalam sistem pencitraan fotografi dan digital adalah eksposur otomatis. Alih-alih fotografer memutuskan pengaturan aperture dan shutter speed, dalam pengaturan 'eksposur otomatis'. perangkat lunak kamera menetapkan ini, setelah menggunakan sensor cahaya untuk mengukur intensitas cahaya rata-rata pada bidang gambar. Lebih lanjut, adaptasi warna yang setara adalah white balance otomatis, yang hanya tersedia di kamera digital. Film warna diseimbangkan untuk pencahayaan dan suhu warna tertentu, yaitu film tidak dapat 'menyesuaikan' kepekaannya terhadap warna iluminasi. Setiap ketidakcocokan dapat dikompensasi dengan filter penyeimbang warna yang sesuai, biasanya ditempatkan di atas lensa atau di atas sumber cahaya. Keseimbangan putih otomatis dalam kamera digital dicapai dengan perangkat lunak kamera tetapi tidak selalu efektif. Keseimbangan putih yang tidak berhasil dapat menghasilkan cetakan warna biru, oranye, atau hijau yang tidak menyenangkan, yang terutama merusak dalam potret - rendering warna kulit yang benar sangat penting dalam kualitas gambar. Keseimbangan putih dalam gambar digital

dicapai melalui konversi titik putih atau transformasi adaptasi kromatik, yang akan dijelaskan nanti di pembahasan ini.

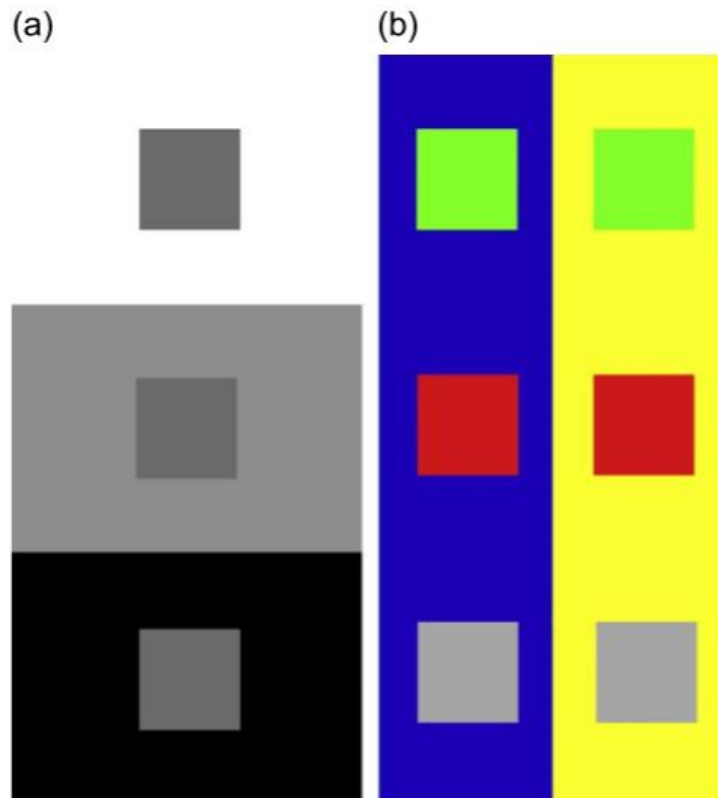
Mekanisme adaptasi yang disebutkan dalam bagian ini adalah semua bagian dari mekanisme umum yang membuat kita kurang peka terhadap rangsangan visual (atau memang sebagian besar rangsangan fisik) ketika intensitas fisik rangsangan ditingkatkan. Adaptasi visual sangat penting dalam aplikasi pencitraan karena gambar dilihat dalam kisaran iluminasi yang berbeda, dengan karakteristik pencahayaan dan warna yang sering berbeda dari pemandangan aslinya.



Gambar 25 Sebuah buku yang diterangi oleh siang hari (a) dan cahaya pijar (b) seperti yang direkam oleh sistem pencitraan yang tidak mampu melakukan adaptasi kromatik. Gambar asli diambil dari PhotoCD Kodak



Gambar 26 Ilustrasi after-image. Arahkan mata Anda pada segitiga hitam di tengah selama 30 detik dan kemudian lihat kertas putih. Apa warna gambar setelahnya?



Gambar 27 Contoh kontras simultan. (a) Tambalan abu-abu di tengah setiap kotak secara fisik identik, tetapi tampak lebih terang saat latar belakang menjadi lebih gelap. (b) Pasangan bercak hijau, merah dan abu-abu secara fisik identik tetapi tampak lebih kuning dan lebih gelap pada latar belakang biru dibandingkan dengan tampilan yang lebih biru dan lebih terang pada latar belakang kuning

Fenomena penampilan warna lainnya

Pada bagian ini kita membahas secara singkat beberapa fenomena visual yang lebih penting yang disebabkan oleh perubahan kondisi menonton. Rincian lebih lanjut dan daftar yang lebih luas dapat ditemukan di Fairchild (2004)

Kontras simultan menyebabkan rangsangan bergeser pada tampilan warna saat warna latar diubah (Gambar 27). Pergeseran penampilan mengikuti teori warna lawan dari penglihatan warna. Oleh karena itu, latar belakang yang terang akan menyebabkan rangsangan tampak lebih gelap, latar belakang hijau akan menyebabkan rangsangan tampak lebih merah, latar belakang biru akan menyebabkan rangsangan tampak lebih kuning, dll. Crispening adalah peningkatan persepsi perbedaan warna antara dua rangsangan. rona serupa, ketika latar belakang di mana kedua rangsangan tersebut dilihat serupa rona dengan rangsangan itu sendiri (Gambar 28). Penyebaran adalah campuran nyata dari rangsangan warna dengan sekelilingnya pada titik fusi spasial, yaitu di mana rangsangan dan latar belakang tidak lagi dilihat secara individual tetapi mereka menyatu. Contoh penyebaran adalah titik-titik setengah warna dan fosfor berwarna CRT, yang tidak dapat diselesaikan di luar jarak pandang tertentu meskipun faktanya mereka adalah titik warna individual. Dalam semua fenomena ini, yang secara langsung berkaitan dengan struktur spasial rangsangan, kolorimetri rangsangan warna tidak berubah-ubah tetapi penampilannya berbeda.

Pergeseran rona Bezold-Brücke adalah fenomena di mana rona stimulus monokromatik berubah dengan pencahayaannya. Meskipun secara luas diasumsikan bahwa hue hanya ditentukan oleh panjang gelombang, ini tidak benar; rona tidak konstan dengan perubahan tingkat pencahayaan. Fenomena lain yang terkait dengan perubahan corak adalah efek Abney, di mana corak berubah dengan kemurnian kolorimetri. Telah dibuktikan bahwa, ketika cahaya putih ditambahkan ke stimulus monokromatik, rona yang dirasakan berubah. Efek Helson dan Judd menyatakan bahwa di bawah iluminan kromatik yang lebih tinggi, objek terang tampak memiliki rona yang sama dengan iluminan, sedangkan objek gelap tampak berlawanan dalam rona.



Gambar 28 Contoh crispening. Pasangan tambalan merah identik di semua latar belakang.

Dalam kolorimetri CIE, tristimulus Y mendefinisikan luminansi, atau faktor luminansi, dari sebuah stimulus dan diasumsikan bahwa kecerahan yang dirasakan hanyalah sebuah fungsi dari Y. Efek Helmholtz-Kohlrausch membatalkan asumsi ini. Ini adalah fenomena di mana pada pencahayaan konstan kecerahan yang dirasakan dari suatu stimulus terbukti meningkat dengan meningkatnya saturasi, dan oleh karena itu membuat kecerahan tidak hanya bergantung pada pencahayaan, tetapi juga pada kromatisitas stimulus.

Lebih lanjut, efek Hunt and Stevens menggambarkan fenomena di mana warna dan kontras rangsangan meningkat dengan pencahayaan. Ini terlihat jelas pada hari-hari cerah yang cerah, saat warna tampak hidup dan sangat kontras. Demikian pula, Bartleson dan Breneman pada tahun 1960-an mengamati bahwa kontras yang dirasakan pada gambar bervariasi dengan tingkat pencahayaan dan lingkungan sekitar (lihat contoh pada Gambar 29). Efek Stevens dan Bartleson-Breneman diperhitungkan dalam banyak aplikasi pencitraan. Misalnya, karena kontras yang dirasakan berkurang dengan pencahayaan, film gambar bergerak dan slide warna, yang dilihat di lingkungan gelap, dirancang untuk memiliki kontras fisik dan sensitif yang tinggi sebagai kompensasi. Hal yang sama berlaku untuk gambar yang dikirim untuk televisi, yang biasanya ditonton di lingkungan yang redup.



Gambar 29 Pencahayaan dan kontras yang dirasakan dari foto hitam putih berubah dengan luminansi latar belakang

Pengantar CAT dan CAM

Model tampilan warna (CAM) bertujuan untuk memperluas kolorimetri dasar dengan menentukan warna rangsangan yang dirasakan dalam berbagai kondisi tampilan. Mereka memberikan rumus matematika untuk mengubah pengukuran fisik dari stimulus dan lingkungan tampilan menjadi korelasi atribut persepsi warna, seperti lightness, chroma dan hue.

Langkah terpenting dalam pemodelan tampilan warna adalah memperhitungkan adaptasi kromatik visual. Hal ini dicapai dengan menggunakan transformasi adaptasi kromatik (CAT) (juga disebut model adaptasi kromatik). CAT adalah komputasi (atau pemodelan) dari warna yang sesuai di bawah iluminan referensi untuk stimulus yang didefinisikan di bawah uji iluminan. Warna yang sesuai adalah rangsangan yang mempertahankan penampilannya bila dilihat dalam kondisi tampilan yang berbeda. Misalnya, warna dengan nilai tristimulus $(XYZ)_1$ dalam satu rangkaian kondisi tampilan mungkin tampak sama dengan warna lain, ditentukan dengan nilai tristimulus $(XYZ)_2$ dalam rangkaian kondisi tampilan lainnya. $(XYZ)_1$, $(XYZ)_2$ dan kondisi tampilan masing-masing mewakili sepasang warna yang sesuai.

CAT umum

Kebanyakan model adaptasi kromatik didasarkan pada hipotesis Johannes von Kries (1902), yang mendalilkan bahwa kerucut menyesuaikan kepekaan individu mereka secara independen dan secara linier. Misalnya, di bawah cahaya yang menyala, kerucut menjadi kurang sensitif hanya untuk panjang gelombang yang lebih panjang. Von Kries memberikan satu set ekuasi spesifik yang mewakili hari ini apa yang disebut sebagai transformasi von Kries. CAT umum disajikan di bawah ini.

Pembaca harus mengacu pada Fairchild (2004), Kang (2006), Westland (2004) dan publikasi relevan lainnya untuk deskripsi rinci dari beberapa model modern, seperti Nayatani 's, Hunt 's, Fairchild 's, teori Retinex dan transformasi BDF.

Berdasarkan hipotesis von Kries, nilai tristimulus stimulus untuk dua iluminan yang berbeda, iluminan sumber dan tujuan, dihubungkan dengan transformasi linier:

Ekuasi 16

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$$

dimana Mewakili transformasi, X_1 , Y_1 dan Z_1 adalah nilai tristimulus dari stimulus di bawah iluminan sumber dan X_2 , Y_2 dan Z_2 yang di bawah iluminan tujuan. Untuk memodelkan secara akurat mekanisme fisiologis adaptasi kromatik, stimulus perlu diekspresikan dalam bentuk responsivitas kerucut, L, M dan S, bukan nilai tristimulus CIEXYZ. Responsivitas kerucut dapat diperkirakan dengan transformasi linier dari tristimulus CIEXYZ dan dengan demikian matriks konversi T mengambil bentuk:

Ekuasi 17

$$T = M_{CAT}^{-1}DM_{CAT}$$

di mana matriks M_{CAT} mengubah tristimulus sampel menjadi responsivitas kerucut. Kemudian transformasi diagonal, D, diterapkan untuk mengubah responsivitas kerucut di

bawah iluminan sumber (L_1, M_1, S_1), ke responsivitas kerucut di bawah iluminan tujuan (L_2, M_2, S_2). Akhirnya, transformasi linier kedua, M_{CAT}^{-1} mengubahnya kembali ke ruang tristimulus. Matriks transformasi diagonal, D , memiliki bukan nol hanya di diagonal, yang berisi rasio tujuan-ke-sumber dari respons kerucut:

Ekuasi 18

$$D = \begin{bmatrix} L_2/L_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2/M_1 & 0 \\ 0 & 0 & S_2/S_1 \end{bmatrix}$$

Matriks MCAT spesifik untuk setiap model. Dalam model tampilan warna CIE saat ini, tristimulus sampel diubah menjadi responsivitas kerucut yang dipertajam, yang serupa dengan responsivitas kerucut. Perbedaan dalam berbagai CAT juga disebabkan oleh elemen transformasi diagonal, D , yang memperhitungkan kondisi tampilan. Transformasi umum karena itu dapat diekspresikan dengan:

Ekuasi 19

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = M_{CAT}^{-1} D M_{CAT} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$$

Colour appearance models(CAM)/Model penampakan warna

Meskipun CAT memperluas kolorimetri tristimulus ke arah prediksi tampilan warna, CAT tidak dapat digunakan untuk menggambarkan tampilan stimulus yang sebenarnya. Atribut penampakan telah didefinisikan dalam Tabel 1 sebagai kecerahan, warna dan warna (yaitu mutlak), dan kecerahan, kroma, saturasi dan warna (yaitu relatif).

Tabel 2 Data input dan output untuk CIECAM02 (c, N_c, F_{LL} dan F adalah konstanta yang disediakan untuk kondisi tampilan yang berbeda)	
INPUT DATA	OUTPUT DATA(PENAMPILAN KORELASI)
X, Y, Z : Nilai tristimulus relatif dari stimulus warna dalam kondisi sumber	J : Lightness
L_A : Luminance bidang adaptasi ($cd\ m^{-2}$)	Q : Brightness
X_w, Y_w, Z_w : Nilai tristimulus relatif pada White	C : Chroma
Y_b : Luminance relatif pada background	s : Saturation
c : dampak pada sekeliling	M : Colourfulness
N_c : Faktor kontras lightness	h : hue angle
F_{LL} : Faktor kontras lightness	H : Komposisi hue
F : Derajat faktor adaptasi	a_M, b_M : Koordinat warna Cartesian berasal dari colourfulness dan hue
	a_c, b_c : Koordinat warna kartesius diturunkan dari chroma dan hue
	a_s, b_s : Koordinat warna kartesius diturunkan dari saturasi dan hue

Menurut Komite Teknis CIE (TC1-34): ‘Model penampilan warna (CAM) adalah model apa pun yang mencakup prediktor setidaknya atribut penampilan warna relatif dari kecerahan, kroma, dan corak. Agar model menyertakan prediktor yang wajar dari atribut ini, model tersebut harus menyertakan beberapa bentuk transformasi adaptasi kromatik. Model harus lebih kompleks untuk memasukkan prediktor kecerahan, warna atau untuk memodelkan efek tergantung pencahayaan seperti efek Stevens atau Hunt. ‘Definisi ini memungkinkan ruang warna CIELAB dan CIELUV dianggap sebagai CAM, karena kedua ruang warna ini menyertakan a bentuk adaptasi berwarna (yaitu normalisasi tristimulus dengan warna putih) dan memiliki prediktor untuk lightness, chroma dan hue. Namun, mereka tidak memiliki kecanggihan untuk memprediksi efek yang bergantung pada luminansi, efek latar belakang dan sekeliling, dan mereka tidak menyertakan korelasi untuk kecerahan dan warna.

Model tampilan warna pertama diperkenalkan oleh Hunt (1982, 1985) dan hampir secara paralel diperkenalkan oleh Nayatani (1986). CIECAM97s (1997) adalah CAM pertama yang direkomendasikan oleh CIE dan merupakan model sementara. Itu sukses besar dan membawa kemajuan dalam pemodelan tampilan warna. CIECAM02 (2002) yang saat ini direkomendasikan lebih sederhana dan lebih efektif daripada model CIE sebelumnya. Tabel 2 menyajikan data masukan dan keluaran untuk CIECAM02. CAM sangat intens secara komputasi. Mereka sangat penting untuk rendisi gambar crossmedia. Pembaca harus mengacu pada referensi yang disebutkan sebelumnya di bagian ini untuk membaca lebih lanjut tentang CAM.

Reproduksi warna

Reproduksi warna dari berbagai media fotografi dan pencitraan diperkenalkan dalam pembahasan terpisah, yang didedikasikan untuk proses dan media tertentu. Secara umum, warna dapat direproduksi baik dalam media yang memancarkan sendiri (seperti tampilan) atau dengan menggunakan cahaya yang dipantulkan atau ditransmisikan (seperti pada cetakan dan slide). Seperti yang kita lihat di pembahasan ini, ada dua jenis reproduksi warna: reproduksi warna aditif dan subtraktif. Ingat singkat: sistem warna aditif menggunakan pencampuran aditif dari primer yang dipilih untuk menghasilkan semua warna, dengan cara yang mirip dengan apa yang dilakukan dalam eksperimen pencocokan warna. setiap piksel yang ditampilkan. Karena sub-piksel sangat kecil, sub-piksel secara visual tidak terselesaikan pada jarak pandang yang khas dan cahaya dari sumber cahaya LCD yang dipancarkan melaluinya bercampur aditif di retina kita. Ketika cahaya pantulan digunakan, reproduksi warna sebagian besar dicapai dengan mengurangi energi cahaya dari spektrum sumber yang menerangi medium. Salah satu contoh sistem warna subtraktif adalah cetakan fotografis yang menggunakan pewarna cyan yang menyerap (yaitu mengurangi) panjang gelombang panjang yang sesuai dengan warna kemerahan, pewarna magenta yang menyerap panjang gelombang tengah sesuai dengan warna kehijauan, dan pewarna kuning yang menyerap panjang gelombang pendek yang sesuai ke warna kebiruan.

Tujuan dalam reproduksi warna dalam banyak aplikasi pencitraan adalah reproduksi yang ‘setia ‘ dalam tampilan warna. Setia mungkin memiliki arti yang berbeda dalam penerapan yang berbeda dan dalam beberapa kasus mungkin tidak mungkin. Misalnya, sangat sulit untuk mencapai kisaran pencahayaan tinggi dalam gambar cetakan pemandangan luar ruangan pada hari yang cerah, karena kertas foto hanya memiliki kisaran dinamis yang terbatas. Demikian pula, tidak mungkin untuk mereproduksi keseluruhan warna permukaan pada monitor komputer karena primer fisik monitor adalah faktor pembatas. Selain itu, reproduksi yang setia mungkin bukan reproduksi yang disukai oleh sebagian besar pemirsa.

Tujuan reproduksi warna

R.G.W. Hunt di awal 1970-an mendefinisikan enam tujuan reproduksi warna yang berbeda yang diperkenalkan di bagian ini. Keputusan reproduksi yang sesuai bergantung pada berbagai kriteria, termasuk tujuan reproduksi, batasan yang diberlakukan oleh fisika sistem pencitraan, batasan iluminasi dan tampilan.

Reproduksi warna spektral mengacu pada reproduksi di mana kurva refleksi spektral dari reproduksi adalah sama dengan objek warna aslinya. Dalam hal ini pencocokan warna tidak tergantung pada iluminan atau pengamat (yaitu tidak ada kecocokan metamerik yang terlibat). Warna dicocokkan di bawah sinar matahari, tungsten, fluorescent, dan iluminasi lainnya, dan tampak sama bagi semua pengamat, terlepas dari penglihatan warna mereka. Reproduksi warna spektral diinginkan untuk warna dalam katalog pesanan lewat pos, misalnya, di mana tampilan warna perlu dipertahankan untuk semua kondisi tampilan; Contoh lainnya adalah reproduksi warna pakaian. Dalam fotografi film tradisional, pewarna cyan, magenta, dan kuning yang digunakan tidak dapat mencapai reproduksi warna spektral. Dalam display image, seperti tampilan komputer dan televisi, kurva emisi spektral fosfor dalam tabung sinar katoda, serta transmisi spektral dari filter warna layar kristal cair sedemikian rupa sehingga distribusi daya spektral relatif warna yang ditampilkan sangat berbeda dari warna aslinya.

Reproduksi warna kolorimetri didefinisikan sebagai reproduksi di mana warna memiliki kromatisitas CIE dan pencahayaan relatif sama dengan aslinya, tetapi distribusi daya spektralnya mungkin berbeda. Dalam kasus cetakan refleksi fotografis, iluminan asli dan reproduksi harus memiliki kromatisitas yang sama. Kolorimetri biasanya dilakukan relatif terhadap referensi yang cukup terang dalam aslinya dan relatif terhadap reproduksinya dalam gambar untuk memastikan pencahayaan relatif yang sama. Hal yang sama berlaku untuk gambar yang ditampilkan pada layar elektronik. Oleh karena itu, reproduksi warna kolorimetri berguna dalam pencitraan, tetapi perlu diingat bahwa penampilan warna dapat dipengaruhi, terkadang secara nyata, oleh intensitas iluminan (serta faktor lain yang disebutkan sebelumnya) dan dengan demikian, reproduksi warna kolorimetri tidak harus menyiratkan ekuasi dalam penampilan warna dalam aslinya dan dalam gambar.

Dalam reproduksi warna yang tepat, chromaticities, luminansi relatif dan luminansi absolut dari warna-warna tersebut adalah sama dalam aslinya dan dalam reproduksi. Dengan demikian, perbedaan intensitas luminansi yang ada dalam reproduksi warna kolorimetri dihilangkan di sini. Jenis reproduksi ini juga disebut sebagai reproduksi warna kolorimetri absolut. Dalam prakteknya, pengamat jarang akan melihat warna yang sama dalam reproduksi warna yang sama persis dan aslinya. Perbedaan penampilan terutama karena lingkungan tampilan (surround, sudut subtense dan lihat nanti), silau, status adaptasi visual, dan distribusi daya spektral iluminan yang tidak identik.

Jika studio televisi diterangi oleh cahaya tungsten dan pemandangan direproduksi dengan akurasi kolorimetrik dalam situasi menonton di mana cahaya sekitar siang hari, hasilnya akan terlihat terlalu kuning bagi pemirsa. Reproduksi warna yang setara mungkin merupakan jenis reproduksi yang sesuai dalam contoh ini. Ini didefinisikan sebagai reproduksi di mana kromatisitas dan pencahayaan relatif dan absolut warna sedemikian rupa sehingga, jika dilihat dalam kondisi display image, mereka memiliki tampilan yang sama seperti pada pemandangan aslinya. Demikian pula, dalam reproduksi warna yang sesuai, chromaticities dan luminansi relatif dari warna-warna tersebut sedemikian rupa sehingga, jika dilihat dalam kondisi display image, mereka memiliki tampilan yang sama seperti warna aslinya, jika telah diterangi untuk menghasilkan tingkat luminansi rata-rata yang sama dengan reproduksi. Reproduksi warna

yang sesuai terkait dengan reproduksi warna yang setara dengan cara yang sama seperti reproduksi warna kolorimetri dengan reproduksi warna yang tepat. Reproduksi warna yang setara dan sesuai disebut sebagai reproduksi warna penampilan.

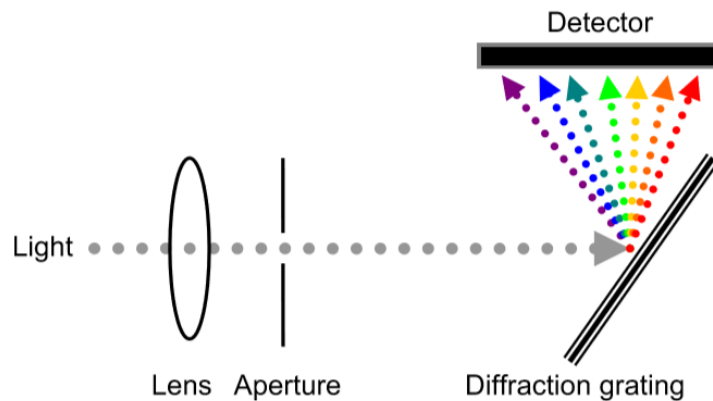
Terakhir, reproduksi warna yang disukai didefinisikan sebagai reproduksi di mana warna berangkat dari kesamaan tampilan antara aslinya dan reproduksi untuk memberikan reproduksi yang lebih menyenangkan, sementara putih absolut atau relatif pada aslinya dipertahankan. Ada cukup bukti bahwa banyak warna yang biasa ditemui, seperti warna kulit, warna rumput, langit biru, air biru dan lain-lain lebih disukai secara berbeda dari warna kehidupan nyata. Reproduksi warna yang disukai mungkin menjadi tujuan dalam banyak aplikasi fotografi, seperti fotografi periklanan, tetapi tujuannya agak sulit dicapai dengan menggunakan prosedur reproduksi otomatis. Dalam gambar digital konsumen, produsen sistem pencitraan menyediakan profil warna yang dioptimalkan untuk menghasilkan reproduksi yang 'menyenangkan'. yang dibuat untuk memuaskan opini pengamat/konsumen tentang reproduksi subjek yang biasa difoto.

Menurut H. Che-Li (2005), adalah berguna untuk membagi reproduksi warna apa pun menjadi tiga kategori utama: (1) reproduksi warna subjektif yang menentukan reproduksi yang diinginkan menurut kesan visual; (2) reproduksi warna psikofisik yang mengubah kriteria subjektif yang ditentukan dalam (1) menjadi kriteria yang dapat diukur secara fisik; dan (3) reproduksi warna objektif yang berhubungan dengan kalibrasi dan pengontrolan perangkat pencitraan untuk reproduksi yang diinginkan dalam hal kuantitas fisik.

Instrumen yang digunakan dalam pengukuran warna

Ada tiga jenis pengukuran dalam pencitraan warna: pengukuran spektral, kolorimetri, dan densitas. Pada bagian ini kami memperkenalkan instrumen yang digunakan untuk pengukuran spektral dan kolorimetri. Densitometer, digunakan untuk mengukur densitas dari cetakan foto dan film serta keluaran hard copy lainnya.

Deskripsi paling lengkap dari stimulus warna adalah distribusi daya spektral absolutnya, yang merupakan deskripsi radiasi optik (pancaran spektral atau pancaran spektral) sebagai fungsi panjang gelombang. Spektroradiometer digunakan untuk tujuan tersebut (Gambar 30). Spektroradiometer terdiri dari sekumpulan optik pengumpul yang menyatukan cahaya yang berasal dari rangsangan yang membentuk berkas gambar yang mencapai monokromator. Kisi difraksi (atau prisma optik) digunakan di dalam monokromator untuk menyebarkan cahaya ke dalam komponen spektralnya. Pita sempit yang dipilih (atau panjang gelombang idealnya tunggal) dari cahaya datang difokuskan pada satu atau beberapa detektor, diambil sampelnya dan direkam. Spektroradiometer modern menggunakan array perangkat berpasangan biaya (CCD) untuk merekam karena karakteristik input-ke-outputnya yang hampir linier. Lampu dengan keluaran spektral yang dikalibrasi dan diketahui digunakan untuk kalibrasi instrumen. Hal ini dimungkinkan untuk melengkapi spektrofotometer dengan jenis lensa pencitraan teleskopik, dalam hal ini daya pancaran spektral dapat diukur melalui celah sempit - dari area yang sangat kecil dalam pemandangan. Ini adalah fitur yang berguna ketika rangsangan adalah pemandangan yang kompleks, juga berguna untuk pengukuran titik tampilan - yaitu telespektroradiometri. Spektroradiometer biasanya mengukur pada rentang 380-780 nm, pada resolusi spektral 1e10 nm. CIE menunjukkan bahwa untuk sebagian besar pengukuran spektral, interval pengambilan sampel 2-nm sudah cukup. Spektroradiometer digunakan untuk mengukur spektrum emisi dan reflektif. Untuk spektrum reflektif, sumber cahaya yang sesuai (putih, dengan spektrum halus) digunakan untuk menerangi subjek.



Gambar 30 Spektroradiometer.

Untuk banyak aplikasi pencitraan, hanya distribusi kekuatan spektral relatif dari rangsangan yang diperlukan. Ini dapat diukur dengan menggunakan spektrofotometer, instrumen yang mengukur fluks cahaya relatif terhadap efisiensi cahaya manusia. Spektrofotometer adalah instrumen yang mirip dengan spektroradiometer tetapi memiliki sumber cahayanya sendiri. Ini tidak digunakan untuk mengukur rangsangan emisi tetapi hanya refleksi spektral atau transmisi dari objek. Spektrofotometer digunakan untuk mengukur spektrum dari cetakan dan target film untuk mengkalibrasi printer dan scanner, tetapi tidak digunakan untuk tampilan. Geometri pengukuran untuk pengaturan sensor/iluminasi dapat bervariasi tergantung aplikasi. Target kalibrasi disediakan dengan instrumen, yang terdiri dari ubin putih dan abu-abu sedang dan perangkat cahaya untuk menyiapkan titik hitam (yaitu tingkat noise).

Pengukuran kolorimetri langsung dapat diperoleh dengan colorimeter yang mengukur nilai tristimulus (CIEXYZ) dan melaporkannya, atau pencahayaan dan kromatisitas (Y, x, y), atau nilai dari ruang warna terkait seperti CIELAB, tanpa harus mengukur distribusi daya spektral. Colorimeter menggunakan filter warna khusus di depan detektor cahaya, yang memungkinkan sensitivitas perangkat yang kira-kira cocok dengan fungsi pencocokan warna CIE 1931 dan oleh karena itu memiliki respons yang relatif serupa dengan yang ada pada pengamat standar CIE 2°. Colorimeter lebih murah daripada spektroradiometer atau spektrofotometer dan dapat melakukan pengukuran lebih cepat. Beberapa colorimeter memiliki sumber cahaya internal untuk mengukur warna dari objek reflektif, tetapi kebanyakan hanya mengukur rangsangan emisi atau objek yang diterangi secara eksternal. Nilai tristimulus untuk sampel di bawah iluminasi berbeda mungkin merupakan fungsi yang tersedia. Kebanyakan colorimeter adalah instrumen genggam, seperti yang digunakan untuk pengukuran CRT. Perangkat yang lebih besar dan lebih mahal juga tersedia yang menggunakan optik teleskopik dan lubang kecil, seperti yang digunakan untuk pengukuran LCD.

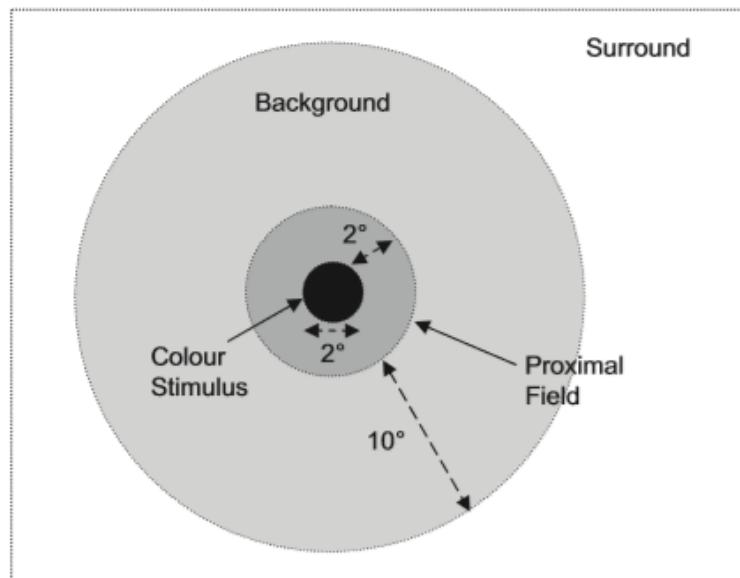
Melihat kondisi

Persepsi warna sangat dipengaruhi oleh lingkungan tempat stimulus warna dilihat. Jadi, saat mempertimbangkan rangsangan warna terkait (yaitu warna yang tidak dilihat secara terpisah), atau pemandangan warna dan gambar, penting untuk mendeskripsikan dengan tepat lingkungan menonton atau kondisi tampilan. Kosakata yang digunakan untuk mendeskripsikan bidang visual individu yang terdiri dari kondisi menonton secara keseluruhan ditetapkan pada Gambar 31. Kosakata ini adalah komponen penting dari pemodelan tampilan warna:

- *Stimulus warna*. Elemen warna yang menarik. Ini dianggap sebagai patch warna seragam dari 2° subtense sudut. Dalam pencitraan pemandangan yang kompleks secara

spasial, sulit untuk mengatakan apakah stimulusnya adalah piksel, sekumpulan piksel, atau keseluruhan gambar. Yang terakhir kadang-kadang diasumsikan, tetapi ini adalah penyederhanaan. Saat ini, tidak ada definisi stimulus yang disepakati secara universal untuk adegan kompleks. Saat menggunakan CIECAM02 yang direkomendasikan CIE saat ini yang dirancang untuk manajemen warna dan aplikasi pencitraan, sebagian besar aplikasi mengasumsikan bahwa setiap piksel dapat diperlakukan sebagai stimulus terpisah.

- *Bidang proksimal*. Lingkungan antara stimulus warna, biasanya meluas sekitar 2° dari tepinya di sebagian besar atau semua arah. Sekali lagi, dalam pencitraan, sangat sulit untuk memisahkan stimulus dari bidang proksimalnya. Pada kebanyakan aplikasi, bidang proksimal diasumsikan sama dengan gambar latar belakang.
- *Latar Belakang*. Bidang visual memanjang 10° dari tepi bidang proksimal, di sebagian besar atau semua arah. Ketika bidang proksimal dianggap sebagai bagian dari latar belakang, bidang yang terakhir dianggap membentang dari tepi stimulus warna. Dalam pencitraan, latar belakang biasanya dianggap sebagai area yang memanjang 10° dari keseluruhan gambar. Spesifikasi latar belakang sangat penting dalam warna dan display image, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 29.
- *Mengelilingi*. Bidang yang mengelilingi apa pun di luar latar belakang. Ini dianggap sebagai keseluruhan lingkungan di mana stimulus dipandang. Dalam aplikasi pencitraan, surround sering kali termasuk dalam salah satu dari tiga kategori berikut: gelap, redup, dan sedang.



Gambar 31 Lingkungan tampilan dalam warna terkait.

Lingkungan menonton, seperti dijelaskan di sini, digunakan dalam pemodelan tampilan warna dan gambar. Meskipun ini adalah penyederhanaan dari total lingkungan di mana rangsangan dan gambar terkait dilihat, ini mencakup faktor terpenting yang mempengaruhi penampilan warna.

SISTEM MANAJEMEN WARNA

Pengantar

Kemajuan gambar digital telah menyebabkan perkembangan berbagai teknologi dan perangkat untuk menangkap, menampilkan, dan mengeluarkan data gambar. Meskipun hal ini memberikan fleksibilitas yang tinggi dan berbagai macam pilihan dalam hal imaging chain dan alur kerja gambar, ini berarti bahwa aspek-aspek tertentu dari kontrol gambar jauh lebih kompleks daripada aspek-aspek tersebut dengan pencitraan halida perak. Contoh paling jelas adalah reproduksi warna digital. Karena begitu banyak metode alternatif yang digunakan untuk menangkap dan mereproduksi warna dalam perangkat digital, gambar akan melewati berbagai ruang warna yang berbeda dan dibatasi oleh berbagai colour gamut saat bergerak melalui imaging chain. Nilai warna harus diinterpretasikan dan diubah antara ruang warna dan keputusan harus dibuat tentang bagaimana menangani warna di luar gamut. Untuk sebagian besar aplikasi pencitraan, proses ini ditangani oleh sistem manajemen warna.

Tugas Manajemen Warna

Sistem manajemen warna (CMS) adalah kumpulan alat perangkat lunak yang digunakan untuk mengelola proses spesifikasi warna dan komunikasi melalui imaging chain. Tujuan utama dari sistem semacam itu mencakup produksi representasi yang hampir identik dari pemandangan yang sama dari berbagai jenis perangkat input (dicapai dengan penyesuaian perangkat), dan produksi gambar yang hampir identik pada berbagai jenis perangkat output (dicapai dengan pemrosesan gambar). Yang pertama dari tujuan ini berarti bahwa perangkat dikontrol sehingga dua perangkat input yang berbeda akan menghasilkan rangkaian nilai digital yang hampir sama dalam ruang warna yang tidak bergantung perangkat dari pemandangan atau gambar asli yang sama. Dalam praktiknya, tentu saja, pencocokan tepat mungkin tidak dapat dilakukan; Oleh karena itu, tujuannya adalah untuk mencapai hasil yang dapat diprediksi dalam batasan perangkat. Tujuan kedua berarti bahwa jika gambar dalam bentuk sekumpulan nilai digital dalam ruang warna yang tidak tergantung perangkat dikirim ke dua perangkat output yang berbeda, gambar harus disesuaikan sehingga tampilan warna gambar tampak identik (atau sebagai sedekat mungkin) di dua keluaran.

Ada sejumlah langkah mendasar yang diperlukan untuk mencapai tujuan utama terjemahan warna yang tidak tergantung perangkat. tetapi diringkaskan di sini. Kalibrasi perangkat melibatkan pengaturan dan modifikasi perilakunya ke keadaan yang diinginkan (yang mungkin merupakan spesifikasi standar). Ini menetapkan titik awal yang diketahui untuk pengukuran reproduksi warna perangkat. Pengelolaan warna yang berkelanjutan akan melibatkan kalibrasi ulang perangkat ke status ini. Karakterisasi perangkat berkaitan dengan mengukur respons perangkat dan mendeskripsikannya secara independen perangkat (yaitu dalam hal kolorimetri CIE). Dalam konteks pembahasan ini, proses karakterisasi menghasilkan profil gambar yang mungkin disematkan atau ditetapkan ke gambar. Penting untuk dicatat bahwa karakterisasi hanya akan akurat untuk perangkat dalam keadaan terkalibrasi di mana ia diukur, oleh karena itu perlu kalibrasi berkelanjutan, untuk mengembalikan perangkat ke keadaan ini.

CMS menggunakan data karakterisasi di setiap profil perangkat untuk mengimplementasikan konversi warna (atau transformasi warna) di antara ruang warna. Tujuan konversi mungkin untuk mereproduksi warna dengan akurasi kolorimetri, atau untuk mencapai 'reproduksi yang menyenangkan'. yaitu menghasilkan reproduksi yang optimal dalam konteks tertentu. Sistem manajemen warna modern cukup fleksibel untuk mencapai keduanya. CMS juga harus menangani ketidakcocokan gamut melalui sistem. Pendekatan yang

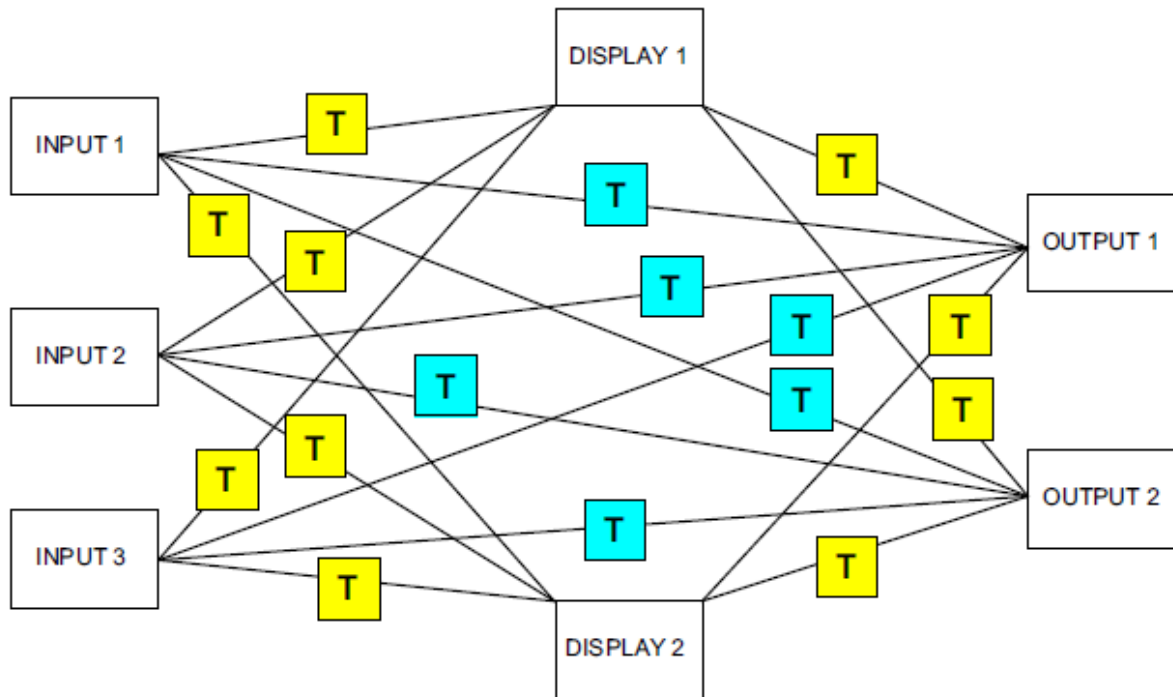
digunakan dalam pemetaan warna out-of-gamut harus fleksibel dan harus didefinisikan dengan mengacu pada tujuan reproduksi berbagai aplikasi pencitraan yang berbeda.

Manajemen warna Closed-Loop versus Open-Loop

Manajemen reproduksi warna dalam sistem gambar digital awal disederhanakan dengan menangani imaging chain yang sangat terbatas, dan menggunakan pendekatan yang serupa dengan yang digunakan dalam sistem reproduksi warna fotografis kelas atas. Hal ini dimungkinkan karena jumlah perangkat input dan output yang tersedia jauh lebih sedikit daripada variasi yang tersedia saat ini. Selain itu, gambar digital cenderung lebih umum digunakan dalam arus kerja profesional kelas atas, karena banyak perangkat gambar digital awal harganya sangat mahal bagi konsumen rata-rata.

Bekerja dalam batasan imaging chain kecil berarti bahwa masalah konversi warna dan manajemen secara signifikan lebih sederhana daripada pada tahap lanjutan pengembangan sistem gambar digital saat ini. Secara umum, imaging chain akan didasarkan pada satu perangkat input dan output, dengan operator yang terampil mengelola keduanya melalui beberapa bentuk antarmuka perangkat lunak. Pendekatan seperti itu dikenal sebagai manajemen warna loop tertutup. Contoh tipikal dari aliran kerja semacam itu adalah penggunaan scanner drum untuk mendigitalkan gambar, menghasilkan keluaran ke beberapa bentuk printer digital. Scanner drum awal akan memindai menggunakan pengganda foto tersaring RGB, tetapi akan mengeluarkan nilai CMYK, yang akan spesifik dan dioptimalkan untuk perangkat output tertentu. Sistem ini biasanya dikelola oleh satu operator, yang akan memperoleh pengetahuan tentang karakteristik reproduksi warna dari seluruh rantai dari waktu ke waktu dan akan dapat menyempurnakan perangkat atau keluaran untuk mengimbangi penyimpangan warna.

Transformasi warna tunggal diperlukan untuk sistem seperti itu, menerjemahkan nilai warna secara langsung dari perangkat ke perangkat di antara dua ruang warna. Hal ini dimungkinkan untuk mencapai hasil yang sangat berkualitas dengan menggunakan pendekatan loop tertutup, yang, kebetulan, masih digunakan di beberapa sistem berpemilik high-end. Namun, di sebagian besar aplikasi pencitraan saat ini, imaging chain kemungkinan besar terdiri dari berbagai perangkat input dan output yang memungkinkan. Oleh karena itu, persyaratannya adalah untuk fleksibilitas dan interoperabilitas antara alur kerja dan imaging chain yang berbeda.

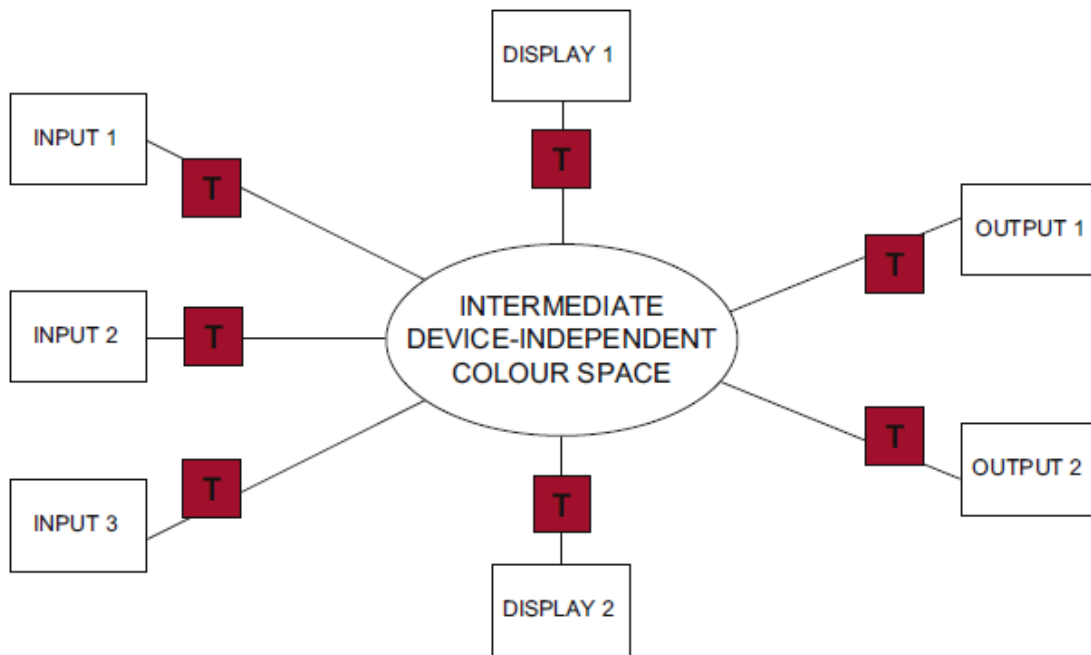


Gambar 32 Manajemen warna loop tertutup. Transformasi perangkat-ke-perangkat harus dibuat antara setiap perangkat sumber dan tujuan. Dalam diagram ini, perangkat tampilan berperilaku sebagai perangkat sumber dan tujuan. Jumlah total transformasi yang diperlukan adalah $m \times n$ antara perangkat input dan output saja (dalam hal ini 3×2 , ditandai dengan warna biru), dan selanjutnya $(m + n) \times$ jumlah perangkat tampilan antara perangkat tampilan dan semua perangkat lain (dalam kasus ini 5×2 , ditandai dengan warna kuning), total 16 transformasi untuk imaging chain ini.

Gambar 32 mengilustrasikan masalah yang muncul saat mencoba menambahkan perangkat ke sistem manajemen warna loop tertutup. Untuk setiap perangkat masukan baru yang ditambahkan, transformasi warna perangkat ke perangkat harus didefinisikan antara perangkat baru dan semua perangkat output lain dalam sistem. Hal yang sama berlaku untuk perangkat output baru, yang membutuhkan transformasi untuk didefinisikan dengan semua perangkat masukan. Untuk m perangkat sumber dan n perangkat tujuan, transformasi $m \times n$ akan diperlukan. Setiap kali perangkat dikalibrasi ulang atau perangkat baru ditambahkan, m transformasi lebih lanjut (jika perangkat output) atau n transformasi (jika perangkat input) harus dihitung. Situasi ini semakin diperumit oleh fakta bahwa perangkat tampilan dapat berperilaku sebagai perangkat sumber atau tujuan dalam kaitannya dengan imaging chain manajemen warna. Semakin banyak perangkat yang ditambahkan, pendekatan loop tertutup dengan cepat menjadi tidak praktis.

Solusi untuk masalah ini adalah dengan menggunakan ruang warna standar perantara sebagai 'hub' di mana semua nilai warna diubah, daripada mengubah nilai secara langsung dari perangkat ke perangkat. Selanjutnya hanya perlu untuk mendefinisikan hubungan antara setiap perangkat dan ruang warna ini, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 33. Ruang warna seperti itu harus independen dari perangkat dan karena itu dapat menentukan nilai warna dengan jelas. Konversi antar perangkat dilakukan melalui ruang warna perantara dan setiap perangkat akan memerlukan spesifikasi hanya satu transformasi ke dalam atau ke luar ruang warna ini. Jumlah total transformasi yang diperlukan dikurangi menjadi n transformasi untuk n perangkat, dan kalibrasi ulang perangkat atau penambahan perangkat baru hanya akan

memerlukan satu transformasi tambahan. Ini disebut manajemen warna loop terbuka dan merupakan dasar dari arsitektur manajemen warna Konsorsium Warna Internasional (ICC).



Gambar 33 Manajemen warna loop terbuka. Ruang warna perangkat-independen perantara digunakan sebagai ‘hub’. Profil menyediakan transformasi untuk setiap perangkat ke dalam dan ke luar ruang ini saja; tidak ada transformasi perangkat-ke-perangkat. Jumlah transformasi yang diperlukan sekarang dikurangi menjadi sama dengan jumlah perangkat.

ICC (International Color Consortium)

Pembahasan ini membahas subjek manajemen warna dalam kerangka yang ditentukan oleh ICC. Arsitektur ICC menyediakan metode standar penerapan manajemen warna dalam sistem berbasis profil.

Sejumlah perusahaan mengembangkan sistem manajemen warna selama akhir 1980-an dan awal 1990-an, yang mendefinisikan profil warna untuk menyediakan perubahan dan pencocokan warna dari perangkat ke perangkat. Namun, sistem ini adalah hak milik dan kurangnya format profil standar berarti bahwa profil tidak dapat digunakan oleh sistem manajemen warna yang berbeda. ICC didirikan pada tahun 1993 oleh delapan vendor industri, dengan tujuan memberikan solusi untuk masalah ini dan berkembang sebagai spesifikasi untuk arsitektur manajemen warna berdasarkan format profil standar. Saat ini, ICC memiliki sekitar 70 anggota dari semua bidang industri pencitraan dan komputasi. Situs web ICC menyatakan tujuan konsorsium: ‘ Untuk mempromosikan penggunaan dan adopsi sistem pengelolaan warna lintas platform, netral vendor, dan terbuka. ‘ Untuk tujuan ini, spesifikasi format profil standar telah dikembangkan. Profil tersebut didasarkan pada format profil Apple ColorSync.

Versi pertama dirilis pada tahun 1994 dan telah direvisi beberapa kali. Revisi besar terbaru menghasilkan spesifikasi versi terakhir 2, ICC.1: 2001-04, diikuti oleh versi saat ini, ICC.1: 2004-10 (profil versi 4.2.0.0), yang telah menjadi standar ISO 150761: 2005 . Versi terbaru ini telah dikembangkan untuk mengatasi ambiguitas tertentu dalam spesifikasi versi 2. Kedua jenis profil tersebut mungkin digunakan saat ini, tetapi implementasi versi 4 menjadi

lebih luas. Secara umum, pembahasan ini menjelaskan spesifikasi versi 4. Bagian dari penerapannya sama untuk versi 2

Definisi format standar untuk profil warna memungkinkan pengguna untuk bekerja dalam arsitektur manajemen warna yang sama dengan profil yang dibuat oleh vendor yang berbeda. Ini berarti bahwa arsitektur itu sendiri dapat digabungkan ke dalam aplikasi pengeditan gambar yang banyak digunakan, dan menyediakan kerangka kerja untuk memfasilitasi komunikasi warna antara berbagai imaging chain, sistem operasi, dan aplikasi.

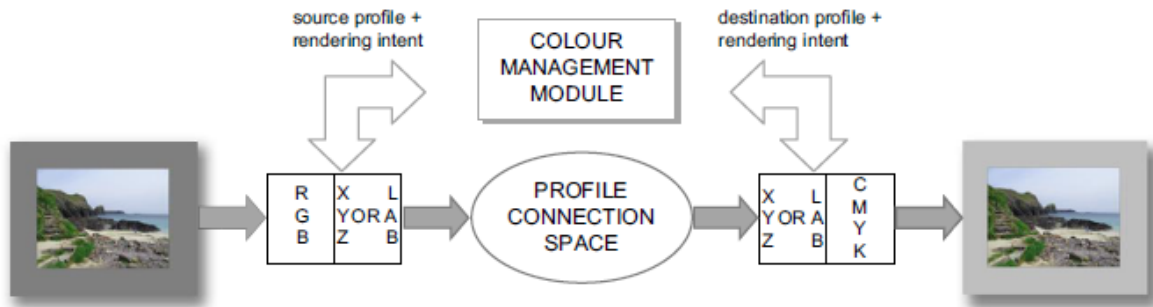
Arsitektur Manajemen Warna ICC

Sistem manajemen warna ICC adalah ekstensi tertanam dari sistem operasi, menyediakan kerangka kerja umum untuk manajemen warna, yang dapat diakses oleh aplikasi yang berbeda. CMS memiliki dua fungsi utama. Yang pertama adalah interpretasi nilai warna khusus perangkat, dan spesifikasinya dalam model warna yang tidak ambigu. Sistem ini juga mengelola konversi nilai warna antara pengkodean ruang warna dan pengkodean gambar yang berbeda, menjaga konsistensi warna melalui imaging chain. Untuk mencapai hal ini, sistem manajemen warna ICC memiliki empat komponen utama. Ini adalah:

- Ruang koneksi profil (PCS), yang merupakan ruang perantara standar di mana semua profil diubah masuk dan keluar.
- Modul manajemen warna (CMM), yang merupakan ‘mesin’ perangkat lunak yang tertanam dalam sistem operasi, dan melakukan semua konversi warna.
- Profil ICC, yang terdiri dari berbagai jenis dan mengikuti format standar ICC. Mereka berisi informasi yang diperlukan untuk konversi warna masuk dan keluar dari PCS.
- Rendering intent, saat ini empat sedang ditentukan, yang memberikan pendekatan berbeda untuk menangani out-of-gamut colours, masing-masing memprioritaskan kualitas gambar tertentu dengan mengorbankan yang lain dan masing-masing dioptimalkan untuk tujuan reproduksi warna dari aplikasi pencitraan tertentu.

Setiap profil ICC berisi informasi yang diperlukan untuk transformasi antara ruang warna dan ruang koneksi profil. Proses konversi warna diilustrasikan pada Gambar 34. Setiap konversi warna antara dua ruang warna membutuhkan sumber dan profil tujuan. CMM menghubungkan dua profil, menghasilkan transformasi di antara keduanya. Informasi yang terkandung dalam profil sumber digunakan untuk mengubah nilai menjadi PCS, di mana nilai warna ditentukan sebagai nilai CIEXYZ atau nilai CIELAB turunan. Profil tujuan menyediakan transformasi dari PCS ke ruang warna keluaran. Nilai yang dihasilkan dari profil, terutama jika didasarkan pada model tabel pencarian, akan memerlukan interpolasi dan ini juga dihitung oleh CMM.

Maksud rendering ditentukan pada titik konversi dan selanjutnya mendefinisikan hubungan antara gamut sumber dan tujuan dalam hal bagaimana warna dirender dari gamut masukan ke gamut keluaran. Sangat umum untuk menemukan beberapa area ketidakcocokan gamut antara gamut perangkat, dan terkadang antara gamut perangkat dan gamut PCS. Ini berarti bahwa beberapa warna yang tersedia dari perangkat masukan mungkin tidak dapat direproduksi pada keluaran dan, sama, warna yang dapat dihasilkan oleh perangkat output mungkin tidak ditangkap oleh perangkat masukan. Dua pendekatan utama digunakan untuk menangani warna out-of-gamut: kompresi gamut mengurangi keseluruhan source gamut agar sesuai dengan ruang tujuan, sedangkan pemotongan gamut hanya menyesuaikan warna out-of-gamut, memotongnya ke batas gamut.



Gambar 34 Konversi warna ICC

Uraian tentang peran komponen-komponen yang diberikan di atas adalah sebagai implementasi default standar arsitektur. Ada kemampuan dalam spesifikasi ICC.1-2004 untuk CMM yang akan diadaptasi untuk menjalankan fungsi yang lebih kompleks, seperti kalkulasi transformasi yang dioptimalkan untuk gambar tertentu, kemungkinan untuk vendor pihak ketiga CMM.

PCS (Profile Connection Space)

Arsitektur didasarkan di sekitar ruang warna referensi menggunakan metode spesifikasi warna yang didefinisikan oleh CIE. Nilai dalam ruang koneksi profil dikodekan sebagai nilai 16-bit XYZ atau 8-atau 16-bit CIELAB, tergantung pada jenis dan implementasi profil. Karena PCS dimaksudkan untuk digunakan sebagai ruang pertukaran untuk menghubungkan profil sumber dan tujuan, PCS memiliki gamut yang cukup besar untuk mencakup gamut dari sebagian besar perangkat dan media masukan dan keluaran. Adegree of restriction diterapkan dalam menentukan PCS, untuk memastikan bahwa hal itu tetap tidak ambigu untuk semua aplikasi pencitraan. Spesifikasi CIE mendefinisikan nilai warna untuk dua pengamat standar, dua geometri pengukuran untuk media pemantul dan rentang iluminan yang berbeda. PCS secara ketat ditentukan untuk 2° pengamat standar relatif terhadap iluminan CIE siang hari D50, meskipun dimungkinkan untuk memberikan nilai menggunakan iluminan lain dengan transformasi adaptasi kromatik antara iluminan dan D50. Nilai diukur untuk media yang dipantulkan menggunakan geometri pengukuran yang ditentukan (0°/45° atau 45°/0°) dan prosedur pengukuran ditentukan untuk media transmisi.

Saat sampel diukur, level iluminasi dan rangsangan di sekitarnya akan memengaruhi penampilan gambar. Sistem CIE tidak mengakomodasi salah satu dari efek ini. PCS harus memasukkan koreksi untuk variabel display image tersebut. Ini dicapai dengan menggunakan PCS untuk membuat gambar dalam dua cara berbeda untuk mengakomodasi kriteria reproduksi yang berbeda. Perbedaan antara keduanya pada dasarnya berkaitan dengan status citra.

Status gambar menjelaskan status rendering data gambar. Pengodean gambar berwarna dapat secara luas diklasifikasikan ke dalam dua status gambar yang berbeda. Data dalam keadaan gambar yang mengacu pada pemandangan mewakili perkiraan koordinat ruang warna dari pemandangan asli (yang mungkin nyata, dimodifikasi atau dihasilkan komputer) tanpa mengacu pada keluaran, yaitu sebelum rendering warna. Karena data semacam itu belum dirender dengan warna, mereka tidak dalam keadaan terlihat. Data dalam status gambar yang dirujuk gambar mewakili koordinat ruang warna dari gambar hard copy atau softcopy, di mana nilai telah dihasilkan melalui transformasi rendering warna (atau rendering ulang) untuk media pencitraan nyata atau virtual tertentu di bawah kondisi tampilan yang ditentukan. Status gambar yang dirujuk gambar mencakup gambar yang telah dipindai dari aslinya, disebut asli yang dirujuk, yang memiliki karakteristik yang digabungkan erat dengan karakteristik

perangkat input, dan gambar yang telah dirender untuk perangkat output tertentu dalam kondisi tampilan tertentu, yang merupakan keluaran dirujuk.

Untuk rendering kolorimetri, PCS mendeskripsikan kolorimetri aslinya dan reproduksinya, menghubungkan nilai kode sumber dengan nilai kode kolorimetri tanpa mengadaptasi display image ke keluaran yang memungkinkan. Data yang di-render ke dalam PCS mungkin dalam status referensi-input atau referensi-output. Tidak akan ada perubahan dalam status gambar, tetapi perubahan pengkodean gambar dengan adaptasi kromatik ke D50 jika sesuai. Rendering kolorimetri dari PCS ke perangkat output lagi juga akan mengubah pengkodean gambar tetapi bukan status gambar, yaitu display image tidak akan dioptimalkan untuk menghasilkan tampilan yang ‘menyenangkan ‘ pada media keluaran.

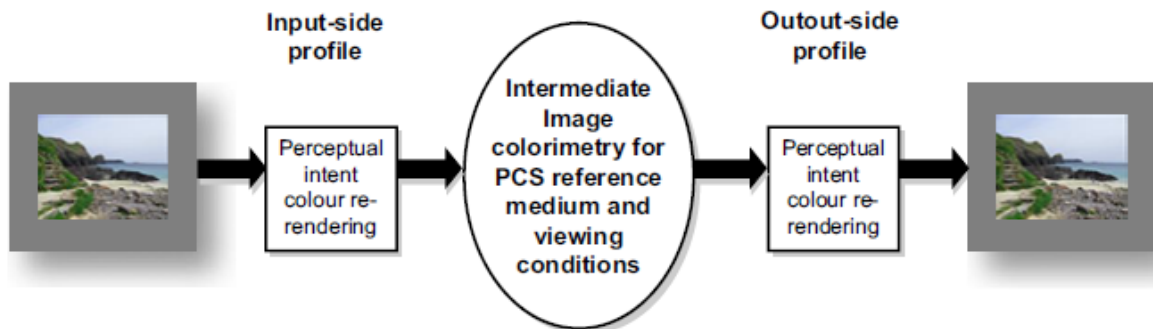
Penggunaan alternatif PCS, rendering persepsi, melibatkan rendering warna atau rendering ulang untuk atau dari output yang ditentukan untuk memberikan tampilan warna yang akurat (atau optimal). Rendering warna dapat didefinisikan sebagai pemetaan data gambar yang dirujuk ke data gambar yang dirujuk gambar, mis. menghasilkan gambar yang dapat dilihat dari pengambilan data mentah. Rendering ulang warna adalah pemetaan data gambar rujukan gambar untuk satu set kondisi keluaran ke data rujukan gambar untuk keluaran lainnya. Ketika PCS digunakan untuk rendering perseptual, kolorimetri aslinya diubah menjadi nilai kolorimetri yang lebih sesuai dengan media reproduksi. Dalam hal ini nilai kolorimetri dalam PCS mewakili warna gambar yang dirender ke media referensi standar (media referensi maksud persepsi ICC PCS, dijelaskan dalam versi 4 dari spesifikasi ICC dan di bawah) di bawah kondisi tampilan yang ditentukan. Gambar yang dirender ke dalam PCS menggunakan rendering persepsi akan dirender ke media referensi. Gambar yang dirender dari PCS ke perangkat output menggunakan perenderan perseptual akan mengasumsikan bahwa gambar tersebut telah menjadi keluaran yang mengacu pada media referensi standar dan akan merender data ke media keluaran alternatif yang diperlukan.

Untuk meringkas, PCS yang beroperasi dalam mode rendering kolorimetrik tidak akan mengubah status gambar, tetapi hanya akan menjelaskan kolorimetri gambar. Dalam mode rendering persepsi, status gambar akan diubah dan kolorimetri gambar akan dijelaskan sebagai ditampilkan ke media referensi standar dalam kondisi tampilan tertentu. Media referensi membatasi gamut dan dynamic range gambar yang dirender menggunakan maksud perseptual, sedangkan tidak ada batasan pada gambar yang dihasilkan oleh rendering kolorimetrik.

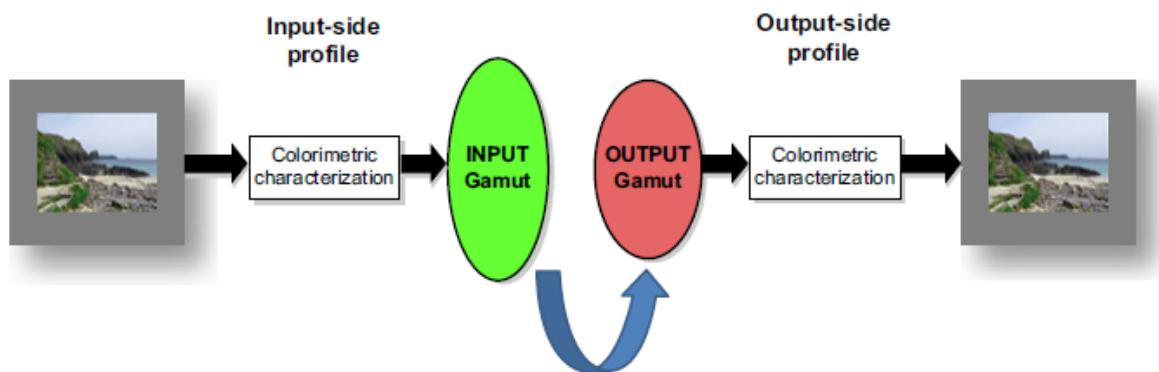
Rendering Intens

Spesifikasi metode rendering yang digunakan, dalam hal bagaimana warna ditangani dalam gamut dan out-of-gamut, ditentukan oleh maksud rendering, yang dipilih pada titik konversi di antara profil. Empat tujuan rendering yang berbeda ditentukan dalam arsitektur ICC.1 versi 4. Setiap tujuan rendering ditentukan oleh transformasi yang berbeda; transformasi untuk tiga dari mereka termasuk dalam profil (mereka mungkin merupakan profil terpisah, atau satu profil dengan beberapa rendering maksud) dan yang keempat berasal dari salah satu dari yang lain (lihat ‘Tujuan kolorimetri absolut ‘ di bawah). Tujuannya adalah untuk mengakomodasi berbagai tujuan reproduksi warna. Tujuan tipikal dalam reproduksi warna adalah proyeksi gambar, yang kadang-kadang digambarkan sebagai penargetan ulang gambar, di mana warna gambar yang direproduksi pada satu perangkat akan disimulasikan di perangkat lain. Dalam skenario ini, di mana warna akan diperiksa, tujuannya adalah untuk memberikan kecocokan yang paling mendekati warna sumber dan tujuan. Intent rendering kolorimetri umumnya paling cocok untuk jenis aplikasi ini. Sasaran utama lainnya dalam reproduksi warna disebut repurposing, di mana warna yang telah dirender ke satu kode warna antara atau

keluaran dirender untuk memberikan reproduksi warna yang optimal pada media yang berbeda. Maksud rendering non-kolorimetri dimaksudkan untuk mengubah tujuan dan mengubah nilai kolorimetri untuk memperhitungkan variabel display image seperti perbedaan antara perangkat sumber dan keluaran, media, dan kondisi tampilan.



Gambar 35 Jalur rendering kolorimetrik



Gambar 36 Jalur rendering kolorimetrik. Berdasarkan gambar dari kertas putih ICC 4 (2004)

Dua maksud rendering kolorimetri ditentukan. Keduanya beroperasi pada nilai kolorimetri yang diukur di bawah iluminan D50, atau secara kromatis disesuaikan dengan D50 jika iluminan alternatif digunakan. Intent kolorimetri secara akurat menjaga hubungan antara warna dalam gamut, membuatnya cocok untuk aplikasi proyeksi, tetapi ini mengorbankan warna out-of-gamut, yang dipotong ke batas gamut untuk kedua maksud. Dampak dari hal ini tentu saja akan bergantung pada berapa banyak warna yang berada di luar gamut ruang tujuan.

Maksud kolorimetri relatif media (sebelumnya maksud kolorimetri relatif dalam spesifikasi versi 2) memetakan media white point ke titik putih PCS (yaitu dengan mengalokasikan media white point ke nilai PCS CIELAB (100,0,0)). Ini memastikan bahwa putih gambar mempertahankan penampilan putuhnya pada media baru, secara efektif dengan mempertimbangkan fakta bahwa kita secara visual beradaptasi dengan putih media yang kita lihat. Semua warna dalam gamut lainnya (yang telah diadaptasi secara kromatis ke D50) diskalakan ulang relatif terhadap media white point. Penskalaan ulang mempertahankan perbedaan relatif antar nilai, tetapi menghasilkan beberapa perubahan pada semua warna.

Dalam kasus maksud kolorimetrik absolut ICC, media white point tidak dipetakan ke putih PCS. Sebaliknya, titik putih iluminan (D50, meskipun nilainya dapat disesuaikan jika iluminan lain digunakan) dipetakan ke PCS LAB (100,0,0). Putih media dipetakan relatif terhadap ini; oleh karena itu, jika memiliki titik kuning-putih maka akan direproduksi sebagai kuning-putih, bukan putih secara visual. Secara efektif gambar akan tampak seperti jika mata

kita tidak beradaptasi secara kromatis dengan media white point. Informasi untuk menghitung nilai kolorimetri absolut ICC tidak disertakan dalam profil tetapi berasal dari nilai yang dihitung relatif media. Profil akan berisi nilai PCS putih media (sebelum dialokasikan ke putih PCS, seperti dijelaskan di atas). Setelah nilai relatif media dihitung, nilai tersebut dapat dihitung ulang relatif terhadap nilai asli media putih, dan ini memberikan nilai kolorimetrik absolut. Oleh karena itu, semua warna dalam gamut, termasuk putih, direproduksi dengan tepat.

Maksud persepsi dirancang untuk menghasilkan gambar yang menyenangkan, tetapi tidak akurat secara kolorimetris, reproduksi gambar sumber, yang kemudian dapat dioptimalkan untuk keluarannya. Seperti yang dijelaskan di bagian sebelumnya, menggunakan maksud persepsi, gambar dirender ke media referensi standar, yaitu rendering ke dalam PCS akan mengubah display image untuk merepresentasikan gambar seperti yang akan muncul di media referensi. Merender dari PCS menggunakan maksud persepsi akan menjadikan display image yang direferensikan ini sebagai titik awal dan mengubahnya untuk media keluaran. Media referensi standar dapat dianggap sebagai bagian dari PCS. Karena semua gambar dirender ke dan dari media ini, gamutnya membatasi jumlah PCS yang dapat digunakan untuk rendering perseptual. Media dipilih untuk memberikan gamut yang merupakan perantara yang berguna antara banyak ruang warna masukan dan keluaran. Intent biasanya menyertakan penyesuaian pada rentang nada untuk memetakan dynamic range gambar dari sumber ke keluaran. Gamut dibengkokkan dan dikompresi untuk menghadirkan warna out-of-gamut di dalam gamut, sambil mempertahankan hubungan antar warna. Maksud persepsi berguna untuk reproduksi umum gambar alami, di mana input dan output berbeda secara signifikan, dan di mana keakuratan kolorimetri bukanlah persyaratan (yaitu tujuannya adalah reproduksi yang menyenangkan). Jika gamut masukan dan keluaran serupa (artinya ada lebih sedikit warna out-of-gamut), maka maksud kolorimetrik relatif-media adalah opsi alternatif. Maksud perseptual adalah khusus vendor; oleh karena itu, detail yang tepat dari rendering warna akan bervariasi antara vendor profil dan CMM. Gambar 36 mengilustrasikan efek konversi menggunakan maksud rendering perseptual, kolorimetri relatif, dan kolorimetrik absolut pada gambar alami.

Niat saturasi juga merupakan spesifikasi vendor. Ini mempertahankan saturasi nilai gambar, dengan kemungkinan kompromi rona dan kecerahan. Oleh karena itu, kejelasan warna murni dipertahankan, jadi maksudnya berguna untuk gambar yang berisi objek grafis seperti bagan dan diagram, tetapi kurang cocok untuk reproduksi gambar alami yang akurat.

Keempat maksud rendering beroperasi menggunakan transformasi pada data yang diasumsikan diadaptasi secara kromatis ke D50. Transformasi yang digunakan untuk adaptasi kromatik akan dimasukkan dalam profil untuk maksud kolorimetri relatif-media saja. Ini bukan persyaratan khusus untuk rendering intent non-colorimetric.

Pada versi sebelumnya dari spesifikasi ICC, empat maksud rendering yang dijelaskan di atas terutama terkait dengan profil printer. Maksud rendering yang diasumsikan untuk input dan tampilan profil tidak diidentifikasi dalam profil dan merupakan salah satu sumber ambiguitas dalam spesifikasi versi 2 (ICC.1: 2001-04). Ini telah diatasi dalam spesifikasi versi 4, di mana profil untuk keempat tujuan rendering dapat dibuat untuk perangkat input dan tampilan serta printer.

Media referensi perseptual intens ICC dan kondisi tampilan referensi

Digunakan hanya untuk maksud persepsi, media referensi didefinisikan sebagai cetakan pada substrat dengan kisaran kerapatan 2,4593 dan putih dengan reflektansi netral 89%. Media juga dipilih untuk memiliki titik hitam pada level yang realistis, sehingga dynamic range-nya mungkin merupakan perantara yang cocok antara gambar dengan dynamic range tinggi dan rendah. Ini memastikan kompresi halus dari rentang tonal ketika sumber memiliki dynamic range yang lebih tinggi dari tujuan. Jika sumber memiliki dynamic range terbatas, maka sumber dapat diperluas ke media referensi sebelum merender ke keluaran. Kondisi tampilan referensi untuk maksud perseptual ditetapkan sebagai iluminan D50 pada tingkat iluminasi 500 lux untuk melihat media cetakan.

Profil ICC

Setiap profil ICC memberikan informasi karakterisasi untuk transformasi warna yang diperlukan untuk mendefinisikan warna dari data gambar yang dikodekan, yang didefinisikan dalam format terbuka. Transformasi dapat diimplementasikan sebagai tabel look-up, matriks dan/atau kurva parametrik. Implementasi yang tersedia akan bergantung pada jenis profil, seperti yang didefinisikan dalam spesifikasi ICC.1 (v. 4). Ada beberapa jenis profil.

Penting untuk membedakan antara jenis profil yang dijelaskan di bawah dan istilah profil sumber dan profil tujuan, karena mungkin terdapat kebingungan. Profil dijelaskan sebagai profil sumber dan tujuan untuk sementara dalam konteks konversi warna tertentu; ini adalah deskripsi peran mereka dalam konversi daripada jenis profil. Oleh karena itu, profil sumber belum tentu merupakan profil masukan. Jika warna dirender ulang dari satu keluaran ke keluaran lainnya, maka sumber dan tujuan dapat menjadi profil keluaran.

Profil perangkat terbagi dalam tiga kelas besar: profil masukan, tampilan, dan keluaran. Profil perangkat berisi deskripsi tiga variabel utama dalam karakteristik reproduksi warna perangkat, nada warna, dynamic range dan reproduksi nada, dan mungkin perangkat tambahan serta informasi khusus vendor.

Profil input digunakan dengan kamera digital dan scanner. Tiga jenis profil input yang berbeda ditentukan: ini adalah n-komponen look-up-table (LUT) berbasis, berbasis matriks tiga komponen, atau skala abu-abu (lihat bagian tentang model pemrosesan profil di bawah). Tipe berbasis matriks tiga komponen hanya dapat digunakan dengan PCS yang dikodekan dalam ruang CIEXYZ. Untuk pengkodean PCS CIELAB, tipe LUT komponen-n harus digunakan. Profil masukan hanya memerlukan definisi transformasi warna dalam satu arah, dari ruang perangkat masukan ke ruang PCS.

Profil tampilan digunakan dengan tabung sinar katoda (CRT) dan tampilan kristal cair (LCD) dan proyektor data, dan memiliki tiga jenis yang sama, dengan pengkodean PCS yang sama dengan profil masukan. Ini adalah profil dua arah, bagaimanapun, berisi transformasi dari perangkat ke PCS dan PCS ke perangkat, karena tampilan berfungsi sebagai perangkat input dan output.

Profil keluaran digunakan dengan printer dan perekam film. Ada dua tipe yang ditentukan: n-komponen LUT dan profil skala abu-abu. Ini juga merupakan profil dua arah, karena printer bertindak sebagai profil tujuan saat gambar di-output, tetapi merupakan profil sumber jika gambar sedang dirender ke media yang berbeda, atau dengan soft-proof. Dalam hal ini display image yang dicetak disimulasikan pada perangkat tampilan; oleh karena itu, profil tampilan adalah profil tujuan.



Gambar 37 Menampilkan maksud. Gambar di atas diubah dari ruang warna Pro Photo RGB ke ruang warna V2 CMYK berlapis Euroscale menggunakan maksud rendering kolorimetrik perseptual, relatif, dan absolut (kiri ke kanan, baris bawah). Perbedaan hasil tidak kentara. Pada pemeriksaan lebih dekat, terlihat bahwa niat persepsi telah menyebabkan hilangnya kecerahan dan saturasi secara keseluruhan, seperti yang diharapkan dari kompresi gamut. Niat kolorimetrik relatif telah memberikan hasil yang sedikit lebih baik, dengan mempertahankan tampilan warna dalam gamut. Maksud kolorimetri absolut telah mempertahankan kecerahan dan saturasi dalam banyak warna, tetapi ada perbedaan yang mencolok pada rona wilayah cahaya di tengah atas gambar, karena titik putih sedang tidak dipetakan ke titik putih PCS . Gambar ‘Oaxaca ‘ iStockphoto.com/Jeff Morse

Selain itu, ada empat kelas profil pemrosesan warna lain yang didefinisikan:

- Profil Device Link adalah jenis khusus dari profil perangkat-ke-perangkat, yang tidak menggunakan ruang koneksi profil sebagai perantara. Transformasi yang terdapat dalam profil menyediakan konversi satu arah langsung dari nilai warna sumber ke tujuan, yang tidak dapat dibalik. Oleh karena itu, profil tersebut khusus untuk kedua perangkat. Empat tujuan rendering yang berbeda dapat dimasukkan sebagai transformasi yang berbeda di dalam profil. Jenis profil ini digunakan (meskipun tidak secara luas) untuk aplikasi yang sangat spesifik (biasanya kelas atas), dan memungkinkan pengguna untuk menambahkan penyesuaian mereka sendiri ke profil. Profil DeviceLink secara efektif menerapkan bentuk manajemen warna loop tertutup, menghasilkan transformasi yang dapat digunakan untuk banyak gambar yang berbeda.
- Profil konversi ruang warna digunakan untuk mengubah nilai antara PCS dan berbagai ruang warna. Ruang warna mungkin tidak tergantung perangkat, seperti CIEXYZ dan CIELAB, atau ruang warna RGB standar, seperti Adobe RGB 98 atau sRGB. Mereka tidak mewakili model perangkat, meskipun mungkin keluarannya mengacu pada media referensi standar.

- Profil abstrak tidak merepresentasikan model perangkat, tetapi digunakan untuk menerapkan efek spesifik ke gambar, misalnya menerapkan tampilan atau gaya gambar yang sama ke sekumpulan gambar. Profil abstrak memungkinkan transformasi dari PCS ke PCS, mendefinisikan nilai CIEXYZ atau CIELAB untuk input dan output, dan membuat LUT di antara keduanya untuk mengimplementasikan pemetaan efek tertentu. Mereka tidak banyak digunakan, tetapi tersedia di beberapa aplikasi manajemen warna khusus.
- Profil warna yang dinamai digunakan dengan sistem warna bernama, seperti Pantone™ atau warna kustom khusus vendor. Profil tersebut digunakan bersama dengan profil perangkat, dan secara khusus mengacu pada warna yang direproduksi pada perangkat itu. Mereka berisi tag Colour2 Bernama untuk setiap warna bernama, yang menyediakan representasi PCS dari warna dan secara opsional representasi perangkat. Representasi perangkat menentukan koordinat perangkat yang tepat untuk warna yang dinamai pada perangkat itu, oleh karena itu memastikan bahwa warna yang disebutkan direproduksi secara akurat. Representasi PCS dapat digunakan untuk memperkirakan nilai-nilai ini dengan akurasi yang wajar.

Penggunaan Profil

Profil memiliki dua fungsi dalam arsitektur CMS. Yang pertama adalah asosiasi dengan gambar (dengan menyematkan atau menetapkan profil), untuk memungkinkan CMS menafsirkan arti nilai warnanya, dengan memberikan informasi yang diperlukan untuk menerjemahkan nilai ke ruang warna yang tidak tergantung perangkat. Ketika mengkonversi antar ruang warna, profil ini akan bertindak sebagai profil sumber. Mereka juga memberikan informasi untuk konversi dari nilai yang tidak tergantung perangkat ke nilai dalam ruang warna yang berbeda (yang mungkin ruang warna lain yang tidak tergantung perangkat, seperti ruang warna RGB standar, atau ruang warna keluaran yang bergantung perangkat). Dalam hal ini, profil berperilaku sebagai profil tujuan.

Metode alternatif untuk mengasosiasikan profil dengan gambar adalah dengan menetapkannya. Opsi untuk menetapkan profil disertakan dalam aplikasi pengeditan gambar. Menetapkan profil akan menentukan penggunaan profil tersebut sebagai profil sumber saat gambar ditampilkan atau dikonversi. Jika sebuah gambar dibawa ke dalam aplikasi tanpa profil terkait, maka itu harus diberi sebuah profil untuk memungkinkan nilai-nilainya diinterpretasikan.

Menetapkan dan menyematkan profil tidak melibatkan konversi nilai warna apa pun, hanya interpretasi yang ditawarkan. Oleh karena itu, mereka tidak merusak. Sebuah gambar dapat ditempatkan kembali di banyak profil berbeda tanpa degradasi sama sekali. Meskipun nilai gambar tidak berubah, display image di layar akan menyesuaikan atau lebih kecil. Ketika sebuah gambar yang ditampilkan pada layar dengan profil terkait tertentu memiliki profil berbeda yang ditetapkan padanya, display image yang ditampilkan akan berubah. Ini karena interpretasi alternatif telah diterapkan pada nilai warna sumber, memberikan nilai PCS yang berbeda dan nilai keluaran yang berbeda ketika gambar diubah untuk ditampilkan. Namun, penting untuk dicatat bahwa konversi untuk tampilan ini juga tidak merusak. Ini karena konversi untuk menampilkan ruang warna diterapkan pada data saat dikirim ke kartu video, tanpa mempengaruhi gambar itu sendiri.

Konversi gambar antara profil warna (selain ke tampilan) menurut sifatnya mengubah nilai gambar, karena ditentukan oleh koordinat ruang warna yang berbeda. Namun, tujuan

konversi adalah untuk mereproduksi display image seakurat mungkin dalam batasan yang diberlakukan oleh penggunaan ruang warna dan media sumber dan tujuan yang berbeda. Oleh karena itu, meskipun nilai gambar akan berubah, tujuan dalam konversi adalah agar perubahan display image menjadi minimal.

Pertimbangan penting saat mengonversi gambar di antara ruang warna adalah implikasi dari hilangnya data. Kesalahan pembulatan yang terjadi sebagai akibat konversi antara bilangan bulat dan beberapa konversi akan memperburuk kesalahan tersebut. PCS biasanya mendefinisikan data dengan presisi yang lebih tinggi daripada kedalaman bit gambar, yang dapat membantu mengurangi kehilangan ini. Bekerja dengan gambar 16-bit daripada 8-bit juga membantu meminimalkan garis warna yang mungkin terjadi. Seperti yang telah kita lihat, pemetaan gamut dapat dicapai dengan kompresi gamut, pembengkokan, atau pemotongan nilai, bergantung pada maksud rendering yang dipilih. Warna out-of-gamut akan hilang dalam konversi dan biasanya tidak mungkin diambil. Akhirnya, sebagian besar profil memerlukan beberapa bentuk interpolasi selama konversi. Ini berlaku untuk kurva reproduksi nada yang disimpan sebagai kumpulan titik sampel (bukan nilai gamma) dalam LUT satu dimensi, yang mungkin diinterpolasi secara linier dan mungkin ada di semua jenis profil. Profil di mana transformasi warna dicapai dengan menggunakan LUT (lihat model pemrosesan tabel Pembentuk/multifungsi di bawah) akan memerlukan interpolasi antara nilai-nilai dalam tabel pencarian. Akurasi interpolasi akan ditingkatkan dengan meningkatkan jumlah entri di LUT, tetapi ini harus diimbangi dengan kebutuhan untuk membatasi ukuran profil.



Gambar 38 Perubahan display image sebagai hasil dari penetapan profil yang berbeda. Warna bergeser dan di beberapa area tampak lebih jenuh saat gambar diberi profil dengan gamut berbeda, dari kiri ke kanan: sRGB, Adobe RGB 98, Kodak ProPhoto RGB. (Perhatikan bahwa Kodak ProPhoto RGB adalah versi ROMM RGB, dinormalisasi sehingga $Y = 1$ untuk referensi putih; untuk detail lebih lanjut tentang ROMM RGB.)

Model Pemrosesan Profil

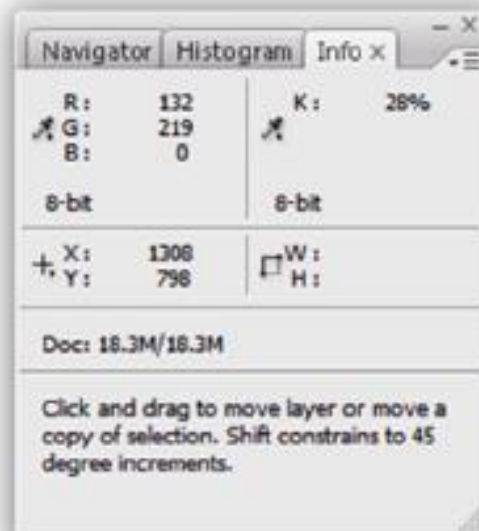
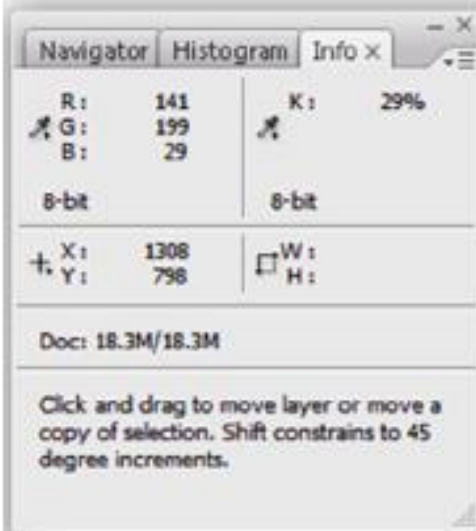
Ada beberapa model berbeda yang digunakan untuk memproses data warna dalam sebuah profil ke atau dari ruang koneksi profil. Jenis yang digunakan akan bergantung pada kelas profil. Model yang paling sederhana adalah matriks/model pemrosesan TRC (TRC adalah singkatan dari kurva transfer), yang menggunakan kombinasi kurva reproduksi nada dan matriks 3×3 untuk transformasi warna. Model ini hanya digunakan untuk RGB dan profil saluran tunggal untuk perangkat input dan tampilan. Saat mentransformasikannya menjadi PCS, ketiga komponen warna tersebut pertama-tama diproses melalui kurva respons nada perangkat yang sesuai untuk mengubah nilai RGB non-linier ke nilai RGB linier. Hal ini paling sering dicapai dengan menggunakan tiga LUT satu dimensi, meskipun dapat ditentukan secara alternatif hanya dengan memberikan nilai gamma untuk setiap komponen warna. Nilai linierisasi kemudian dilewatkan melalui transformasi matriks untuk memberikan nilai PCS XYZ. Nilai matriks ditentukan oleh tag pewarna (lihat bagian selanjutnya). Baik kurva atau matriks dapat menyertakan adaptasi titik putih. Transformasi dari nilai PCS ke perangkat, adalah pembalikan sederhana dari proses ini. Kurva reproduksi nada terbalik dan matriks terbalik tidak disertakan dalam profil, tetapi akan dihitung dari transformasi maju oleh modul manajemen warna. Model berbasis matriks hanya mendukung maksud kolorimetri relatif-media (dari mana maksud kolorimetri absolut dapat diturunkan).



ORIGINAL

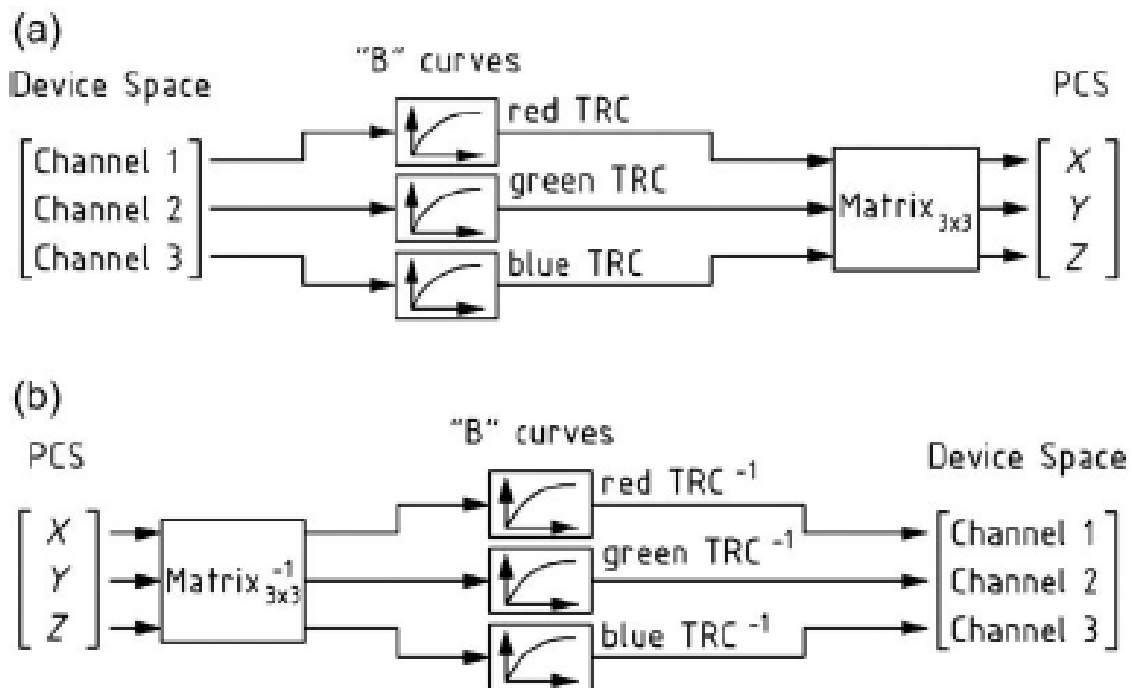


CONVERTED



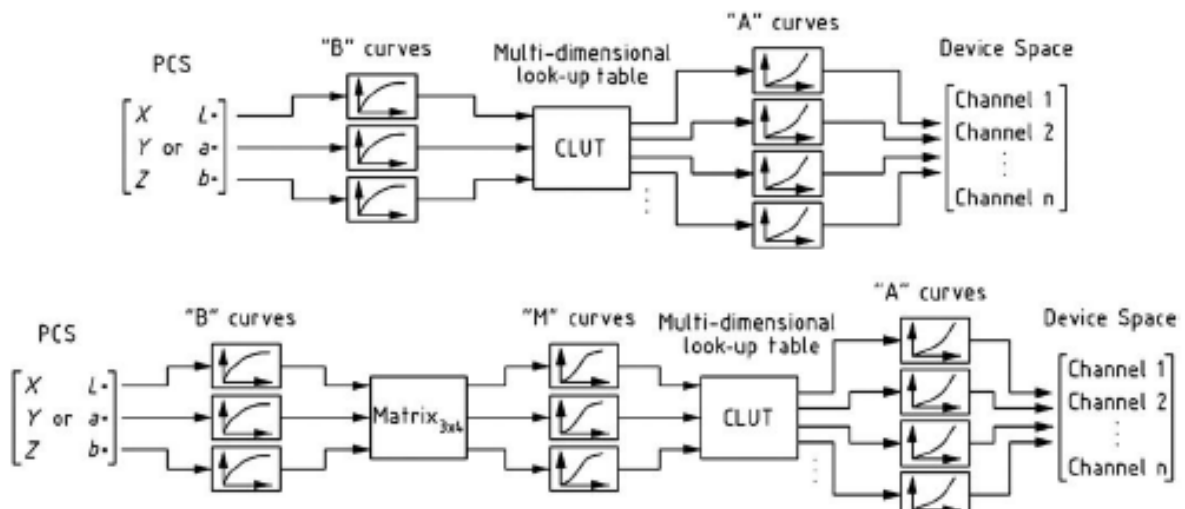
Gambar 39 Konversi antar profil. Gambar asli di sebelah kiri memiliki profil ProPhoto RGB yang telah ditetapkan. Gambar di sebelah kanan telah diubah dari ProPhoto RGB ke ruang warna sRGB. Kotak informasi di bawah setiap gambar menunjukkan nilai RGB piksel pada posisi yang sama (1308.798) di tengah setiap gambar. Konversi antara profil telah mengubah nilai RGB piksel cukup signifikan sebagai hasil dari gamut yang berbeda dari dua ruang warna, dengan perubahan minimal pada display image.

Jenis profil selain profil input dan tampilan bergantung pada penggunaan LUT untuk memproses warna masuk dan keluar PCS. Ini karena konversi warna yang lebih kompleks tidak dapat dicapai secara akurat dengan menggunakan model matriks/TRC. Model berdasarkan LUT lebih kompleks untuk diterapkan dan mungkin ada ambiguitas dalam nilai interpolasi, tetapi sangat fleksibel, memberikan akurasi yang wajar untuk banyak perangkat. Ada empat kemungkinan model implementasi model LUT yang diidentifikasi dalam spesifikasi profil ICC versi 4. Ini bervariasi dalam kompleksitas. Dua alternatif untuk PCS ke perangkat, yang dikenal sebagai 'tipe Lut B ke A', diilustrasikan pada Gambar 40.. Model-model ini dapat berisi hingga lima elemen berbeda, dan salah satu atau semuanya dapat digunakan. Selain LUT satu dimensi, yang dapat mengimplementasikan berbagai fungsi transfer, model juga dapat menyertakan matriks dan tabel pencarian multi-dimensi, CLUT, yang menggabungkan komponen warna. LUT mungkin memiliki presisi 8 atau 16-bit. Isi dari LUT dan matriks tidak ditentukan dalam spesifikasi ICC dan oleh karena itu merupakan spesifikasi vendor. Karena model pemrosesan matriks/TRC hanya dapat digunakan dengan CIEXYZ sebagai PCS, semua profil yang memerlukan CIELAB PCS harus menggunakan model LUT. Perlu dicatat bahwa profil input dan tampilan tidak terbatas pada model pemrosesan matriks/TRC, tetapi juga dapat menggunakan model berdasarkan LUT.



Gambar 40 Model pemrosesan

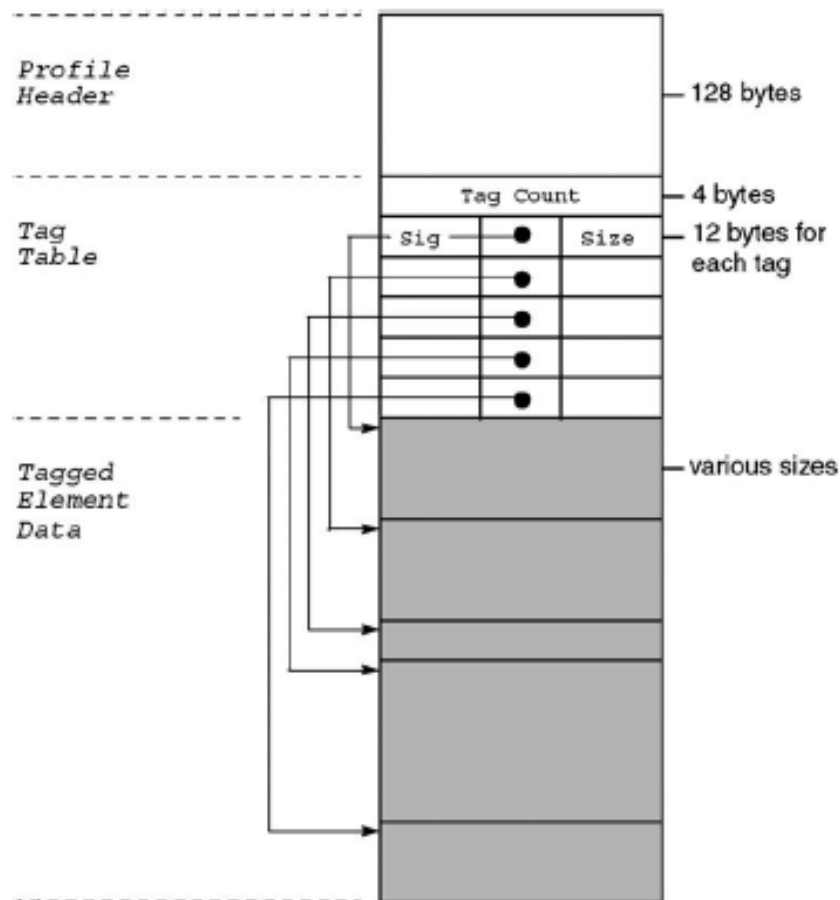
Model pemrosesan yang digunakan memiliki implikasi terhadap ukuran profil. Profil yang berisi model berbasis matriks berukuran kecil, karena hanya menyimpan nomor untuk matriks 3x3 dan kurva reproduksi nada akan diwakili oleh nilai gamma tunggal atau sejumlah titik sampel, daripada jumlah besar yang disimpan untuk LUT. Selain itu, mereka hanya mendukung satu rendering intent, dan tidak memerlukan transformasi invers untuk disertakan. Profil berdasarkan LUT dan CLUT memberikan nilai yang diubah dalam satu arah; LUT lebih lanjut diperlukan untuk mentransformasikan cara lain. Profil keluaran cenderung menjadi yang terbesar, membutuhkan tabel di kedua arah untuk masing-masing tujuan rendering yang didukung; jumlah nilai dalam tabel akan ditentukan oleh vendor.



Gambar 41 Contoh dua model yang menerapkan tabel tipe Lut B kea, dari spesifikasi profil ICC versi 4 (ICC.1: 2004-10, profil versi 4.2.0.0).

Struktur Profil

Profil ICC adalah file data berbasis tag, yang memiliki tiga komponen utama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 42.



Gambar 42 Struktur profil ICC.

Profil header memiliki panjang tetap (128 byte) dan menyediakan informasi yang diperlukan sistem untuk mengurutkan dan mencari profil. Ada 18 bidang yang disertakan dalam tajuk, meskipun tidak semuanya digunakan untuk beberapa jenis profil. Header berisi informasi kunci tentang profil dan dari mana asalnya, seperti ukurannya, pembuat, nomor identifikasi unik, serta tanggal dan waktu pembuatan file. Juga mencakup informasi tentang data yang dikandungnya, misalnya kelas atau jenis profil, pabrikan dan model perangkat yang membuatnya, atribut perangkat khusus vendor, ruang warna data, ruang warna PCS, dan modul manajemen warna yang disukai. bekas. Sebuah maksud rendering juga dapat ditentukan.

Data yang menjelaskan karakteristik warna perangkat dan proses konversi ke dan dari PCS terdapat di dalam serangkaian elemen tag, beberapa di antaranya adalah persyaratan file profil dan beberapa spesifikasi untuk kelas profil. Data tag didahului oleh tabel tag, yang segera mengikuti header dan menyediakan indeks ke dalam data tag. Tagtablespeci fi estenumber dari elemen tag, dan untuk setiap elemen deskripsi kata kunci tag, offset byte dari awal file, dan panjang data. Elemen tag akan termasuk matriks yang relevan dan data LUT tergantung pada model pemrosesan. Selain tag yang diperlukan untuk setiap profil, ada beberapa tag opsional, yang memungkinkan penambahan fungsionalitas ekstra ke profil. Pengembang juga dapat menambahkan informasi hak milik di sejumlah tag pribadi, sambil tetap menyediakan profil dalam format standar dan sebagian besar terbuka.

Semua profil (kecuali profil DeviceLink) memerlukan tag untuk deskripsi profil, hak cipta, media white point, dan adaptasi kromatik (bila iluminan selain D50 telah digunakan untuk menghitung data pengukuran). Tag utama yang diperlukan untuk konversi warna tercantum dalam Tabel 3.

Tabel 3 Tag profil digunakan untuk transformasi warna	
TAG	DESKRIPSI
Tag Red/Green/Blue	Kurva reproduksi nada untuk tiga saluran. Ini dapat didefinisikan sebagai nilai gamma, atau sebagai kumpulan titik sampel yang diinterpolasi secara linier untuk membuat kurva
Matrik Red/Green/Blue	Ini memberikan nilai untuk kolom pertama, kedua dan ketiga masing-masing dalam matriks 3x3 yang digunakan dalam model pemrosesan matriks/TRC. Mereka dikalikan dengan nilai RGB yang dilinierisasi
Tag TRC Grey	Kurva reproduksi nada abu-abu, memberikan informasi yang diperlukan untuk mengkonversi antara saluran tunggal dan nilai PCS XYZ atau CIELAB
Tag AtoB0	Tabel pencarian Device-to-PCS, yang untuk sebagian besar kelas profil mencapai rendering perseptual. LUT dapat didefinisikan dengan presisi 8 atau 16-bit (tipe lut8 dan tipe lut16). Bisa juga dari tipe lut AtoB, yang merupakan struktur transformasi warna yang terdiri dari hingga lima elemen, termasuk kumpulan kurva satu dimensi, matriks 3x3, dan LUT multi-dimensi.
Tag AtoB1	Tabel pencarian Device-to-PCS, mencapai rendering kolorimetri (media-relative) untuk sebagian besar kelas profil. Ini memiliki opsi tipe yang sama dengan tag AtoB0
Tag AtoB2	Tabel look-up Device-to-PCS, mencapai rendering saturasi untuk sebagian besar kelas profil. Ini memiliki opsi tipe yang sama dengan tag AtoB0

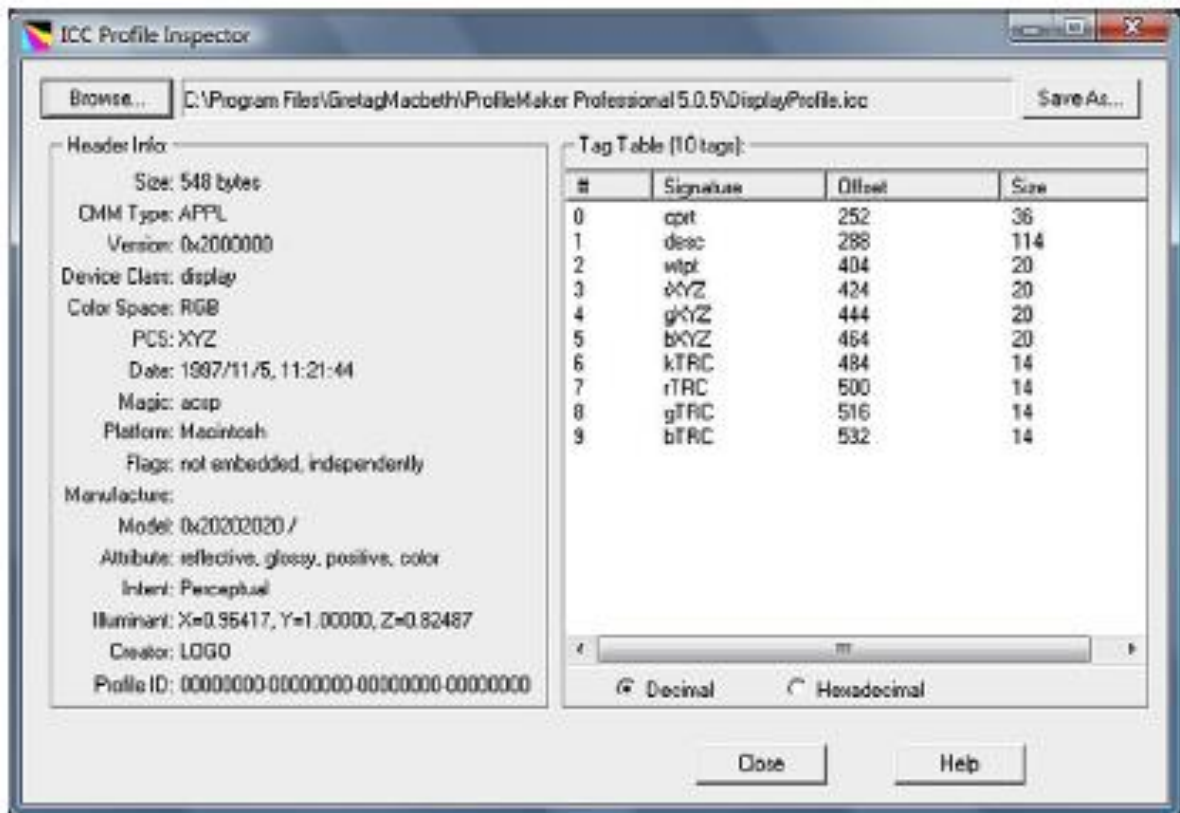
Tag BtoA0	Tabel look-up PCS-ke-perangkat, mencapai rendering perseptual untuk sebagian besar kelas profil, dengan opsi tipe yang sama seperti di atas
Tag BtoA1	Tabel pencarian PCS-ke-perangkat, mencapai rendering kolorimetri untuk sebagian besar kelas profil, dengan opsi tipe yang sama seperti di atas
Tag DtoB0	Transformasi warna perangkat-ke-PCS mencapai rendering perseptual. Transformasi ini mendukung kisaran masukan yang dikodekan 32-bit flare oating-point, kisaran keluaran dan transformasi, memungkinkan peningkatan besar pada akurasi. Ini diimplementasikan menggunakan ‘elemen multi-pemrosesan ‘ (urutan elemen pemrosesan yang terkandung dalam struktur - elemen yang termasuk dalam urutan fleksibel; saat ini, kurva 1D, matriks dan CLUT didukung). Tag ini menyediakan sashutter untuk mengganti tag AtoB0 (yang juga mengimplementasikan rendering persepsi)
Tag DtoB1	Transformasi dan mekanisme pemrosesan seperti untuk DtoB0, tetapi mencapai rendering kolorimetri dan dengan cara untuk menimpa AtoB1
Tag DtoB2	Transformasi dan mekanisme pemrosesan seperti untuk DtoB0, tetapi mencapai rendering kolorimetri dan dengan cara untuk menimpa AtoB2
Tag BtoD0	Transformasi warna PCS-ke-perangkat yang mencapai rendering perseptual, menggunakan ‘elemen multi-pemrosesan’. Tag ini juga menyediakan sashutter untuk menimpa tag BtoA0
Tag BtoD1	Transformasi dan mekanisme seperti untuk BtoD0, tetapi mencapai rendering kolorimetri dan dengan cara untuk menimpa BtoA1
Tag BtoD2	Transformasi dan mekanisme pemrosesan seperti untuk BtoD0, tetapi mencapai rendering saturasi dan dengan cara untuk menimpa BtoA2
Tag Gamut/keseluruhan	Tag Anout-of-gamut, menyediakan tabel yang menentukan masukan warna sebagai nilai PCS seperti di dalam atau di luar gamut
Tag tabel pewarna	Mengidentifikasi pewarna yang digunakan dalam profil dengan nilai XYZ atau CIELAB, dan nama unik
Tag dua nama warna	PCS dan representasi perangkat opsional untuk daftar warna bernama

Struktur Profil Device (Perangkat)

Profil tampilan berdasarkan model matriks 3x3 dan dibuka di perangkat lunak pemeriksa profil ICC ditunjukkan pada Gambar 43. Di sisi kiri jendela adalah informasi header profil dan di sebelah kanan tabel tag yang menampilkan daftar data elemen tag yang terdapat dalam profil. Istilah ‘cprt’. ‘desc ‘ dan ‘wtpt ‘ sesuai dengan hak cipta esensial, deskripsi, dan tag titik putih. Sisa tabel berisi tag yang berkaitan dengan transformasi warna. Perhatikan penyertaan tag kTRC, yang merupakan kurva reproduksi nada abu-abu.

Struktur profil tampilan akan bergantung pada model pemrosesan profil yang digunakan. Proses pembuatan profil menghasilkan satu set tag untuk setiap jenis profil. Ini dirinci dalam Tabel 3 untuk setiap model.

Tag pemrosesan warna untuk profil input dan output tercantum dalam Tabel 3 dan 4. Informasi yang terdapat dalam Tabel 233e26.4 didasarkan pada informasi dari profil ICC.1: 2004-10 versi 4.2.0.0 (lihat Daftar Pustaka). Perhatikan bahwa ada juga versi monokrom dari semua profil perangkat. Semua profil monokrom, apa pun perangkatnya, hanya memerlukan tag Grey TRC sebagai tambahan dari tag yang diperlukan untuk deskripsi, titik putih, adaptasi kromatik, dan hak cipta.



Gambar 43 Profil tampilan berbasis matriks 3x3 dibuka menggunakan perangkat lunak pemeriksa profil ICC.

Tabel 4 Pemrosesan tag warna untuk input profile			
TAG NAMA	TIGA-KOMPONEN BERBASIS MATRIK	N-COMPONENT BERBASIS LUT	CATATAN
Deskripsi profil	■	■	Kurva transfer setelah penskalaan relatif media
TRC Red/Green/Blue	■		
Kolom matrik Red/Green/Blue	■		
AtoB0		■	

Media white point		■	Nilai media white pointXYZ (D50 untuk profil tampilan)
Adaptasi kromatik	■	■	Diperlukan jika titik putih berbeda dengan D50, mengubah XYZ warna yang diukur di bawah titik putih sebenarnya ke warna di bawah titik putih PCS
Copyriht	■	■	

Struktur profil konversi ruang warna

Profil konversi ruang warna mengkonversi antara PCS dan ruang warna non-perangkat; oleh karena itu, mereka tidak berhubungan dengan perangkat apapun. Mereka didasarkan pada model pengolahan profil pembentuk/tabel MFT. Mereka memiliki struktur dasar yang sama dengan profil keluaran, meskipun hanya tag AtoB0 dan BtoA0 (yang merupakan tabel pencarian yang mengubah data ke dan dari PCS menggunakan maksud rendering perseptual) yang diperlukan (serta empat tag penting yang diperlukan untuk semua profil). Namun, tag untuk transformasi warna menggunakan maksud rendering lainnya dapat secara opsional disertakan. Tag gamut juga dapat disertakan dan menjalankan fungsi yang sama seperti yang dilakukannya dalam profil keluaran.

Tabel 5 Pemrosesan tag warna untuk input profile			
TAG NAMA	3 x 3 BERBASIS MATRIK	N- COMPONENT BERBASIS LUT	CATATAN
Deskripsi profil	■	■	
TRC Red/Green/Blue	■		
Kolom matrik Red/Green/Blue	■		
AtoB0		■	
Media white point	■	■	Nilai XYZ pada media white point
Adaptasi kromatik	■	■	Diperlukan jika titik putih berbeda dengan D50, lihat Tabel 233
Copyriht	■	■	

Tabel 6 Tag pemrosesan warna untuk profil keluaran	
TAG NAMA	N-COMPONENT BERBASIS LUT
Deskripsi profile	■
AtoB0	■

AtoB1	■
AtoB2	■
BtoA0	■
BtoA1	■
BtoA2	■
Gamut	■
Media white point	■
Adaptasi kromatik	■
Copyright	■

Membuat profil perangkat kustom

Meskipun pabrikan menyediakan profil ICC generik dengan perangkat warna, ini dibuat berdasarkan perilaku rata-rata model perangkat, dan oleh karena itu tidak memperhitungkan variabilitas perilaku yang ditampilkan oleh perangkat individu. Kegunaannya tergantung pada stabilitas perangkat. Profil printer inkjet generik, misalnya, dapat memberikan hasil yang wajar, meskipun tidak akan sebaik yang diperoleh dari profil kustom. Akan tetapi, sebagian besar perangkat menampilkan variasi dari perilaku rata-rata, yang mungkin muncul saat dikeluarkan dari pabrik, atau reproduksi warna mungkin melayang seiring waktu. Selain itu, jika salah satu pengaturan untuk perangkat diubah dari status kalibrasi pabrik, maka profil generik tidak akan lagi akurat.

Alur kerja manajemen warna yang baik akan bergantung pada profil kustom setidaknya untuk beberapa, jika tidak semua, perangkat. Profil kustom dibuat dengan mengirimkan gambar target atau kumpulan warna target yang berisi nilai yang diketahui, yang telah didefinisikan secara kolorimetris dalam file referensi, ke perangkat dan mengukur nilai yang direproduksi. Nilai yang direproduksi kemudian dibandingkan dengan nilai referensi dan hubungan di antara mereka dibangun, menghasilkan matriks transformasi warna atau LUT yang disimpan sebagai elemen tag dalam profil. Setelah profil dibuat, profil tersebut akan akurat untuk kondisi saat profil dibuat.

Beberapa sumber variabilitas perangkat, seperti pelepasan seiring waktu sebagai akibat dari penuaan komponen, tidak dapat dikendalikan. Dalam keadaan ini, perangkat perlu dikalibrasi ulang dan dibuat ulang untuk memberikan profil yang diperbarui ke kondisi baru. Sumber variabilitas lainnya dikendalikan oleh pengguna, dalam pengaturan perangkat lunak dan perangkat keras. Jika ini diubah, profil baru akan dibutuhkan, jadi pengguna harus berusaha untuk membatasi perubahan tersebut. Sumber variabilitas khusus dalam perangkat output adalah penggunaan berbagai media dan pewarna. Setiap kombinasi media/pewarna membutuhkan profilnya sendiri-sendiri.

Profil Display

Tampilan yang dikalibrasi dengan profil yang akurat adalah salah satu persyaratan paling mendasar dalam alur kerja yang dikelola warna. Karena gambar disesuaikan dan soft-

proofed pada tampilan, sangat penting bahwa gambar memberikan representasi warna gambar yang akurat. Profil umum dapat memberikan hasil yang wajar untuk perangkat masukan dan keluaran, tetapi perangkat tampilan menunjukkan variabilitas yang signifikan dan oleh karena itu memerlukan profil kustom dan kalibrasi reguler.

Secara umum, proses pembuatan profil tampilan digabungkan dengan kalibrasi oleh sebagian besar alat profil yang tersedia. Saat ini tersedia model perangkat tampilan yang dapat dikalibrasi sendiri dalam jumlah terbatas, di mana perangkat lunak kalibrasi dan perangkat pengukur digabungkan dengan monitor. Ini cenderung mahal dan oleh karena itu digunakan terutama dalam alur kerja yang sangat canggih dan aplikasi ilmiah. Lebih umum lagi, perangkat dan perangkat lunak profil yang berdiri sendiri digabungkan menjadi satu. Alat ukur yang lebih mahal mungkin adalah alat yang diperluas untuk memungkinkan pemuatan beberapa jenis alat yang berbeda. Namun, ada kebutuhan yang lebih besar oleh konsumen untuk menampilkan instrumen profil daripada instrumen untuk mengisi perangkat input dan output; oleh karena itu, ada beberapa model yang lebih murah hanya untuk profil display. Instrumen profil dapat berupa colorimeter atau spektrofotometer, dan mengukur nilai dari permukaan layar yang dihasilkan oleh tampilan sejumlah warna referensi yang diketahui.



Gambar 44 Menampilkan profil. Instrumen profil, dalam hal ini kolorimeter, mengukur nilai dari permukaan layar.

Langkah yang diperlukan sebelum kalibrasi adalah pengaturan luminansi titik putih dan hitam untuk menyesuaikan kisaran dinamis tampilan. Langkah ini dapat dilakukan dengan perangkat lunak kalibrasi. Kalibrasi itu sendiri melibatkan penyesuaian fungsi transfer tampilan (gamma) dan titik putih ke nilai target yang ditetapkan oleh pengguna. Penyesuaian ini diterapkan oleh perangkat lunak ke tabel pencarian warna kartu video (CLUT). CLUT kemudian mengubah nilai piksel 'pada flare y' saat dikirim ke layar, secara efektif mengubah perilaku tampilan seolah-olah memiliki nilai-nilai ini. Panduan untuk gamma dan titik putih berbeda-beda bergantung pada teknologi, titik putih asli tampilan, tingkat kontrol yang diberikan pengguna, dan persyaratan keluaran aliran kerja pencitraan. Penting agar monitor

dibiarkan melakukan pemanasan sebelum kalibrasi. Layar CRT memerlukan pemanasan minimal 30 menit agar stabil. LCD lebih cepat distabilkan. Teknologi tampilan lainnya mungkin berbeda.

Setelah kalibrasi selesai, perangkat lunak menampilkan serangkaian patch warna referensi dan pengukuran diambil dari pelat muka tampilan menggunakan perangkat profil. Warna-warna tersebut ditampilkan secara berurutan, seringkali dalam urutan acak. Profil dibangun dengan mendefinisikan hubungan antara nilai terukur dan nilai referensi. Profil harus disimpan di lokasi yang benar pada sistem operasi. Ini biasanya akan dikenali secara otomatis oleh perangkat lunak profil.

Pertimbangan penting saat membuat dan menggunakan profil tampilan adalah lingkungan tampilan. Latar belakang desktop harus disetel ke abu-abu tengah dan screen saver dimatikan. Tingkat iluminasi ambien dan objek berwarna di lingkungan yang mungkin tercermin di layar dapat mengubah display image secara signifikan. Agar profil akurat, kondisi tampilan di titik pembuatan dan saat profil digunakan untuk melihat gambar harus sama. Tingkat iluminasi ambien harus relatif tenang, siang hari seimbang, dan tidak boleh berubah. Idealnya, ruangan tidak boleh diterangi oleh cahaya alami. Dalam beberapa kasus, di mana layar sedang diatur ke ruang warna standar yang ditentukan, seperti sRGB, kondisi tampilan yang ideal dapat ditentukan.

Setelah profil dibuat dan disimpan, itu harus dikaitkan dengan tampilan. Ini dicapai dengan memilihnya sebagai profil default untuk perangkat di properti perangkat dan dapat dilakukan secara otomatis oleh aplikasi profil, tetapi penting untuk memeriksanya. Properti perangkat ditemukan di panel kontrol, dan profil default diatur di bawah tab manajemen warna di pengaturan lanjutan.

Profil Input

Variabel utama yang mempengaruhi reproduksi warna perangkat input adalah sumber cahaya yang digunakan selama pengambilan, kepekaan spektral sensor dan pengaturan perangkat lunak. Jelas, karena scanner telah menetapkan sumber cahaya, satu-satunya faktor yang mempengaruhi pengguna adalah pengaturan perangkat lunak. Untuk kamera, kondisi pencahayaan adalah masalah yang jauh lebih besar, yang memengaruhi keseragaman iluminasi, dynamic range, dan suhu warna. Hal ini menimbulkan masalah mendasar dalam penggunaan profil kamera. Profil yang baik akan bekerja dengan baik untuk gambar yang diambil dengan kondisi pencahayaan yang kurang mirip, yang mungkin dikontrol di studio, tetapi kurang baik jika kondisi pencahayaan berubah. Subjek ini dibahas lebih detail pada bagian di bawah, 'Menggunakan profil kamera'. Namun demikian, pembuatan profil kamera berguna dan diperlukan untuk beberapa aplikasi, oleh karena itu disertakan.

Pembuatan profil masukan melibatkan pemindaian atau digital capture dari target uji. Nilai RGB dari gambar yang diambil kemudian dibandingkan dengan nilai XYZ atau CIELAB terukur asli. Ada sejumlah target standar yang digunakan untuk pemfilteran input dan ini disertakan dengan file deskripsi target. Keakuratan nilai dalam file uraian target akan bergantung pada target dan cara pembuatannya. Target yang lebih mahal diproduksi dalam batch yang lebih kecil dan diukur secara individual, sedangkan target yang lebih murah akan memberikan pengukuran target berdasarkan rata-rata batch target. Oleh karena itu, persyaratan utama adalah target yang sesuai dan perangkat lunak profil. Tidak ada perangkat keras yang diperlukan, meskipun pengukuran target yang lebih akurat dapat dilakukan dengan tangan menggunakan kolorimeter atau spektrofotometer, tetapi ini bukan persyaratan untuk

pembuatan profil. Perangkat lunak pemfilteran masukan mungkin berdiri sendiri, atau mungkin digabungkan dengan perangkat pengukur dan perangkat lunak untuk mengisi perangkat lain.

Target scanner yang paling umum digunakan adalah target transmisi standar IT8.7/1 dan target standar refleksi IT8.7/2; versi transmisi tersedia pada berbagai film stock yang berbeda. Sebagian besar paket profil kamera menggunakan bagan pemeriksa warna Macbeth standar, atau pemeriksa warna Gretag Macbeth SG.

Profiling Scanner

Tujuan saat mengisi scanner adalah untuk mendapatkan gambar target dalam kondisi yang dapat diulang. Perangkat lunak scanner sering kali memiliki sejumlah pengaturan otomatis yang diterapkan secara default. Ini mungkin termasuk pengaturan otomatis titik hitam dan putih untuk mengoptimalkan jangkauan dinamis gambar, keseimbangan warna otomatis dan penajaman. Semua ini penting untuk dimatikan, sehingga respons scanner tanpa koreksi khusus gambar dapat dikarakterisasi. Pindaian harus ditangkap pada resolusi yang wajar dan disimpan dalam format file yang tidak terkompresi, seperti TIFF. Perangkat lunak pemfilteran kemudian akan menanyakan target yang dipindai dan file deskripsi target, dari mana ia akan membuat profil. Perangkat lunak akan secara otomatis menyimpan profil di lokasi yang sesuai (ini akan bervariasi tergantung pada sistem operasi). Sedangkan untuk tampilan, harus dipilih sebagai profil default untuk scanner dalam properti perangkat.

Profiling Kamera Digital

Proses pembuatan kamera digital berbeda dengan pembuatan profil scanner, karena pengguna harus mengontrol respons kamera dalam hal eksposur dan white balance. Mayoritas digital single-lens reflex (SLR) dan lebih tinggi

kamera akhir sekarang memungkinkan pengambilan RAW serta pengambilan file yang telah dirender dan dikompresi warna (biasanya sebagai file JPEG). Pengambilan gambar RAW opsional juga menjadi fitur beberapa kamera yang ditujukan untuk konsumen, baik kamera jenis 'prosumer' maupun kamera saku digital.

Jika kamera hanya dapat mengeluarkan file yang dikompresi, maka penggunaan yang sangat terbatas dalam membuat profil masukan. Kamera yang mengeluarkan file JPEG, misalnya, akan dalam sebagian besar kasus mengkodekan gambar dalam pengkodean sRGB standar dan file input tidak akan sesuai dalam kasus ini. Alasan untuk ini dijelaskan di bagian selanjutnya. Selain itu, algoritma kompresi lossy sangat bergantung pada pemandangan dan dapat menyebabkan distorsi warna pada gambar. Oleh karena itu, transformasi warna yang dibuat dari bagan pengujian yang ditangkap dan dikompresi tidak mungkin akurat untuk gambar yang dikompresi dari pemandangan alam.

Oleh karena itu, dalam pembuatan profil, gambar harus ditangkap sebagai file RAW atau dalam format alternatif tanpa kompresi, seperti file TIFF. Perangkat lunak pembuat file harus menentukan kondisi yang diperlukan saat penangkapan, dan pemrosesan lebih lanjut. Target uji harus diterangi secara merata, sejajar dengan bidang fokus dan harus besar di dalam frame. Baik mengisi menggunakan TIFF atau RAW, keseimbangan putih kustom (manual) harus dilakukan dengan menggunakan area netral dalam frame, daripada menggunakan keseimbangan putih otomatis. Kontrol kontras atau warna lain yang diterapkan secara otomatis juga harus dimatikan, untuk memungkinkan perilaku default kamera diprofilkan.

Gambar harus dibuka dari dalam perangkat lunak profil, yang kemudian akan memandu proses pembuatan profil. Perangkat lunak profil kamera sering kali memberikan opsi untuk berbagai pengaturan, seperti seberapa banyak gambar target yang diambil digunakan untuk membuat profil, atau opsi dalam profil itu sendiri, untuk memungkinkan koreksi tertentu diterapkan. Jumlah dari jenis kontrol ini ditentukan oleh vendor.

Seperti pada semua profil perangkat, profil tersebut hanya akurat untuk kondisi pencitraan di mana bagan uji diambil, sehingga gambar yang diambil dalam kondisi yang sama dapat dikaitkan dengannya. Kondisi pencitraan lain memerlukan profil yang berbeda. Temperatur warna iluminan secara khusus akan mempengaruhi keakuratan reproduksi warna. Oleh karena itu, merupakan praktik yang baik untuk membuat profil untuk siang hari dan tungsten, sebagai iluminan yang paling umum digunakan.

Menggunakan Profil Kamera

Penting untuk dicatat bahwa dua jenis profil ICC dapat diterapkan pada gambar yang diambil dengan kamera digital. Ini adalah profil masukan, seperti dijelaskan di atas, atau profil ruang warna untuk pengkodean ruang warna RGB standar, seperti sRGB, Adobe RGB 98 atau ROMM RGB.

Mayoritas kamera digital melakukan rendering warna data dari sensor untuk menghasilkan gambar yang keluarannya mengacu pada media referensi standar, yaitu salah satu pengkodean ruang warna standar, data akan ditangkap dalam status gambar sensor dan kemudian mungkin (tetapi tidak wajib) diproses ke status gambar yang mengacu pada pemandangan. Namun, baik data rujukan sensor maupun rujukan pemandangan tidak dapat dilihat sebagai gambar. Oleh karena itu, gambar diberi warna sebelum keluaran ke status rujukan keluaran. Jika gambar diambil ke format selain RAW, rendering warna akan dilakukan secara otomatis oleh kamera. Gambar yang ditangkap dan dikeluarkan sebagai file RAW menunda rendering warna sampai konversi RAW, di mana pengguna memilih ruang warna keluaran yang diperlukan. Baik kamera menangkap RAW atau JPEG, jika mengeluarkan gambar ke ruang warna standar, maka profil masukan yang dibuat seperti dijelaskan di bagian sebelumnya tidak akan sesuai. Dalam kasus ini, profil ICC yang benar untuk diterapkan pada gambar adalah profil ruang warna yang diperlukan untuk tujuan keluaran gambar.

Profil kamera kustom hanya benar-benar berguna untuk data gambar skenario yang dirujuk. Jumlah kamera yang mampu melakukan ini dibatasi; mereka biasanya kamera profesional high-end format sedang atau lebih besar. Perangkat lunak konversi Adobe DNG juga dapat mengeluarkan gambar yang mengacu pada pemandangan. Dalam kasus ini, profil yang dibuat khusus yang mewakili adegan dalam PCS dapat digunakan. Jika jenis kamera ini digunakan untuk gambar yang persyaratannya adalah untuk pencocokan warna pemandangan, maka maksud rendering kolorimetri harus digunakan. Pencitraan yang lebih umum, di mana tujuannya adalah untuk menghasilkan gambar yang menyenangkan daripada kecocokan warna yang akurat, membutuhkan penggunaan maksud rendering perseptual.

Oleh karena itu, di sebagian besar alur kerja pencitraan, tidak perlu membuat profil kamera kustom dan fokusnya harus pada pengambilan menggunakan pengkodean warna yang sesuai untuk media keluaran gambar yang diprediksi.

Profil Output

Pengukuran profil keluaran memerlukan penggunaan alat pengukur khusus; ini bisa berupa colorimeter refleksi atau spektrofotometer refleksi. Target uji dalam bentuk elektronik

dikirim ke printer dan versi cetak kemudian digunakan untuk membandingkan dengan file referensi dan menghasilkan profil berbasis LUT. Target harus dicetak tanpa koreksi warna yang diterapkan oleh pengandar pencetak, karena ini adalah perilaku default dari pencetak yang ditandai.

Kalibrasi printer bervariasi tergantung pada jenis teknologinya. Mengkalibrasi mesin cetak mungkin melibatkan banyak penyesuaian kalibrasi yang berbeda pada tahapan yang berbeda, karena banyak printer desktop tidak memiliki kontrol untuk memungkinkan kalibrasi printer itu sendiri. Tujuan kalibrasi, seperti untuk semua perangkat, adalah untuk menyetel kondisi printer ke kondisi yang dapat diulang. Mendefinisikan kombinasi tinta/kertas adalah bagian dari proses kalibrasi; kombinasi yang berbeda membutuhkan profil yang terpisah.

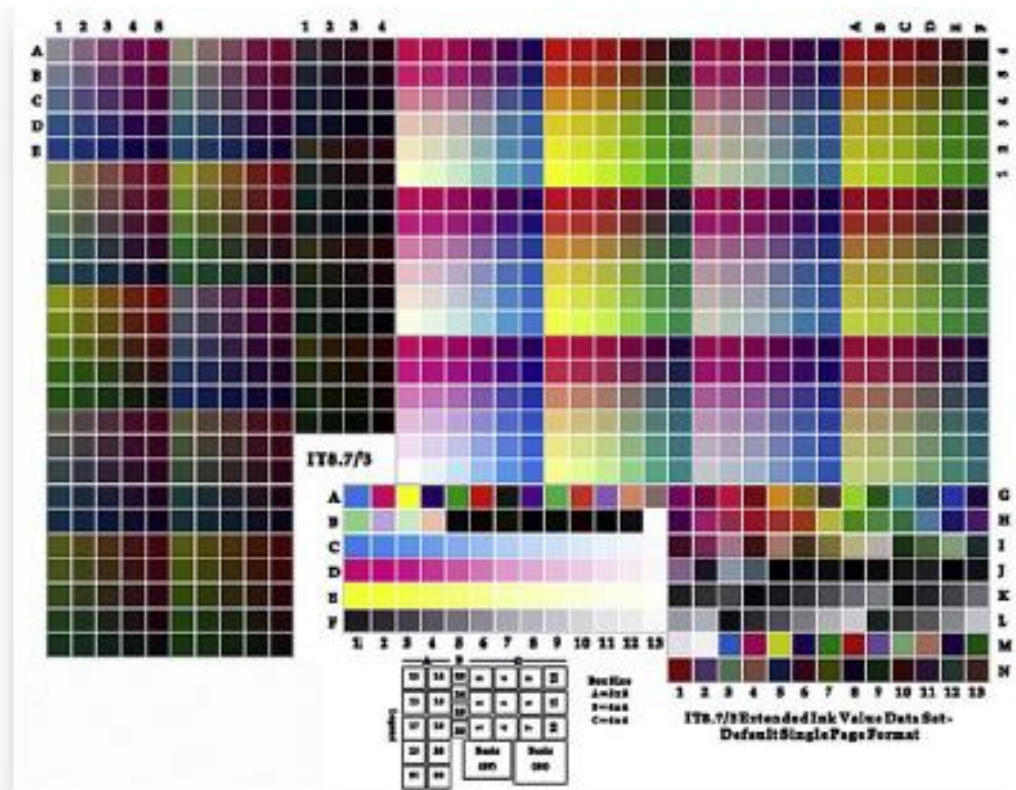
Banyak paket profil menyertakan tahap linierisasi CIELAB sebagai bagian dari kalibrasi. Langkah ini diperlukan karena CMYK secara perseptual non-linier, artinya peningkatan linier dalam ruang CMYK akan menjadi non-linier di CIELAB. yang menunjukkan target pengujian CMYK IT8/7.3. Patch target yang berurutan memiliki nilai CMYK yang berubah berdasarkan jumlah linier, tetapi nilai ini menghasilkan kenaikan non-linier dalam nilai CIELAB yang sesuai.

Untuk mengoreksi hal ini, grafik linierisasi pra-profil dicetak, yang berisi skala CMYK linier. Ini diukur dan software profil mengalokasikan ulang nilai CMYK ke nilai CIELAB yang berjarak linier. Meskipun nilai CMYK baru ini non linier dalam ruang CMYK, nilai tersebut linier dalam ruang CIELAB. Target uji profil kemudian dicetak dengan nilai CMYK baru yang telah disesuaikan ini menggantikan yang asli. Karena LUT yang dihasilkan dihasilkan dari nilai pada interval reguler di CIELAB, interpolasi yang diperlukan untuk mendapatkan nilai antara akan lebih akurat, dan profil lebih seragam.

Setelah linierisasi dilakukan, target pengambilan harus dibuka dan dicetak. Ada berbagai macam target printer yang tersedia. Meskipun IT8.7/3 secara umum didukung, ia memiliki sejumlah kekurangan, khususnya saat mengisi printer desktop, oleh karena itu berbagai alternatif telah menggantikannya seperti yang direkomendasikan oleh vendor. Sebagai contoh, grafik CMYK ECI 2002, berisi lebih banyak tambalan, untuk meningkatkan representasi perilaku perangkat. Grafik RGB dan CMYK tersedia untuk perangkat output. Grafik RGB digunakan untuk perangkat output yang hanya menggunakan tiga saluran untuk mengontrol warna, seperti Fuji Pictography. Banyak printer inkjet juga harus dianggap sebagai perangkat RGB. Karena perpindahan ke arah alur kerja RGB, gambar dikirim ke printer ini dalam ruang warna RGB dan konversi ke CMYK dilakukan oleh driver printer. Printer pewarna-sublimasi juga dapat berfungsi sebagai perangkat RGB. Oleh karena itu, penting untuk memeriksa jenis bagan uji mana yang sesuai untuk teknologi pencetakan dan model perangkat tertentu sebelum masuk ke profil.

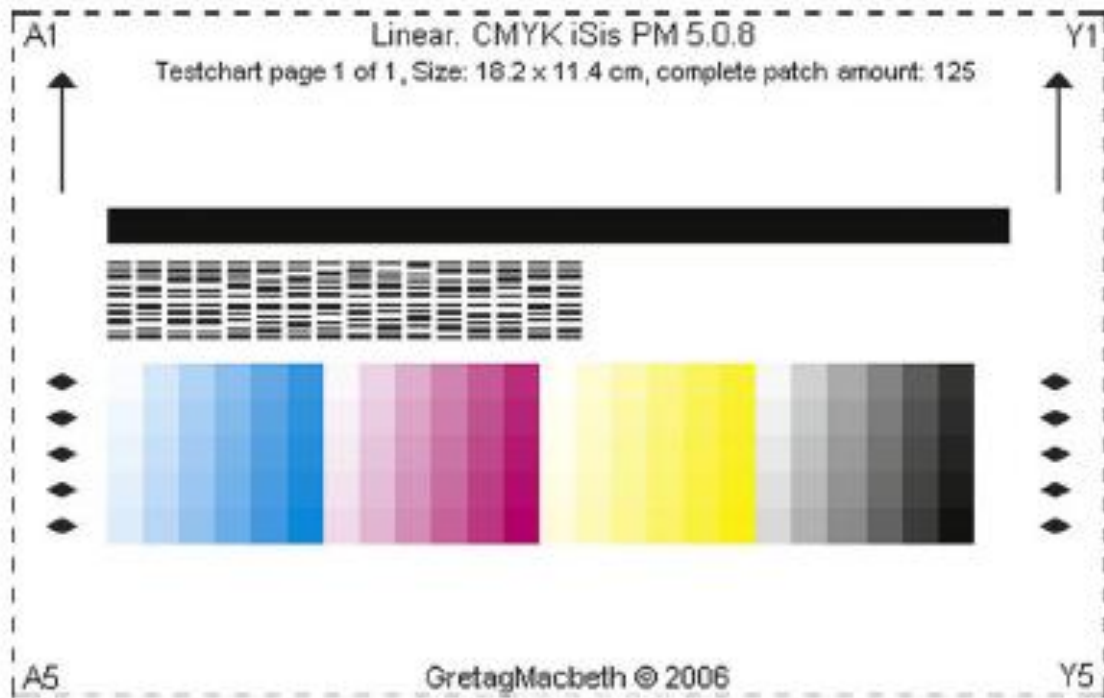
Jumlah patch yang diperlukan untuk pengukuran bervariasi, tergantung pada paket profil, tetapi biasanya diperlukan minimal beberapa ratus. Perlu dicatat bahwa jumlah pengukuran yang dilakukan tidak sesuai dengan jumlah entri dalam tabel yang dihasilkan. Nilai yang diukur diinterpolasi ke bawah untuk menyediakan sekumpulan data yang lebih mudah diatur dalam LUT (dan kemudian akan diinterpolasi untuk memberikan nilai warna saat profil digunakan). Dari pencetak ke pencetak, nomor yang diperlukan untuk mendapatkan profil yang baik akan bergantung pada seberapa 'baiklah' itu. Dengan kata lain, seberapa dekat dengan keseimbangan linier dan abu-abu (di mana nilai dari tambalan pengukuran netral direproduksi sebagai netral tanpa cor warna) dalam perilaku defaultnya. Sebuah printer yang menunjukkan

cetakan warna atau non-linearitas yang signifikan akan membutuhkan lebih banyak tambalan untuk mendapatkan profil yang akurat.

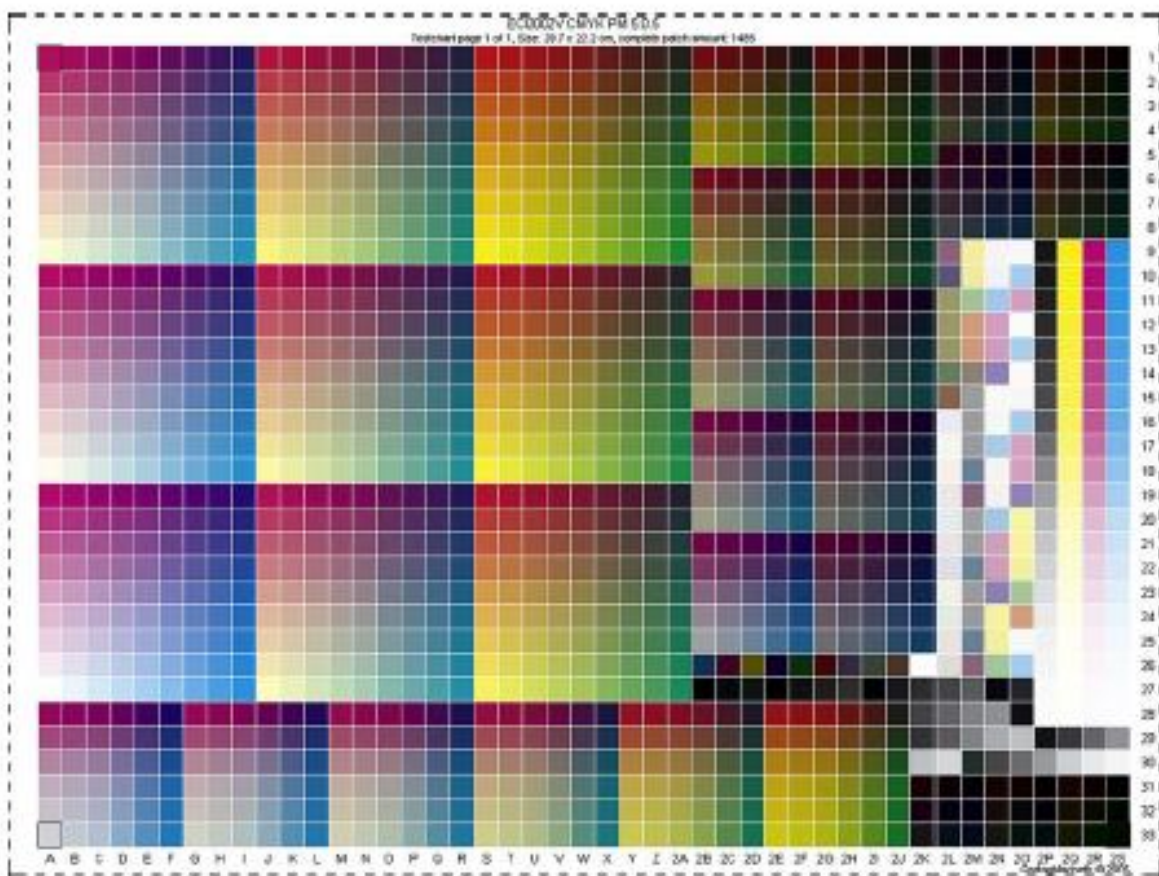


patch	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CMY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	90	80	70	60	50	40	30	25	20	15	10	7	3
L*	23	34	44	54	63	71	80	83	87	91	94	96	98

Gambar 45 Nilai LAB versus CMYK: target IT8/7.3 CMYK. Tabel di bawah ilustrasi menunjukkan nilai untuk kumpulan patch skala abu-abu dari bagian bawah tengah target, baris F, 1e13 untuk ruang CMYK dan LAB. Patch 1 dan 2 memiliki perubahan K 10 ($K = 90$ dan $K = 80$), dengan perubahan yang sesuai di L^* 11 ($L^* = 23$ dan $L^* = 34$). Di ujung lain skala, perubahan antara patch 9 dan 11, juga perubahan 10 di K , menghasilkan perbedaan hanya 7 dalam nilai L^* yang sesuai.



Gambar 46 Target linierisasi CMYK iSis dari Gretag Macbeth.



Gambar 47 Target CMYK “ECI 2002”.

Seringkali, perangkat lunak pemfilteran memungkinkan opsi pencetakan dari dalam aplikasi. Alternatifnya adalah menyimpan grafik dan mencetaknya dari aplikasi eksternal seperti Adobe Photoshop. Jika Photoshop digunakan, maka penting bahwa profil tidak ditetapkan ke gambar saat dibuka. Kebijakan manajemen warna dalam pengaturan warna Photoshop harus disetel ke 'tanya saat membuka' untuk gambar dengan profil yang hilang. Saat gambar dibuka, jendela profil yang hilang akan terbuka. Ini harus disetel ke 'Biarkan apa adanya (jangan kelola warna)'. Saat diagram dicetak, ruang sumber harus disetel ke 'dokumen' dan Ruang cetak ke 'sama seperti sumber'. Proses ini memastikan bahwa grafik tidak berubah.

Penting untuk memastikan bahwa hasil cetak telah kering dan perangkat pengisi telah dikalibrasi sebelum pengukuran. Kalibrasi melibatkan pengaturan titik nol dengan mengukur ubin kalibrasi putih, yang akan disertakan dengan perangkat. Paket profil biasanya akan menunjukkan urutan pembacaan patch, untuk memastikan bahwa nilai yang diukur cocok dengan nilai referensi yang sesuai.

Setelah pengukuran dilakukan, perangkat lunak akan menghasilkan profil; namun, ada sejumlah pengaturan yang mungkin diminta oleh pengguna untuk dipilih sebelum profil dibuat. Beberapa paket memungkinkan pengguna untuk memilih kualitas profil, yang didasarkan pada jumlah entri dalam LUT yang dihasilkan. Kebutuhan akan kualitas tinggi harus diimbangi dengan persyaratan ukuran file. Opsi lain yang biasa ditemui adalah pengaturan generasi hitam. Ini melibatkan pendefinisian penggantian komponen abu-abu (GCR) dan di bawah penghilangan warna (UCR). Secara sederhana, proses ini menentukan kombinasi dan jumlah pewarna berbeda yang digunakan untuk membuat warna. Misalnya, warna dapat dibuat sebagai kombinasi dari jumlah tinta cyan, magenta dan yellow saja. Namun, dimungkinkan juga untuk menghapus sejumlah tertentu tinta CMY dan menggantinya dengan sejumlah tinta hitam yang menghasilkan nada yang sama seperti ketiga tinta yang digabungkan, jumlah sisa tinta CMY yang menghasilkan warna sebenarnya. Dengan kata lain, tinta hitam digunakan untuk berkontribusi pada kecerahan warna, sedangkan jumlah dari tiga tinta lainnya menentukan corak dan saturasinya.

Rincian pembuatan profil untuk berbagai jenis teknologi pencetakan yang tersedia terlalu banyak untuk dibahas dalam teks ini, tetapi dapat ditemukan dalam beberapa referensi di akhir pembahasan ini. Situs web ICC juga merupakan sumber informasi yang sangat berguna.

Alur Kerja Manajemen Warna

Ada berbagai faktor yang perlu dipertimbangkan dalam mendesain alur kerja pengelolaan warna. Perangkat yang digunakan, media keluaran yang diprediksi, kebutuhan akan fleksibilitas, tujuan gambar saat bergerak melalui imaging chain, dan tujuan reproduksi akhir semuanya akan menentukan kapan dan bagaimana gambar akan diubah di antara ruang warna. Prinsip-prinsip panduan untuk implementasi praktis aliran kerja yang diatur warna, dan detail status gambar, metode pengkodean warna, dan ruang warna standar. Bagian ini membahas beberapa masalah konseptual yang mengatur proses dan menyediakan beberapa contoh alur kerja untuk berbagai tugas pencitraan.

Opsi Rendering Warna

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, rendering warna adalah pemetaan data gambar dari sebuah adegan ke data gambar keluaran yang dirujuk. Proses rendering warna dimulai dengan nilai yang ditangkap dari adegan asli. Nilainya mungkin mengacu pada pemandangan,

misalnya jika telah diubah ke pengkodean warna RIMM RGB, atau dalam status sensor. Transformasi rendering warna melakukan beberapa fungsi: pemetaan dynamic range dan gamut gambar ke media output, adaptasi tampilan untuk memperhitungkan kondisi tampilan yang berbeda pada input dan output, dan penyesuaian warna untuk mengakomodasi preferensi pengamat manusia.

Ada dua pendekatan yang umum diterapkan untuk rendering warna: rendering ke deskripsi reproduksi menengah atau rendering warna yang ditangguhkan. Dalam pendekatan pertama, gambar masukan dirender ke media referensi nyata atau virtual standar menengah dan, selama konversi ke keluaran, gambar tersebut dirender ulang dari media menengah ke keluaran. Penyajian warna yang ditangguhkan mengkodekan data sumber (yang mungkin berupa data mentah colorimetry atau color filler array (CFA) yang dirujuk adegan, dan karenanya bergantung pada perangkat) dengan metadata masukan, dan menunda rendering warna hingga keluaran. Ketika media keluaran didefinisikan, data dirender langsung dari sumber ke keluaran. Jika datanya adalah data mentah CFA, data mungkin akan didemosisikan menjadi data RGB mentah, sebelum rendering, atau proses demosaicing dapat digabungkan dengan rendering warna.

Maksud rendering ICC mendukung kedua pendekatan; maksud perseptual, yang menggunakan media cetak referensi, adalah bentuk deskripsi reproduksi perantara. Maksud kolorimetri memungkinkan rendering warna yang ditangguhkan.

Seperti yang dijelaskan di bagian menggunakan profil kamera, deskripsi reproduksi menengah mendominasi untuk digital capture, dengan sebagian besar kamera mengkodekan gambar langsung ke dalam ruang warna yang mengacu pada keluaran standar seperti sRGB. Namun, penggunaan kamera RAW capture menjadi lebih luas, dan didukung oleh sebagian besar digital SLR dan beberapa compact. Pengambilan gambar RAW dapat dianggap sebagai bentuk rendering warna yang ditangguhkan, di mana rendering warna yang diperlukan ditentukan oleh pengguna dalam perangkat lunak konversi RAW setelah pengambilan. Perlu dicatat bahwa sebagian besar perangkat lunak konversi RAW merender gambar ke ruang warna rujukan keluaran standar, dan gambar kemudian akan dirender ulang ke keluaran nyata alternatif jika diperlukan.

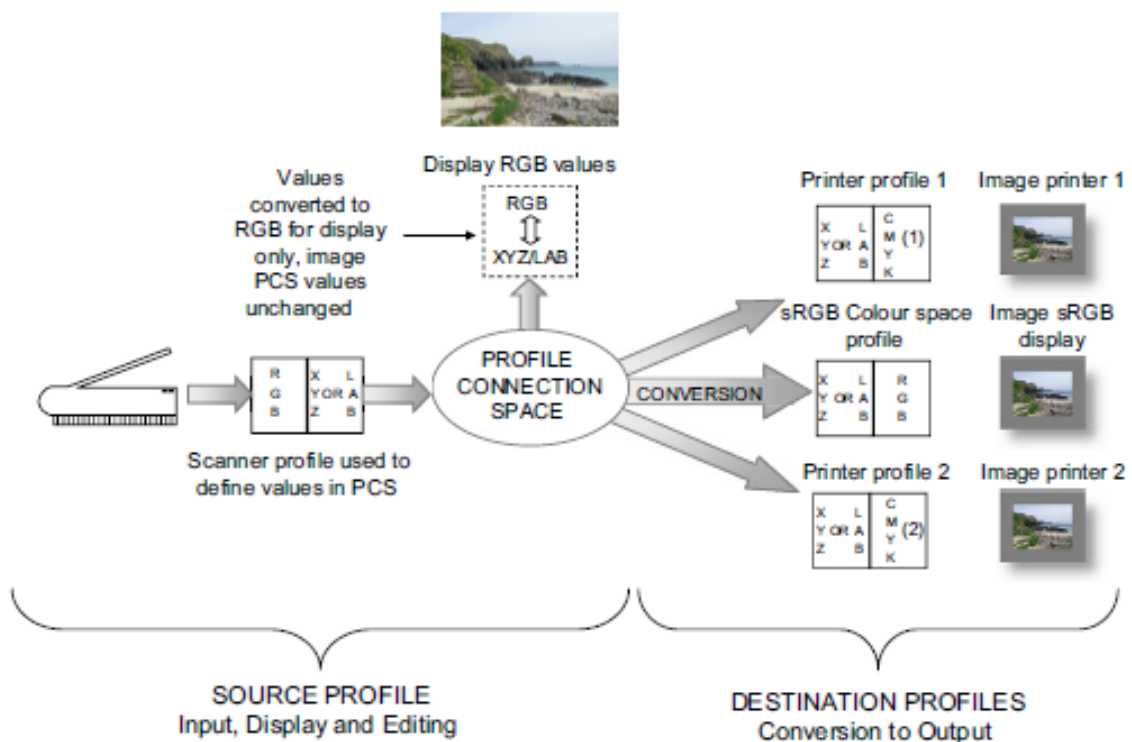
Alur kerja Early-binding versus Late-binding

Masalah penting dalam menentukan alur kerja menyangkut titik di mana konversi ke ruang warna keluaran akhir akan terjadi. Ini relevan untuk alur kerja yang menggunakan semua jenis ruang warna, tetapi memiliki pengaruh tertentu jika keluarannya adalah ruang warna CMYK. Di hampir semua kasus, masukan akan ditangkap dalam ruang warna RGB; oleh karena itu, konversi mungkin dari yang lebih besar ke gamut yang lebih kecil, dan gamut mungkin memiliki area ketidakcocokan yang signifikan.

Dalam skenario pengikatan awal, konversi terjadi sedini mungkin dalam alur kerja. Alur kerja pengikatan awal secara tradisional digunakan untuk pengiriman file CMYK, meskipun konsepnya berlaku sama ketika output berada dalam ruang warna RGB. Karena gamut akan dibatasi sejak awal pada output, tidak akan ada masalah dengan warna out-of-gamut di bagian bawah imaging chain. Penyesuaian gambar akan dilakukan dalam batasan gamut dan karena semua pengguna yang terlibat dalam alur kerja bekerja dalam ruang warna yang sama, tidak akan ada ambiguitas dalam hal bagaimana warna harus diinterpretasikan. Namun, kesederhanaan dari pendekatan ini membuatnya tidak fleksibel. Semua tahapan imaging chain akan dioptimalkan untuk keluaran yang ditentukan, tetapi tidak akan optimal

untuk keluaran lainnya, jika diperlukan. Semua warna out-of-gamut pada aslinya akan hilang secara efektif sejak awal dan tidak dapat diambil kembali.

Aliran kerja pengikatan akhir menunda konversi selama mungkin, mempertahankan keseluruhan aslinya. Oleh karena itu, ini jauh lebih fleksibel jika diperlukan beberapa keluaran, atau keluarannya tidak diketahui, sehingga memungkinkan gambar untuk digunakan kembali untuk keluaran dengan karakteristik yang sangat berbeda. Namun, pendekatan ini bisa jadi rumit, dan ada kebutuhan untuk penggunaan manajemen warna yang benar oleh semua yang terlibat dalam alur kerja. Karena keluarannya tidak eksplisit, mungkin ada masalah jika profil yang benar tidak digunakan atau diabaikan pada tahap tertentu dalam rantai. Selain itu, tanpa batasan gamut keluaran yang diketahui sebelumnya dalam proses, penyesuaian gambar dapat menghasilkan lebih banyak warna di luar gamut saat gambar akhirnya diubah menjadi keluaran.



Gambar 48 Alur kerja RGB penjiwaan akhir. Gambar dipertahankan dengan profil RGB sumber yang ditetapkan padanya sampai keluaran. Hal ini memungkinkan konversi ke beberapa keluaran dari profil sumber.

Alur Kerja RGB dan CMYK

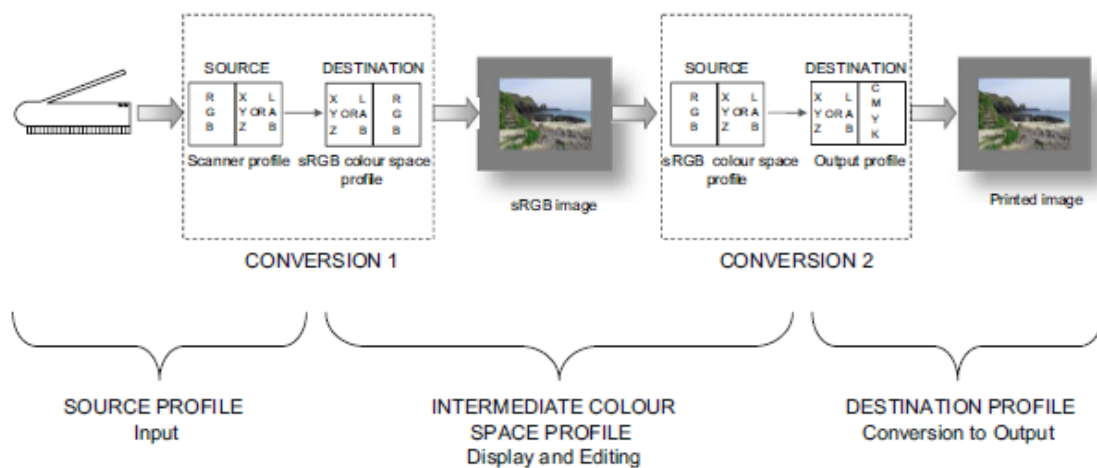
Definisi alur kerja RGB adalah di mana pengkodean RGB asli dipertahankan dan dipertukarkan. Pengkodean dapat berupa masukan yang dirujuk jika profil masukan sedang digunakan, atau pengkodean warna rujukan keluaran seperti sRGB jika deskripsi reproduksi perantara digunakan untuk rendering warna. Kasus pertama adalah alur kerja yang mengikat terlambat karena konversi terjadi pada keluaran. Kasus terakhir juga terlambat mengikat, meskipun dalam kasus khusus pengkodean warna yang mengacu pada keluaran sama dengan keluaran yang diperlukan, tidak diperlukan konversi.

Alur kerja CMYK adalah salah satu tempat pengkodean CMYK dipertahankan dan dipertukarkan. Pengkodean CMYK mungkin merupakan deskripsi reproduksi perantara dari tangkapan RGB, yang dapat dilihat sebagai alur kerja pengikatan awal. Alternatifnya, ini mungkin berasal dari pengambilan CMYK (beberapa scanner drum memindai gambar ke nilai CMYK, meskipun sensornya RGB). Ini lebih khas dari sistem loop tertutup awal yang memindai keluaran tertentu, tetapi mungkin juga merupakan alur kerja pengikatan akhir, jika perlu untuk mengonversi ke ruang CMYK yang berbeda.0

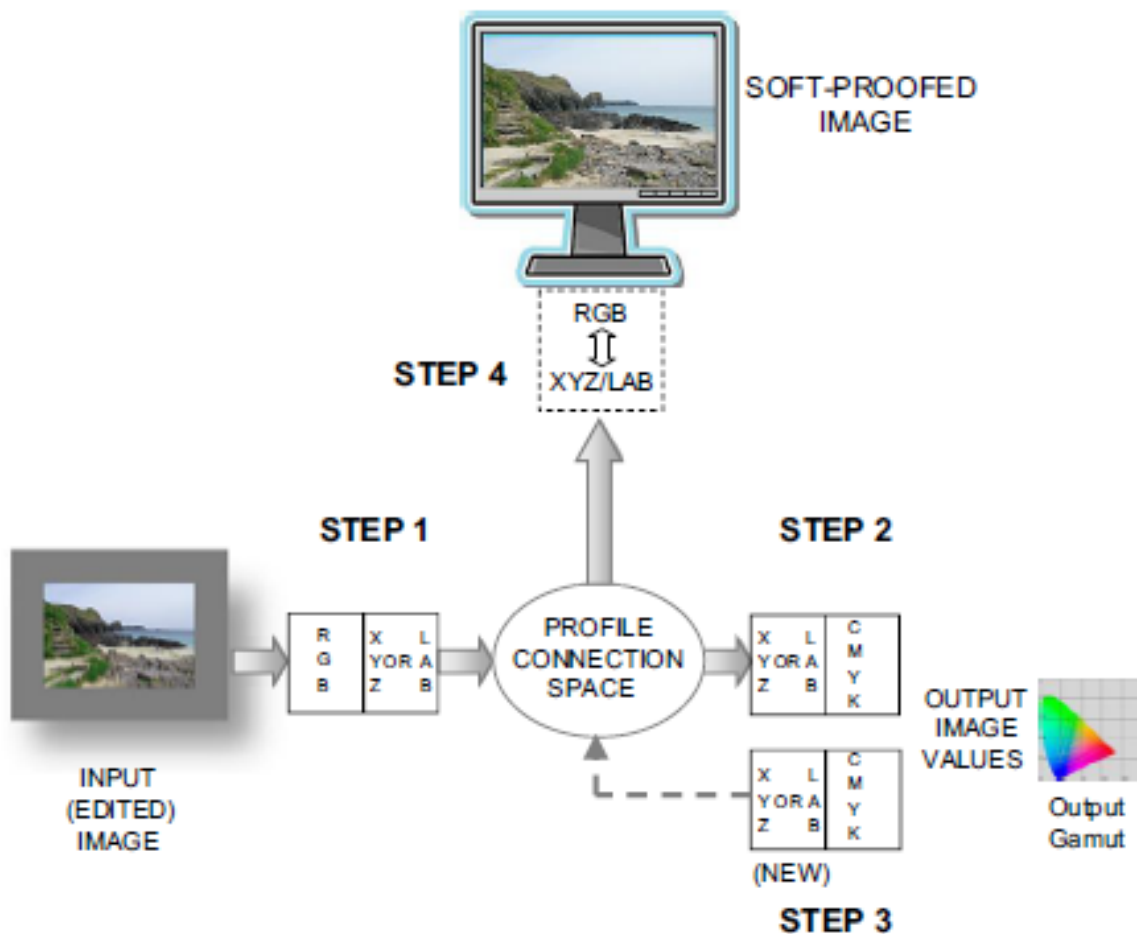
Alur kerja RGB, di mana gambar dipertahankan dengan profil scanner di seluruh imaging chain. Printer inkjet, seperti dijelaskan sebelumnya, dapat dianggap sebagai perangkat RGB dalam banyak kasus, karena printer ini menerima gambar RGB dan konversi ke ruang warna CMYK printer dilakukan oleh driver printer pada keluaran.

Menggunakan Color Space (Ruang warna) tingkat menengah

Alternatif untuk penjilidan awal atau akhir adalah dengan menggunakan ruang warna perantara, antara ruang warna masukan dan keluaran. Hal ini jangan sampai tertukar dengan deskripsi reproduksi perantara, yang dijelaskan di atas, yang secara khusus mengacu pada rendering warna, meskipun ruang kerjanya mungkin sama dengan deskripsi reproduksi perantara. Gambar diubah ke ruang perantara di awal alur kerja (kecuali jika telah diencode atau menangkap ke dalam ruang warna yang sama), dan semua pengeditan dilakukan di ruang ini sebelum gambar diubah menjadi keluaran.



Gambar 49 Alur kerja menggunakan ruang warna perantara.



Gambar 50 Alur kerja memproyeksikan gambar yang akan dicetak secara halus. Langkah 1: profil sumber yang digunakan untuk mengubah nilai RGB gambar menjadi nilai PCS. Langkah2: Nilai PCS gambar dikonversi ke CMYK printer. Pemetaan/kompresi gamut kemungkinan besar terjadi pada saat ini. Langkah 3: proses invers mengubah nilai CMYK kembali menjadi nilai PCS (catatan: ini akan menjadi nilai PCS baru, dibatasi oleh kombinasi gamut printer dan tujuan rendering). Langkah 4: nilai PCS baru diubah untuk menampilkan RGB (catatan: konversi pada nilai yang dikirim ke kartu video, bukan pada data asli).

Persyaratan dari ruang perantara yang berguna adalah bahwa ruang tersebut secara perseptual seragam, abu-abu seimbang, dan memiliki gamut yang cukup besar agar sesuai untuk konversi ke kemungkinan keluaran gamut. CIELAB dapat digunakan, tetapi juga tidak terlalu intuitif untuk pengeditan gambar. Lebih umum, ruang warna RGB yang tidak tergantung perangkat (misalnya, sRGB atau Adobe RGB 98) dapat digunakan, yang terlihat seragam dan abu-abu seimbang, tetapi memiliki gamut yang lebih terbatas. Pilihan ruang perantara tertentu akan bergantung terutama pada gamut keluaran yang diantisipasi.

Ruang warna perantara disebut ruang kerja dalam banyak aplikasi pengeditan gambar. Selain menjadi perantara antara profil masukan dan keluaran, ia memiliki fungsi tambahan sebagai ruang warna default untuk gambar yang dibawa ke dalam alur kerja (dari imaging chain lain, misalnya) tanpa profil. Dalam kasus ini, gambar mungkin awalnya ditetapkan sebagai ruang kerja yang akan dilihat. Profil ruang kerja bertindak sebagai profil sumber dalam

konversi untuk ditampilkan dan gambar kemudian dapat diberi ruang kerja alternatif jika lebih sesuai.

Gambar Proofing dan Soft-Proofing

Proses memproyeksikan gambar adalah operasi penargetan ulang, seperti yang dijelaskan di bagian sebelumnya tentang rendering maksud. Tujuan dari memproyeksikan adalah untuk memeriksa reproduksi warna akhir untuk memastikan bahwa warna memiliki tampilan yang diinginkan. Proofer adalah perangkat yang digunakan untuk mensimulasikan display image di perangkat lain. Proses pencetakan tradisional melibatkan pencetakan simulasi tampilan cetak akhir pada printer proofing, sedangkan soft-proofing mensimulasikan tampilan cetak pada layar. Proses dasarnya sama. Transformasi PCS-ke-perangkat yang relevan pertama kali digunakan untuk mengubah gambar ke ruang warna keluaran. Konversi ini dapat menggunakan maksud perseptual atau maksud kolorimetri mediarelatif bergantung pada tujuan reproduksi warna. Hasilnya kemudian diubah kembali ke PCS, sebelum diubah ke proofer (printer atau tampilan) menggunakan profil proofer dan salah satu tujuan kolorimetri. Pilihan maksud kolorimetri penting jika media white point untuk proofer dan perangkat output sangat berbeda. Dalam hal ini maksud kolorimetri mediarelatif akan menghasilkan gambar dengan titik putih diadaptasi, tetapi akan kurang akurat untuk sebagian besar warna daripada maksud kolorimetrik absolut. Maksud kolorimetri absolut dapat menghasilkan semburat warna pada gambar putih sebagai hasil simulasi titik putih yang berbeda. Gambar 49 mengilustrasikan aliran kerja soft-proofing.

BIBLIOGRAFI

- Che-Li, H., 2005. Introduction to Colour Imaging Science. Cambridge University Press, UK.
- Fairchild, M.D., 2004. Color Appearance Models, second ed. Wiley, USA.
- Grum, F.C., Bartleson, C.J., 1984. Optical Radiation Measurements. Academic Press, USA.
- Hung, P.C., Berns, R.S., 1995. Determination of constant hue loci for a CRT gamut and their predictions using color appearance spaces. Color Research and Application 20, 285e295.
- Hunt, R.W.G., 1998. Measuring Colour, third rev. ed. Fountain Press, UK.
- Hunt, R.W.G., 2004. The Reproduction of Colour, sixth ed. Wiley, Chichester, UK.
- Jacobson, R.E., Ray, S.F., Attridge, G.G., Axford, N.R., 2000. The Manual of Photography, ninth ed. Focal Press, Oxford, UK.
- Kang, H.R., 2006. Computational Color Technology. SPIE Press, USA.
- Reinhard, E., Khan, E.A., Akyüz, A.O., Johnson, G., 2008. Color Imaging Fundamentals and Applications. A.K. Peters, USA.
- Westland, S., Ripamonti, C., 2004. Computational Colour Science using MATLAB. Wiley, USA.
- Wright, W.D., 1969. The Measurement of Colour, fourth ed. Hilger, London, UK.
- 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.
- 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