

Cor nos computadores

Espaços de cores

Os programas de computador precisam de um sistema numérico para representar, armazenar e trocar as informações de cores associadas com textos, gráficos e imagens. Tais sistemas são conhecidos como espaços de cores, e são usados para representar as séries de cores disponíveis no programa.

Os espaços de cores dos computadores são, tradicionalmente, baseados no funcionamento físico de um equipamento de reprodução de imagens triestímulo (*scanner*, monitor ou impressora). Como resultado, a maioria dos espaços de cores dos computadores são tridimensionais, e a cor de cada pixel de uma imagem digital pode, portanto, ser representada por apenas três números.

Uma representação gráfica de um espaço de cores pode ser usada para ilustrar a relação entre seus três eixos do espaço de cores. Diferentes espaços de cores oferecem vantagens específicas para diferentes aplicações, tornando difícil a padronização (*veja tópico final deste capítulo*).

Cores dependentes do equipamento

Todos os equipamentos de reprodução de imagens coloridas têm seu próprio espaço de cores intrínseco, baseado no seu funcionamento físico. Os tubos de raios catódicos (CRT) dos televisores, dos monitores dos computadores e de alguns gravadores de filmes, usam fósforos vermelho, verde e azul para gerar imagens coloridas.

A maioria das cores visíveis pode ser reproduzida pela combinação de três cores primárias. O espaço de cores RGB, com três eixos — vermelho, verde e azul —, é o mais conveniente para descrever e controlar as cores que aparecem num CRT. Igualmente, o RGB é o espaço de cores nativo dos *scanners* e das câmaras de vídeo que usam filtros vermelho, verde e azul para separar a luz e reproduzir valores triestímulo RGB. As impressoras coloridas e as mídias fotográficas usam corantes ciano, magenta e amarelo (e, às vezes, o preto) para reproduzir as cores. Portanto, CMY é o espaço de cores nativo desses equipamentos.

A cromaticidade dos fósforos isolados vermelho, verde e azul (dos monitores), ou das tintas isoladas ciano, magenta e amarelo (das impressoras) é chamada, às vezes, de cor primária, ou simplesmente primária.

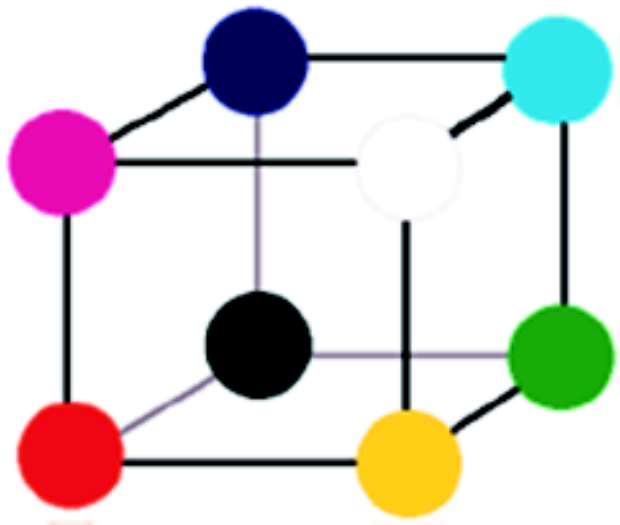
O espaço de cores RGB, usado nos monitores e *scanners*, é chamado aditivo porque combinações das três primárias são adicionadas ao preto para produzir cores. O espaço de cores CMY das impressoras é chamado subtrativo porque combinações das três cores secundárias são usadas para absorver, ou subtrair, componentes espectrais da luz branca para criar cores. A tinta preta (K), em condições ideais, absorve todas as componentes da luz em proporções iguais (o papel da tinta preta no processo de impressão será discutido no capítulo seguinte).

Dizemos que os espaços de cores RGB e CMY(K) são dependentes do equipamento

porque a cor produzida num monitor, por exemplo, em resposta a um determinado valor de sinal RGB, depende não apenas do valor RGB em si, mas também do tipo de fósforo usado no CRT. Igualmente, o sinal RGB produzido por um *scanner* depende não somente da reflectância espectral do objeto escaneado, mas também da fonte de luz e dos filtros de separação de cores do *scanner*. Finalmente, a cor reproduzida por uma impressora depende da formulação das tintas e do tipo de papel utilizados no processo de impressão.

O mesmo valor CMY do pixel pode produzir cores muito diferentes quando impresso por duas impressoras diferentes. A cor depende diretamente da quantidade de corante impresso. O simples fato de conhecer os valores RGB ou CMY de um pixel não indica qual será a cor impressa se o dispositivo de saída (uma impressora, por exemplo) for selecionado aleatoriamente.

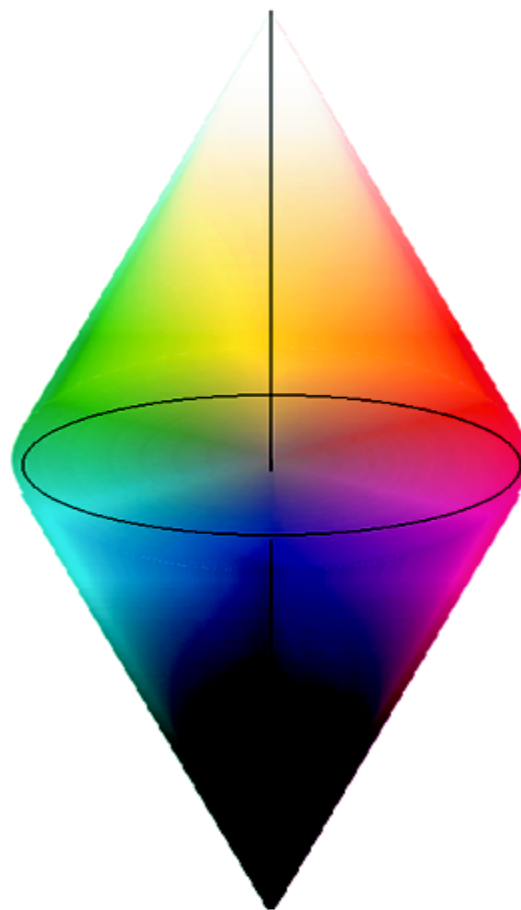
Por exemplo, o espaço de cores RGB de um CRT pode ser representado graficamente, conforme o mostrado abaixo.



Qualquer cor que pode ser mostrada num CRT pode ser posicionada dentro do cubo das cores. As cores internas do cubo representam a gama de cores que podem ser reproduzidas no CRT. Inversamente, qualquer cor localizada fora do cubo não pode ser exibida no CRT, e é portanto considerada fora de gamut. A linha

diagonal, variando de branco até preto, representa os níveis de cinza (neutros), nos quais os componentes vermelho, verde e azul são todos iguais.

Outra desvantagem dos espaços de cores RGB e CMY(K) é que eles não são visualmente intuitivos para a edição de cores, já que não é óbvio, para a maioria das pessoas, o modo de ajustar as quantidades de vermelho, verde e azul para realizar uma mudança de cor específica numa imagem. Os operadores de *scanner* de pré-impressão treinam durante anos para aprender, por exemplo, que efeito terá a adição de 10% de magenta nos meios-tons de uma imagem sobre os tons de carne. Um sistema de cores mais intuitivo para o trabalho de correção de cores é o espaço de cores HSL (tom, saturação, luminosidade). O espaço de cores HSL é normalmente representado por um cone duplo, em vez de um cilindro, posto que o alcance visual das saturações diminui na direção do branco ou do preto.



Estritamente falando, o HSL não é realmente um espaço de cores. Melhor dito, é uma convenção para especificar os valores de cores RGB usando um sistema de eixos visualmente intuitivos. O eixo vertical representa a luminosidade da cor, estendendo-se desde preto, na parte inferior do duplo cone, até branco, na parte superior. As cores neutras (ou acromáticas) são arranjadas ao longo desse eixo vertical. Os componentes cromáticos do espaço de cores (tom e saturação) são constantes para cada plano horizontal. O tom (matiz ou tonalidade) varia conforme o deslocamento em torno do cone, enquanto a saturação varia de 100% até 0% conforme o branco é adicionado, à medida que se vai da borda do cone em direção ao eixo central de luminosidade. As cores diametralmente opostas no círculo do tom são chamadas de cores complementares.

Cores independentes do equipamento

Conforme o descrito acima, os valores tris-tímulo de um espaço de cores de um determinado dispositivo não descrevem precisamente as cores. Em outras palavras, os valores RGB e CMY são medidas ambíguas da cor. Isto se torna um problema grave quando é necessário transferir imagens entre um equipamento (ou meio) e outro com precisão. Um espaço de cores padronizado — que permita especificar a cor independentemente do equipamento usado para capturar ou reproduzir a cor — se faz, portanto, absolutamente indispensável. O Sistema CIE, proporciona a base para todos os espaços de cores independentes do equipamento.

Como visto, o espaço de cores CIE XYZ é o mais importante dos espaços de cores da CIE. Portanto, é a base da qual derivam todos os espaços de cores independentes de equipamento hoje disponíveis. Visto que o espaço de cor CIE XYZ é baseado num modelo matemático da visão humana, seu gamut é, por definição, o modelo total das cores visíveis. Isto é, qualquer cor visível pode ser representada por

três números positivos: X, Y e Z. Mas, como foi observado anteriormente, a principal desvantagem do espaço de cores CIE XYZ é a sua falta de uniformidade perceptiva.

Em contrapartida, o espaço de cores CIELAB é perceptivamente uniforme: é semelhante ao modelo HSL, uma vez que o plano *a-b* descreve a cromaticidade independentemente da luminância. O eixo *a* descreve as mudanças entre verde e vermelho, enquanto o eixo *b* refere-se às mudanças entre azul e amarelo. A cor de um pixel descrita nos espaços de cores XYZ ou CIELAB é uma descrição objetiva daquela cor do pixel, não importando o *hardware* de reprodução de imagens utilizado. A uniformidade perceptiva e a natureza intuitiva do CIELAB para a edição de cores são as razões que o tornam popular para aplicações nas artes gráficas.

Uma proposta alternativa para especificar cores independentes de equipamento é usar algum dos sistemas de cores comerciais baseados em amostras físicas. Para a especificação de cores sólidas (cor “chapada” ou “*spot*”) em elementos gráficos, o sistema Pantone é o mais amplamente usado. Para imagens coloridas de meio-tom, o sistema SWOP (Specifications for Web Offset Publications — especificações para impressão de publicações em máquinas rotativas ofsete) é muito usado na indústria de impressão como referência entre a cor impressa e as porcentagens de pontos CMYK.

Alcance dinâmico

O alcance dinâmico é o número de tons intermediários que podem ser representados entre os valores de densidade máximo e mínimo de uma imagem. Quando se trata de meios físicos, alcance dinâmico é sinônimo de intervalo de densidades (isto é: $D_{max} - D_{min}$). Por exemplo: uma transparência fotográfica tem um alcance dinâmico de 3 a 3,5, enquanto um meio-tom impresso tem um alcance dinâmico de 1,5 a 2.

Quando se trata da resolução tonal de uma imagem digitalizada (isto é, do número de bits

alocados para cada pixel), o alcance dinâmico é definido como o \log_{10} do número possível de níveis de gris. Para tornar eficientes os tempos de armazenamento e processamento, a maioria dos sistemas eletrônicos de editoração captura e memoriza as imagens digitais com 24 bits/pixel (2^8 , ou 256, níveis por cor). Assim, uma imagem com 24 bits/pixel tem um alcance dinâmico de $\log_{10}(256) = 2.4$, e não pode capturar toda a extensão de tonalidades de uma transparência.

Edição de cores

Edição de séries de tons

A reprodução de tons é a característica mais importante de uma boa reprodução de cores. O objetivo da edição de séries tonais é assegurar que os tons neutros da imagem pareçam efetivamente cinzas (sem invasão de cor), e que os tons sejam uniformemente distribuídos ao longo de todo o alcance dinâmico disponível. O mapeamento do intervalo tonal é normalmente realizado através do uso de uma tabela de tradução (*lookup table*, ou LUT) conhecida como curva de reprodução de tons, ou TRC. Todas as operações de edição da componente de luminância do balanço de cores de uma imagem, incluindo as transformações do ponto branco e do ponto preto, contraste, luminosidade e ajustes de gama, podem ser realizadas com referência a uma TRC. A compressão ótima do intervalo tonal, necessária para a reprodução de cores, depende da distribuição dos detalhes de tom da imagem original e do alcance dinâmico do dispositivo de saída.

Correção de cores

A correção de cores envolve a modificação da componente cromática de uma invasão de cor da imagem para obter alguma alteração subjetiva no balanço de cores total. A edição visual do balanço de cores da imagem é mais facilmente realizada num espaço de cores tal

como o HSL, no qual as componentes cromáticas (tom e saturação) podem ser facilmente ajustadas, com independência da componente acromática (luminância). A correção de cores pode ser aplicada global ou localizadamente (em toda a imagem ou em apenas parte dela).

Transformação do espaço de cores

Qualquer espaço de cores pode ser transformado, do seu próprio sistema de coordenadas para o sistema de coordenadas de outro espaço de cores, a partir de uma série de operações matemáticas lineares ou não-lineares. As transformações lineares dos espaços de cores são geralmente realizadas através de uma matriz 3×3 , isto é, três coordenadas são alimentadas numa função linear, e três coordenadas são produzidas. As transformações lineares típicas compreendem: alterações, rotação ou contração/expansão de pontos num espaço de cores. Devido à velocidade computacional e à simplicidade de operação da matriz 3×3 , assume-se, sempre que possível, que as transformações dos espaços de cores são aproximadamente lineares. Por exemplo, a conversão entre os espaços de cores XYZ e RGB de um monitor é freqüentemente aproximada a uma transformação linear.

Com transformações não-lineares (por exemplo, conversão de CIE XYZ para CIELAB, ou de RGB para CMYK), a transformação do espaço de cores deve, tipicamente, fazer uso de uma tabela de tradução tridimensional (às vezes chamada de tabela de conversão), em vez de usar uma operação de matrizes de ordem mais elevada. Em transformações não-lineares, nenhuma operação individual explica a relação de pares de coordenadas entre dois espaços de cores. Os valores não contidos na tabela são interpolados. As transformações de espaços de cores podem ser usadas para:

1. Transformar um espaço de cores nativo do dispositivo num espaço de cores mais conveniente para edição, tal como de RGB para HSL.

2. Converter o espaço de cores de um equipamento para outro (conhecido por calibragem casada). Por exemplo, o processo de conversão do espaço de cores RGB do monitor para o modelo de cor CMYK da impressora (separação de cores).

3. Converter um espaço de cores do equipamento para um espaço de cores independente do equipamento. Por exemplo, o espaço de cores RGB de um monitor de fósforos NTSC pode ser convertido para CIE XYZ usando uma operação linear de matriz 3 x 3.

4. Conversão entre um espaço de cores CIE e outro. Por exemplo, conversão de CIE XYZ para CIELAB.

Antes do advento dos programas de sistemas de separação de cores digitais, os sistemas eletrônicos de pré-impressão realizavam a separação de cores entre o *scanner* e a gravadora de filmes de maneira analógica, reduzindo os erros de arredondamento associados com as transformações dos valores de cores digitais. Entretanto, nos sistemas modernos de processamento de imagens digitais a precisão é freqüentemente perdida durante a transformação de um espaço de cores de 8 bits para outro. Esse erro de conversão significa que uma imagem produzida num espaço de cores não pode ser convertida para um espaço de cores diferente e trazida de volta ao seu espaço de cores original sem uma alteração dos valores de cor causada pelo erro de arredondamento. Se múltiplas transformações de espaços de cores tiverem de ser aplicadas a uma imagem, o efeito do erro de arredondamento pode ser minimizado concatenando-se as transformações antes de aplicá-las.

Igualdade de cores

Problemas de igualdade de cores

O objetivo de um sistema eletrônico de reprodução de cores é igualar a aparência visual de uma imagem reproduzida à original em cada

estágio da cadeia de reprodução: escaneamento, visualização e saída.

Teoricamente, este objetivo deveria ser mais facilmente alcançado quando o original e a imagem reproduzida estivessem na mesma mídia (por exemplo, um slide 35 mm), e observados sob condições idênticas de iluminação. Contudo, isto não é fácil de se conseguir. Se escanarmos um slide de 35 mm usando um *scanner* de editoração moderno, obteremos um arquivo de imagem no qual cada pixel é representado por 24 bits (8 bits para cada componente vermelho, verde e azul). Se, em seguida, dermos saída desse arquivo de imagem RGB, inalterado, numa gravadora de filme (também um equipamento RGB), as cores do slide 35 mm resultante quase que certamente não serão iguais às do original. Por quê? Porque, como vimos, nem o RGB nem o CMYK são medidas calibradas de cor. O espaço de cores RGB do *scanner* precisa ser transformado no espaço de cores RGB da gravadora de filmes.

Gamut de cores e mapeamento de gamut

Na prática, a dificuldade da equiparação de cores fica ainda maior em virtude de um problema freqüente de identidade entre tipos de mídia diferentes (por exemplo, monitor CRT e prova impressa, ou slide 35 mm escaneado e impresso de meio-tom em quatro cores). Qualquer mídia ou dispositivo de reprodução de cores — filme, página impressa, monitor colorido — tem o seu próprio *gamut*, ou extensão de cores que podem ser reproduzidas.

O *gamut* de um equipamento de saída, ou uma prova dura, pode ser representado graficamente posicionando-se as cromaticidades das primárias usadas no processo de reprodução num diagrama de cromaticidade. (O “*gamut*” do olho humano é, por definição, o diagrama de cromaticidade completo.) Quando estamos imprimindo uma imagem do monitor do computador, o que fazemos com as cores que podem ser exibidas no monitor mas não na impressora?

Visto que diferentes mídias e dispositivos

físicos têm diferentes *gamuts*, algumas cores que às vezes aparecem num determinado meio ou dispositivo não podem ser fisicamente reproduzidas em outra mídia ou dispositivo. Tais cores são conhecidas por cores fora de *gamut*, visto que não podem ser reproduzidas precisamente apesar da transformação de cor usada. O processo de transformação de cores fora de *gamut* para o *gamut* do equipamento ou meio de saída, sem distorção da aparência total da imagem, é conhecido por mapeamento de *gamut*, e será discutido em detalhes.

Solução para a igualdade de cores

A solução para o problema da igualdade de cores é remeter os espaços de cores de todos os equipamentos de reprodução de imagens do sistema para um espaço de cores comum independente do equipamento. Isto é equivalente à definição de uma linguagem comum para a comunicação de informações de cores. Um “dicionário” único é necessário para traduzir a linguagem de cores de cada dispositivo de reprodução de imagens na linguagem de cores de referência. A criação de tal dicionário é conhecida por *caracterização do dispositivo*. O modo como tais “dicionários” são usados com os programas de tratamento de imagens será discutido adiante.

Qual o espaço de cores ideal?

Visto que não existe um padrão universal para a especificação de cores, a seleção de um espaço de cores do computador é naturalmente uma questão de compromisso entre inúmeros requisitos (às vezes conflitantes entre si):

- comunicação precisa de cores;
- edição intuitiva de cores;
- compatibilidade com *hardware* e *software*
- tamanho do arquivo (bits/pixel);

- computação para a conversão do espaço de cores.

O espaço de cores CMYK é tradicionalmente usado pelas artes gráficas e pela indústria gráfica, já que é o espaço de cores nativo dos *scanners* de pré-impressão de alta resolução e das impressoras. Entretanto, o CMYK não é adequado para um intercâmbio preciso de cores, visto que a cor produzida por um valor CMYK depende das tintas, do papel, das condições de impressão e de muitos outros fatores. Além disso, uma cor pode ser representada de muitas maneiras diferentes, complicando ainda mais a troca.

O CIELAB pode ser uma boa escolha como espaço de cores padrão, posto que pode ser usado para descrever cores sem ambigüidade, é um modelo intuitivo para a edição de cores, é perceptivamente uniforme e permite uma eficiente alocação de bits/pixel. Visto que os monitores são os periféricos em cores predominantes, o espaço de cores RGB do monitor proporciona o mais alto nível de interatividade com o usuário, pelo menor custo.

Os 256 níveis de intensidade disponíveis para cada cor, num formato de arquivo de imagem de 24 bits, proporcionam um alcance dinâmico suficiente se o espaço de cores for codificado para ser perceptivamente uniforme (por exemplo, CIELAB), mas insuficiente de outro modo. A escolha final do espaço de cores depende, em última instância, do aplicativo. Qualquer espaço de cores irá funcionar bem com um formato de arquivo de alcance dinâmico suficiente (bits/pixel) e um computador com potência de processamento adequada. Entretanto, o melhor procedimento é armazenar as imagens com o maior alcance dinâmico disponível no espaço de cores nativo do equipamento (*scanner* ou monitor) no qual elas foram criadas, e etiquetar (*tag*) o arquivo de imagem com as características do espaço de cores do equipamento.

Caracterização, calibragem e transformação

Caracterização do equipamento

Caracterização é o processo de definição da inter-relação entre o espaço de cores próprio do equipamento e um espaço de cores CIE de referência. No caso dos monitores e das impressoras, a caracterização descreve qual será a cor produzida em resposta a um dado valor de sinal de entrada. No caso dos *scanners*, a caracterização descreve qual o valor do sinal de saída que será produzido em resposta ao escaneamento de uma cor particular. A caracterização dos equipamentos é tipicamente independente da transformação subsequente do espaço de cores.

Transformação do espaço de cores

Transformação é o processo de conversão de um espaço de cores de um equipamento e um espaço de cores de referência, usando os parâmetros especificados no processo de caracterização do equipamento. Por exemplo, a transformação entre o espaço de cores CIE XYZ e o espaço de cores do equipamento é, geralmente, dividida em dois estágios: correção de linearidade (e compressão tonal) dos componentes acromáticos (neutros), e transformação (e compressão de *gamut*) dos componentes cromáticos (cor). Essa divisão permite que as características tonais do equipamento sejam recalibradas (ou ajustadas para otimizar a reprodução de uma imagem específica), independentemente das suas características de cromaticidade.

O tipo de algoritmo usado determina a velocidade e a precisão da transformação do espaço de cores. Diferentes algoritmos de mapeamento de *gamut* são usados para obter coincidência colorimétrica ou de aparência. As transformações dos espaços de cores são normalmente baseadas em operações com matrizes ou tabelas de referência tridimensionais.

Calibragem do equipamento

Calibragem é o processo de compensação do desvio do balanço de cores do equipamento que pode ocorrer ao longo do tempo. Por exemplo, a temperatura de cor da lâmpada do *scanner* normalmente muda com o tempo de uso. A calibragem assegura que o equipamento tenha um desempenho de acordo com os parâmetros estabelecidos na sua caracterização. Geralmente a calibragem atualiza apenas a componente de linearidade (acromática) da caracterização do equipamento. A caracterização é normalmente realizada pelo fabricante do equipamento, enquanto a calibragem pode ser feita pelo usuário.

Técnicas analíticas x técnicas empíricas

Os equipamentos de reprodução de imagens podem ser caracterizados empiricamente, moldando os princípios físicos de sua operação, ou analiticamente, medindo sua resposta ante uma ampla variedade de entradas. Na prática, quase todas as caracterizações são realizadas por meio de métodos analíticos.

Scanner

O que está por trás do RGB de um scanner ?

O *scanner* é um dispositivo que separa todas as cores de uma imagem em quantidades calculadas de apenas três componentes, usualmente valores de vermelho, verde e azul. No caso do *scanner* plano, a luz branca da lâmpada é refletida pela imagem que está sendo escaneada e atravessa filtros vermelho, verde e azul. Um detector mede a quantidade de luz de cada um dos três canais.

O documento que está sendo escaneado, e cada componente do *scanner* (fonte de luz, filtros, detector), podem ser descritos segundo suas características espectrais. Os valores RGB que o *scanner* registra quando escaneia

uma imagem são funções complexas de todos os componentes elétricos e ópticos do *scanner*, além da imagem em si. A saída do *scanner* é função dos seguintes fatores:

- reflectância espectral da imagem escaneada;
- espectro da fonte de luz do *scanner*;
- transmitância espectral do filtro de cor;
- sensibilidade espectral do sensor CCD;
- resposta espectral dos componentes ópticos.

Visto que *scanners* diferentes usam diferentes componentes, equipamentos diferentes produzirão valores RGB de saída totalmente diferentes em resposta ao escaneamento da mesma imagem — daí a necessidade da caracterização do *scanner*. Os valores triestímulo RGB que um *scanner* registra, em resposta a uma certa luz, são quase sempre diferentes dos valores triestímulo XYZ que o olho mede em resposta à mesma luz. Os filtros RGB de um *scanner* de editoração típico apresentam resposta espectral muito mais estreita do que a função de combinação de cores do olho humano. Os *scanners* de filme podem ser equipados com filtros de banda extremamente estreita, ajustados à absorção espectral dos corantes dos filmes. Os *scanners* planos devem ser capazes de escanear uma ampla variedade de materiais que refletem luz em todas as regiões do espectro, e por esse motivo necessitam de filtros de banda mais larga.

Um *scanner* projetado para captar as cores da mesma maneira que o olho humano deveria ser classificado como colorimétrico, e registrar diretamente os valores XYZ. Na prática, os *scanners* colorimétricos não são usados, em parte porque seria muito alto o custo de fabricar filtros que iguallassem exatamente a função de combinação de cores do olho humano, e em parte porque os sinais de cores CIE XYZ produzidos teriam que ser transformados para poderem ser exibidos num CRT. Em vez disso, as características de cor da maioria dos *scanners* de DTP e das câmaras de vídeo são ajustadas

para produzir dados triestímulo RGB, os quais equiparam-se razoavelmente aos fósforos de um tubo de raios catódicos. Desse modo, a imagem escaneada pode ser mostrada diretamente no CRT sem gastar tempo na transformação do espaço de cores.

Gamut do scanner

Os *scanners* não têm limitação cromática de *gamut*. Não existe um intervalo de cores para o qual os *scanners* são cegos. O que muda de um *scanner* para outro é a própria habilidade de diferenciar tons dentro do *gamut* da mídia que está sendo escaneada.

Alcance dinâmico do scanner

O alcance dinâmico é uma das qualidades métricas mais importantes de um *scanner*. É a medida do número de diferentes níveis que podem ser medidos em cada canal de cor do *scanner*. Visto que 24 bits por pixel tem se tornado um padrão “de fato” para armazenamento, manipulação e exposição de imagens coloridas, a maioria dos *scanners* de editoração mede hoje 8 bits, ou 256 níveis, por plano de cor, resultando em pixels de 24 bits.

Infelizmente muitos tipos de mídias que são escaneadas, especialmente cromos, contêm mais do que 256 níveis detectáveis em cada um dos três planos de cores. Uma transparência bem exposta, por exemplo, pode conter até 3000 diferentes níveis por plano de cores (equivalente ao intervalo de densidade próximo de 3,5). Um *scanner*, portanto, precisaria operar a 12 bits/canal para capturar todas as informações de cores da transparência.

Se o *scanner* tiver menor alcance dinâmico do que a fotografia original que está sendo escaneada, então algumas informações do original serão perdidas no processo de escaneamento.

O processo de tradução (compressão) do alcance dinâmico da mídia escaneada para o alcance dinâmico do arquivo digital de saída é conhecido por *modulação*, e é realizado através

de uma tabela de tradução conhecida por *curva de reprodução tonal* (TRC).

Cada passo do processo de reprodução de imagens, desde o escaneamento até a impressão final, precisa de alguma compressão do alcance dinâmico, ou intervalo tonal. A compressão ótima do intervalo tonal depende da própria imagem e requer que a informação tonal seja descartada, de tal modo que a aparência global da imagem seja preservada.

Correção do gama do scanner

Os detectores de luz CCD, usados na maioria dos *scanners* de desktop, respondem às mudanças de intensidade da luz de maneira linear (gama = 1). Dobrando a intensidade da luz, o valor do pixel produzido aumenta duas vezes. A resposta do olho, entretanto, está relacionada à raiz cúbica da intensidade de luz, e é aproximadamente linear com a densidade. Para fazer o *scanner* responder à intensidade de luz da mesma forma que o olho humano (isto é, linear em densidade), a saída do *scanner* deve ser mapeada numa escala logarítmica. Isto pode resultar em erro de quantificação: o *scanner* é incapaz de distinguir entre diferentes níveis de densidade do original. Transformar a imagem escaneada em dados logarítmicos não ajuda neste caso, uma vez que a informação foi perdida durante o escaneamento original.

Caracterização do scanner

O objetivo da caracterização do *scanner* é definir a relação entre o sinal de saída RGB do scanner e as cores da imagem que está sendo escaneada. Esta relação será diferente para diferentes modelos de *scanner*, para diferentes tipos de *scanner* do mesmo modelo e, devido ao envelhecimento dos componentes, para o mesmo *scanner* em diferentes épocas.

Os *scanners* geralmente são caracterizados a partir do escaneamento de um alvo de calibragem. O alvo deve ser do mesmo tipo de mídia

que o original a ser escaneado. A relação entre o RGB do *scanner* e o CIE XYZ dos blocos de cores do alvo é estabelecida por medições feitas com um colorímetro, ou um espectrofotômetro, para depois se escanear o alvo. A linearidade de cada um dos três canais do scanner pode, de maneira similar, ser medida escaneando-se uma escala de gris de densidade neutra contendo blocos de igual densidade entre os valores de D_{min} e D_{max} do alvo.

Transformação do RGB do scanner para CIE XYZ

Os *scanners* são linearizados a partir da criação de uma tabela de tradução (LUT) para cada um dos três canais, de modo que cada incremento de mudança de densidade de uma escala de gris usada como alvo de calibragem resulte na mesma mudança do valor digital do *scanner*; os três canais são, então, equalizados (balanceados no gris) para cada bloco do alvo. Essas tabelas são criadas invertendo-se a linearidade do *scanner* estabelecida durante a caracterização. Adicionalmente, as tabelas de tradução podem ser usadas para ajustar o balanço de branco e o balanço de preto do *scanner* (de tal forma que o escaneamento dos blocos branco e preto produza valores digitais máximo e mínimo, respectivamente).

O processo de caracterização do *scanner* determina que sinal de saída RGB será produzido em resposta ao escaneamento de cada cor CIE XYZ do alvo. Uma imagem típica conterá muitas cores que não são exatamente as mesmas do alvo. A transformação de cor do *scanner* requer, portanto, a ampliação da relação entre o RGB do *scanner* e o CIE XYZ, de forma a acomodar todas as cores possíveis que o *scanner* possa encontrar. Além disso, a relação entre o RGB do *scanner* e o CIE XYZ, estabelecida pela caracterização do *scanner* para as cores do alvo, é invertida em relação à direção na qual necessitamos aplicar a transformação do espaço de cores.

Calibragem do scanner

A linearidade e o balanço de cores do *scanner* podem mudar com o tempo e com o uso, exigindo uma recalibragem periódica. Visto que os filtros de seleção do *scanner* são relativamente estáveis, a componente cromática característica do *scanner* não muda muito com o tempo. A calibragem do *scanner* consiste normalmente, portanto, do escaneamento de um alvo de blocos de densidade neutra (acromática) e da subsequente atualização das tabelas de tradução de correção de linearidade.

Monitores

Como os monitores exibem cores

A face interna de um tubo de raios catódicos (CRT) contém três diferentes tipos de fósforos. Três feixes separados de elétrons atingem o plano, cada um estimulando um fósforo diferente para emitir luz vermelha, verde ou azul. Cada um dos fósforos emite luz com distribuição espectral característica. Cada tríade de fósforos RGB encontra-se suficientemente próxima para que suas luzes se combinem num processo basicamente aditivo, produzindo as cores que vemos no monitor. Embora a distribuição espectral da luz que atinge nossos olhos possa não ser nem um pouco parecida com a distribuição espectral da luz que está sendo produzida, a natureza triestímulo da visão humana habilita o monitor a produzir a igualdade de cores. A luz produzida por um monitor em resposta a algum valor de sinal RGB é determinada pelos seguintes fatores:

- gamut do monitor;
- gama do monitor;
- ponto branco do monitor.

Gamut do monitor

O *gamut* de cor do monitor (isto é, as cores mais saturadas que podem ser expostas no

monitor) é determinado, principalmente, pelas cromaticidades *x-y* dos fósforos vermelho, verde e azul do CRT. Apesar do grande número de diferentes fabricantes de monitores, existem relativamente poucos tipos de fósforos diferentes.

Gama do monitor

A intensidade da luz produzida pelos fósforos do CRT não está linearmente relacionada à voltagem aplicada aos feixes de elétrons. A intensidade real percebida é proporcional à voltagem aumentada pela potência do gama do monitor (?). O gama típico do monitor encontra-se no intervalo de 1.8 a 2.2. Cada canal RGB tem uma resposta gama separada, embora um valor médio de gama seja freqüentemente usado para os três canais.

Ponto branco do monitor

Quando cada um dos três feixes de elétrons do CRT é ajustado no seu nível máximo (correspondente a $R = G = B = 255$ para um mostrador de 24 bits), as luzes dos fósforos RGB misturam-se para produzir o ponto branco do monitor. O matiz de cor desse ponto branco pode ser quantificado pela especificação da sua temperatura de cor correlacionada (em graus Kelvin), ou por suas coordenadas *x-y* de cromaticidade CIE.

Muitos monitores de computador têm um ponto branco relativamente elevado (azulado), entre 8000 K e 9000 K. Se o monitor estiver sendo calibrado para se igualar à saída da impressora, seu ponto branco é freqüentemente reduzido para 5000 K (D50) a fim de igualá-lo ao branco do papel.

Entretanto, a redução do ponto branco do monitor através da redução do nível de sinal dos feixes RGB reduz também o seu alcance dinâmico. O ponto branco do monitor pode ser ajustado por alteração dos controles de brilho e contraste, ou estabelecendo um valor específico por meio de um calibrador de monitor.

Alcance dinâmico do monitor

A grande maioria dos monitores coloridos usados hoje em dia na reprodução eletrônica de cores é projetada para exibir um alcance dinâmico máximo de 24 bits por pixel. O alcance dinâmico real disponível num monitor depende da placa controladora de vídeo utilizada.

Condições de visualização

A aparência de uma imagem exibida no monitor será também fortemente influenciada pela iluminação ambiente da sala. O *gamut* efetivo do monitor diminui com o aumento da intensidade da iluminação ambiente. Deve-se estabelecer condições de visualização padronizadas durante a calibragem para assegurar resultados consistentes na equiparação de cores.

Caracterização do monitor

O objetivo da caracterização do monitor é definir a relação entre os sinais RGB enviados para um monitor específico e a cor resultante exibida. Essa relação é determinada pela medição de três características do monitor — as cromaticidades dos fósforos vermelho, verde e azul, o gama e o ponto branco. Visto que a medição da cromaticidade do fósforo requer o uso de um radiômetro espectral (um equipamento que provavelmente o usuário comum não possui à mão), a caracterização do monitor é geralmente executada pelo fabricante.

Transformação entre CIE XYZ e RGB do monitor

A conversão de CIE XYZ para o RGB do monitor exige correção de linearidade, transformação do espaço de cores e compressão de *gamut*. A correção da linearidade do monitor é realizada através de três tabelas de tradução (LUTs), que ajustam os três canais do monitor de modo que as mudanças dos valores dos

sinais RGB em incrementos iguais produzam mudanças iguais na luminosidade.

Do mesmo modo que a transformação de cor no *scanner*, a transformação de cor no monitor pode ser realizada usando-se matrizes ou tabelas de tradução tridimensionais. Se o monitor foi caracterizado simplesmente pela medição das cromaticidades dos seus três fósforos, o melhor é usar a transformação de matriz 3 x 3 (e geralmente é isso que se faz) para fazer a conversão de CIE XYZ para o RGB do monitor. Visto que o monitor pode ser usado tanto como fonte de cores (saída para uma impressora) quanto como dispositivo de saída da cor escaneada, a matriz deve ser derivada para a transformação de cores em ambas as direções.

Se, para maior precisão, forem usadas transformações baseadas em tabelas de tradução, deve-se então medir os valores de cores adicionais no estágio de caracterização do monitor. A compressão do *gamut* pode ser incorporada na tabela de tradução de transformação de cor do monitor.

Calibragem do monitor

O balanço de cores, a linearidade e o ponto branco do monitor mudarão com o tempo, exigindo uma calibragem periódica. Visto que as cromaticidades dos fósforos do CRT não variam muito com o tempo, a componente cromática da caracterização do monitor (isto é, os coeficientes da matriz 3 x 3) não precisa ser novamente ajustada.

Diversas empresas vendem dispositivos chamados “calibradores de monitores”, que se fixam à tela do monitor por meio de uma ventosa. Esses equipamentos são projetados para medir e controlar o ponto branco e o gama do monitor a partir de medições da linearidade e da luminância de cada um dos três canais de cores, e atualizam o LUT de correção de linearidade do monitor conforme os dados obtidos. Alguns dos mais caros calibradores de monitores podem também considerar as condições de iluminação

ambiente enquanto realizam a calibragem. Visto que a maioria dos CRTs são espacialmente não-uniformes — o mesmo sinal RGB produz diferentes cores em diferentes posições da tela — para assegurar melhores resultados a calibragem deve ser repetida em diferentes posições da face do monitor.

Muitos especialistas da indústria de pré-impressão eletrônica de alta resolução têm tradicionalmente ignorado as cores que aparecem no monitor. Eles preferem confiar nos valores numéricos de densidade dos pontos CMYK e traduzir mentalmente esses números em cores. Os usuários de equipamentos de edição eletrônica, contudo, querem poder usar o monitor como prova mole da reprodução final (prova dura), necessitando portanto que as cores do monitor sejam precisas.

Impressoras

Como as impressoras reproduzem cores

Visto que o papel branco reflete todos os comprimentos de onda em proporção aproximadamente igual, as impressoras devem reproduzir as cores aplicando quantidades variáveis de pigmentos ciano, magenta e amarelo para modular as quantidades de luzes vermelha, verde e azul, respectivamente. Infelizmente, o processo de reprodução de cores no papel é muito mais complicado. O papel e o iluminante raramente são espectralmente neutros, e as tintas de impressão contém impurezas. A tinta magenta, por exemplo, não absorve apenas luz verde, mas também alguma luz azul (diz-se que a tinta está contaminada por amarelo). Como resultado, a cor impressa não muda uniformemente com a quantidade de tinta aplicada. A melhor cor vermelha é obtida por alguma combinação das tintas CMY, não por impressão de quantidades máximas de tintas magenta e amarela. Pior ainda, muitas impressoras usam uma quarta tinta, preta (K), para melhorar a densidade e a qualidade da impressão em preto, e para reduzir a quantidade necessária de tintas

para imprimir as cores neutras. A presença de uma quarta cor na impressão significa que muitas combinações diferentes de tintas CMYK podem resultar na mesma cor impressa.

Separação de cores

A separação de cores é o processo de separação dos registros fotográficos ou eletrônicos de cada cor de escala (ciano, magenta, amarelo e preto) necessária para reproduzir uma imagem colorida original. A imagem original pode ser um impresso fotográfico, uma transparência ou um arquivo digital de imagem RGB. As separações de cores eram feitas antigamente fotografando-se o original através de filtros vermelho, verde e azul. Hoje em dia, virtualmente todas as seleções de cores são feitas com *scanners* eletrônicos. O arquivo de separação do preto é normalmente criado através das técnicas de remoção de subcores (UCR) e de substituição da componente gris (GCR). Ambas, UCR e GCR, são usadas para substituir as componentes ciano, magenta e amarelo das áreas de cinza neutro da reprodução por tinta preta. Desse modo, a reprodução parecerá fiel, mas usará menor quantidade das tintas coloridas de escala.

Reprodução em tom contínuo e em meio-tom

Existem duas técnicas básicas para combinar tintas coloridas e produzir uma gama de cores imprimíveis: tom contínuo e meio-tom. A impressão em tom contínuo envolve a sobreposição de três ou mais pigmentos coloridos para reproduzir as cores. A cor final depende de muitos fatores, incluindo as características espectrais dos corantes, a densidade de cada camada de pigmento e a reflectância do papel. Os impressos fotográficos e as transparências, bem como as impressoras de sublimação, reproduzem cores dessa maneira. Quando os pigmentos coloridos são superpostos, o processo de combinação é subtrativo.

Meio-tom é o processo de preparação de uma imagem de tom contínuo para impressão, convertendo-a em padrões de pontos CMYK através de um processo conhecido por reticulação. A cor percebida pode ser modulada alterando-se o número, a posição e o tamanho dos pontos de cada corante por unidade de área.

A reticulação tradicional usada na impressão ofsete reproduz as cores por impressão de cada uma das quatro tintas coloridas num padrão fixo de pontos (conhecido como roseta), numa frequência fixa de retícula, e modulando a cor pelo ajuste do tamanho de cada ponto colorido. Os pontos de meio-tom impressos são apenas parcialmente sobrepostos, e o processo de combinação de cores, portanto, não é nem totalmente aditivo, nem totalmente subtrativo.

Algumas impressoras digitais reproduzem cores modulando o tamanho e o número de pontos por unidade de área. De fato, existem muitos algoritmos *dithering* para impressoras digitais, e diversas impressoras suportam mais do que uma técnica de *dithering*. Os novos padrões de reticulação estocástica, uma forma de *dithering*, estão agora sendo usados na reprodução impressa.

Gamut da impressora

O *gamut* de cor da impressora (isto é, as cores mais saturadas que podem ser impressas) é determinado principalmente pelas cromaticidades das tintas ciano, magenta e amarela usadas. O *gamut* da impressão por sublimação é mais amplo do que a impressão fotográfica (haletos de prata).

Ponto branco da impressora

O ponto branco do papel é determinado pelas características espectrais do iluminante e do papel branco. Uma gama diferente de cores pode ser produzida por impressão da mesma tinta azul, por exemplo, sobre uma variedade de diferentes papéis “brancos”. As condições de visualização são freqüentemente padroni-

zadas em D65 ou D50 (padrão de provas europeu), usando cabines de análise.

Alcance dinâmico da impressora

Impressoras ofsete e digitais de alta qualidade têm um alcance dinâmico (intervalo de densidades) de 1,5 a 2, enquanto as impressoras baratas a jato-de-tinta usadas na editoração eletrônica, por exemplo, podem ter um alcance dinâmico menor do que 1. Visto que um pixel de cor de 24 bits tem um alcance dinâmico de 2,4, a reprodução colorimétrica exata é praticamente impossível. Como resultado, tanto os componentes acromáticos quanto os cromáticos de uma imagem digital de 24 bits/pixel geralmente têm que ser comprimidos (através de mapeamento de intervalo tonal e mapeamento de *gamut*, respectivamente) para alcançar a igualdade de aparência entre a imagem original e a reprodução impressa.

Alvos de caracterização da impressora

As impressoras são caracterizadas a partir da impressão e da medição de um grande número de blocos de cores que compõem o alvo de caracterização. Esses alvos de caracterização consistem tipicamente de duas partes: uma para medir a linearidade da impressora, e outra para medir as suas características cromáticas. Para medir a linearidade da impressora imprime-se um alvo contendo quatro colunas de blocos de cores, uma para cada cor de escala, em que se varia a força corante de máxima até mínima. Dentro de cada coluna, os blocos de cores adjacentes têm igual variação de valor digital.

As características cromáticas do equipamento são medidas através da impressão de uma série de blocos de cores. O número mínimo de blocos de cores que deve ser usado para caracterizar uma impressora tricromática é oito: as primárias (as cores das tintas puras), suas combinações (CM, CY, MY e CMY), preto e branco. Contudo, o espaço de cores da maioria dos

dispositivos de impressão é não-linear: a cor não varia uniformemente com cada incremento de tintas ciano, magenta, amarela e preta. Em consequência disso, muitos blocos de cores (1000 ou mais) devem ser impressos e medidos para caracterizar com precisão o espaço de cores da impressora.

Estabilidade e uniformidade da impressora

Um dos principais problemas na caracterização e calibragem da impressora é garantir que a saída da impressora permaneça estável no decorrer do tempo. Dentro de uma determinada tiragem, tanto as impressoras tradicionais quanto as impressoras digitais podem ser ajustadas para reproduzir cores com boa uniformidade de folha para folha. Entretanto, conforme as condições variam, ou conforme os componentes de uma impressora digital variam (com o uso ou com a temperatura), as características de cor da impressão mudam, exigindo uma recalibragem freqüente. As impressoras digitais apresentam uma uniformidade muito baixa — o mesmo valor digital, impresso em diferentes posições da página, pode produzir cores muito diferentes. A estabilidade e a uniformidade da impressora, de página para página ou dentro de uma mesma página, são geralmente os fatores mais limitadores na determinação da precisão da caracterização e transformação de cores da impressora.

Transformação de CIE XYZ para CMY(K) da impressora

O estabelecimento de uma boa escala de reprodução de tons através da correção da linearidade da impressora é considerado o passo mais importante do processo de reprodução impressa. A correção da linearidade da impressora é feita por meio de tabelas de tradução (LUTs), de modo que as variações em incrementos dos valores digitais de entrada produzam igual variação de densidade neutra da impressora. É lógico que os tons neutros,

num equipamento CMYK, não requerem iguais quantidades de tintas ciano, magenta e amarela, devido às impurezas das tintas. A compressão dos valores de tons é realizada por mapeamento do ponto branco e do ponto preto para a D_{min} e D_{max} da impressora, respectivamente. Essas LUTs, algumas vezes chamadas de curvas de reprodução tonal da impressora (TRCs), são criadas invertendo-se a linearidade da impressora medida durante a caracterização.

A componente cromática da transformação de cor da impressora envolve a criação de uma grande tabela de tradução para transformar os valores dos pixels CIE XYZ em valores CMY ou CMYK. A tabela de tradução é criada pela transposição da relação CMY(K) para CIE XYZ, estabelecida durante a caracterização da impressora. Os novos valores CIE XYZ são transformados para os valores CMY(K) da impressora por interpolação dos valores existentes na tabela. Podem-se usar diversas técnicas diferentes de interpolação da tabela de tradução, cada uma com suas próprias características de desempenho (velocidade e precisão).

Mapeamento de gamut

Muitas das cores que um *scanner* pode registrar, ou que um monitor pode exibir, não podem ser precisamente reproduzidas por uma impressora porque encontram-se fora do *gamut* da impressora. O processo de transformação desses valores de cores fora de *gamut* em cores imprimíveis é conhecido por mapeamento de *gamut*, que geralmente é incorporado na tabela de tradução da impressora. Em geral, deseja-se diminuir o mínimo possível a saturação das cores CIE XYZ de entrada, trazendo-as para o *gamut* da impressora de modo a obter a melhor reprodução possível. Existem dois métodos básicos de mapeamento de *gamut*: perceptivo e colorimétrico.

A tradução perceptiva é ótima para a reprodução de imagens fotográficas de tom contínuo. A tradução perceptiva usa uma técnica de compressão de *gamut* na qual as cores da

imagem são deslocadas na direção do eixo neutro, até que caiam dentro do *gamut* da impressora. A vantagem dessa técnica de mapeamento de *gamut* é que as cores na imagem fonte são mantidas na mesma relação umas com as outras, uma vez que tenham sido comprimidas para o *gamut* da impressora. O ponto branco e o ponto preto da imagem fonte são mapeados para o branco do papel e para o preto imprimível mais escuro, respectivamente. A desvantagem desta técnica é que as cores da imagem fonte que já estavam dentro do *gamut* da impressora (por exemplo, cores de memória críticas) podem ser deslocadas do ponto de coincidência colorimétrica exata.

A tradução colorimétrica é ótima para a reprodução de cores sólidas (“chapadas”). A vantagem da tradução colorimétrica é que qualquer cor da imagem fonte que estiver dentro do *gamut* de cor da impressora é reproduzida de maneira exata. As cores da imagem fonte que estiverem fora do *gamut* da impressora serão “cortadas” e traduzidas para a cor imprimível mais próxima. A desvantagem desta técnica é que muitas cores da imagem fonte podem ser mapeadas para uma mesma cor imprimível. Se uma tradução colorimétrica for aplicada numa

imagem fotográfica de tom-contínuo, por exemplo, muitos dos tons mais saturados da imagem original podem ficar amontoados na borda do *gamut* da impressora, resultando numa reprodução visualmente desagradável.

Calibragem da impressora

O balanço de cores e a linearização da impressora mudarão com o tempo, exigindo calibragem periódica. Assim como nos monitores e *scanners*, a calibragem tem o propósito de atualizar a componente acromática da impressora (isto é, a TRC), enquanto mantém intacta a componente cromática (tabela de tradução).

Visto que é preciso atualizar somente as TRCs da impressora, pode-se usar um densitômetro para fazer a calibragem. A calibragem da impressora envolve a repetição do processo de correção da linearidade, descrito acima.

Mesmo que uma impressora digital colorida tenha sido perfeitamente calibrada, é incerto que sua saída possa ser usada para produzir provas de referência tradicionais, já que diversos problemas, tais como moiré, aceitação de cores (*trapping*) e riscos não serão visíveis numa prova digital.