

Colore

1 Importanza del colore

Nell'elaborazione delle immagini, il colore è importante:

- per l'ispezione visuale, perché, in media, l'occhio umano riesce a distinguere simultaneamente alcune migliaia di colori, ma solo un paio di dozzine di livelli di grigio;
- per l'analisi automatica, perché contiene molte informazioni, utilizzabili anche da algoritmi automatici, ad esempio per la segmentazione.

2 Fenomeno dei colori

Il fenomeno dei colori è di tipo psicofisico: dal punto di vista fisico, esistono solo radiazioni di lunghezze d'onda diverse.

Il colore percepito di un oggetto dipende da:

- la natura della sorgente luminosa;
- le caratteristiche di riflettività dell'oggetto;
- le caratteristiche sensoriali/percettive del nostro occhio.

Di conseguenza, un oggetto non ha un unico colore caratteristico.

Per questi motivi, è difficile definire una metrica oggettiva del colore, ma essa è necessaria per poterlo rappresentare e manipolare in ambito digitale.

3 Definizione

Il **colore** è la traduzione visiva della stimolazione dei fotorecettori della retina provocata da un'energia radiante compresa entro un intervallo spettrale tra 0.4 e 0.7 micron di lunghezza d'onda.

4 Luce acromatica

La **luce acromatica** (bianca) è composta da radiazioni bilanciate in tutte le lunghezze d'onda. Non essendoci lunghezze d'onda dominanti, non si percepisce alcun colore, ma solo un valore di intensità.

5 Funzionamento dell'occhio

Nell'occhio, i fotorecettori responsabili della visione cromatica (fotopica) sono i *coni*.¹ Essi sono distinti in tre famiglie, che reagiscono a lunghezze d'onda diverse con sensibilità diverse. Approssimativamente:

- il 65 % dei coni sono sensibili al rosso (con sensibilità massima a lunghezze d'onda di circa 580 nm);
- il 33 % dei coni sono sensibili al verde (540 nm);
- il 2 % dei coni sono sensibili al blu (440 nm).

I tre tipi di coni hanno, però, sensibilità assoluta diversa:

- quelli relativi al verde sono i più sensibili;
- quelli relativi al rosso sono leggermente meno sensibili (ma, in compenso, sono appunto più numerosi);
- quelli relativi al blu sono molto meno sensibili.

Integrando l'attività di tutti i coni, si determina che la visione fotopica ha sensibilità massima intorno ai 555 nm (giallo).

Come conseguenza del funzionamento dell'occhio, lo spettro di una radiazione elettromagnetica si riduce a tre valori, gli stimoli dei tre tipi di coni, in base all'intensità di tale radiazione nelle tre zone di sensibilità dei coni.

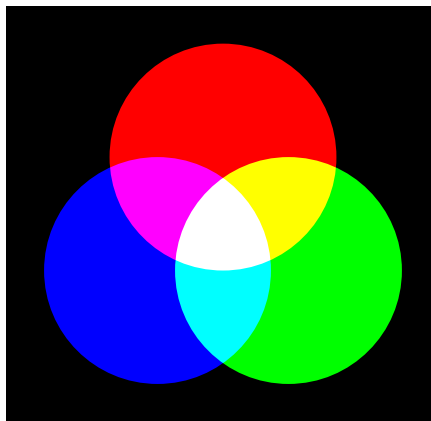
L'uomo è in grado di distinguere circa 350 000 colori, ma ciascuno di essi può corrispondere a più spettri diversi, che stimolano allo stesso modo i coni. Tale fenomeno, chiamato **metamerismo**, è alla base della **teoria del tristimolo**: combinando tre colori primari (rosso, verde, e blu), generati da dei fasci luminosi, dei quali viene variata la potenza, si può creare l'impressione di un'infinità di colori.

¹I coni sono concentrati in una piccola zona centrale della retina. Al di fuori da questa zona, invece, si trovano prevalentemente i *bastoncelli*, che non sono sensibili ai colori (visione scotopica).

6 Sintesi additiva e sottrattiva

- Quando si mescolano delle *luci colorate* primarie, si ottengono i colori secondari mediante un processo di **sintesi additiva**.
- Mescolando delle *tinte* (pigmenti primari), si generano i colori secondari attraverso un processo di **sintesi sottrattiva**. Ciò avviene perché ciascun pigmento assorbe determinate lunghezze d'onda, sottraendole dalla radiazione riflessa. In particolare, un pigmento primario è definito come un pigmento che assorbe una luce primaria e riflette le altre due.

6.1 Sistema additivo RGB



Nel sistema additivo **RGB** (Red, Green, Blue), i colori primari sono:

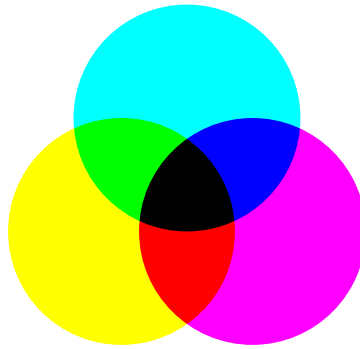
- rosso,
- verde,
- blu.

Componendo due colori primari, si ottengono i colori secondari:

- ciano = verde + blu,
- magenta = rosso + blu,
- giallo = rosso + verde.

Componendo, infine, tutti e tre i colori primari, si ottiene il bianco.

6.2 Sistema sottrattivo CMY



Nel sistema sottrattivo **CMY** (Cyan, Magenta, Yellow), usato per coloranti, inchiostri, pigmenti, ecc., i colori primari sono:

- ciano = bianco – rosso = verde + blu,
- magenta = bianco – verde = rosso + blu,
- giallo = bianco – blu = rosso + verde.

Essi corrispondono ai secondari della sintesi additiva, perché sono colori attribuibili a pigmenti che trattengono un primario RGB, e riflettono gli altri due.

Combinando due colori primari, si ottengono i colori secondari, che corrispondono ai primari additivi (“bloccando” due luci primarie, ne rimane solo una):

- rosso = bianco – verde – blu, cioè magenta e giallo;
- verde = bianco – rosso – blu, cioè ciano e giallo;
- blu = bianco – rosso – verde, cioè ciano e magenta.

Infine, componendo tutti e tre i colori primari, si ricava il nero.

7 Colorimetria

L’obiettivo della *colorimetria* è stabilire sistemi di riferimento assoluti che permettano di definire in modo quantitativo e univoco qualsiasi colore.

Dalla teoria del tristimolo, si deriva un modello quantitativo per il colore: ciascun colore può essere indicato da una tripletta di numeri, che indicano i valori del tristimolo (detti anche coefficienti di tricromaticità), cioè le componenti di rosso, verde e blu necessarie a riprodurre l’impressione generata da tale colore.

Per convenzione, la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) fissa le lunghezze d'onda dei colori primari ai seguenti valori:

- rosso = 700 nm,
- verde = 546.1 nm,
- blu = 435.8 nm.

8 Attributi percettivi del colore

Il modello tricromatico è molto diverso da come noi descriviamo il colore. Dal punto di vista percettivo, un colore è caratterizzato da:

Tinta (hue): corrisponde alla lunghezza d'onda dominante della radiazione che dà origine al colore, o, in senso percettivo, al colore dominante percepito da un osservatore.

Saturazione (saturation): indica la purezza del colore, cioè il rapporto tra l'ampiezza del picco nella lunghezza d'onda dominante e il valore medio dello spettro, ovvero la quantità di luce bianca mescolata con la tinta (all'aumentare della luce bianca, la saturazione diminuisce). I colori puri dello spettro sono tutti completamente saturi.

Brillanza (brightness): è la quantità totale di energia luminosa (l'area sottesa da tutto lo spettro), interpretabile come una nozione percettiva di intensità per la luce cromatica (simile, ma non del tutto corrispondente, all'intensità della luce acromatica). Mentre la saturazione misura la "diluizione" della tinta con il bianco, la brillantezza indica la diluizione con il nero.

L'insieme di tinta e saturazione è detto **cromaticità**, quindi un colore è determinato da cromaticità e brillantezza.

9 Spazi colore in ambito digitale

Dalla teoria del tristimolo e dalle componenti percettive del colore, si ricavano vari spazi (modelli) colore, usati per rappresentare e manipolare il colore in ambito digitale. I principali sono:

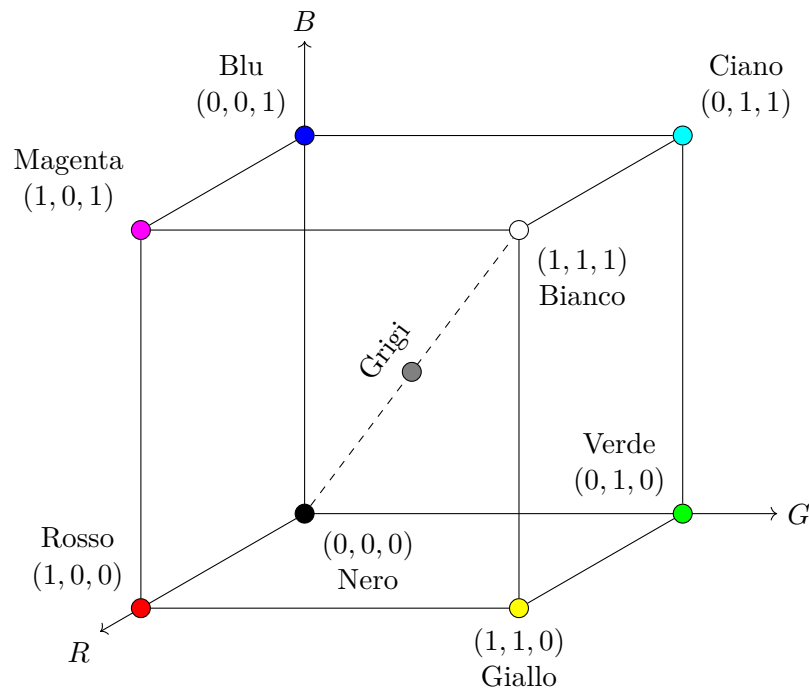
- *hardware oriented*:
 - **RGB**, usato per monitor e foto/videocamere;
 - **CMY** e **CMYK**, per le stampanti;
- *manipulation oriented*:

– **HSI** (Hue, Saturation, Intensity).

Esistono anche molti altri modelli, che però sono facilmente derivabili e comprensibili a partire da questi.

10 Modello RGB

Il modello RGB può essere rappresentato come un cubo nello spazio cartesiano tridimensionale:



- I tre colori primari sono posti sugli assi.
- Il valore massimo su ciascun asse può essere 1 (in forma normalizzata) o, ad esempio, 255 (se ciascuna componente di un colore viene codificata con 8 bit).
- I punti appartenenti al cubo sono tutti i colori che possono essere rappresentati (tenendo conto, eventualmente, della risoluzione con cui vengono codificati i valori delle coordinate (R, G, B)).
- All'origine si trova il nero, mentre al vertice esterno è situato il bianco.
- Sulla diagonale tra nero e bianco si ha la gamma dei grigi, che sono infatti i punti con proiezioni uguali sui tre assi (cioè con coordinate $R = G = B$). Inoltre, l'intensità di un colore corrisponde alla sua proiezione su questa diagonale. Quindi,

ogni piano perpendicolare alla diagonale contiene tutti i colori che hanno una specifica intensità.

- I vertici del cubo situati sugli assi sono i colori primari, mentre i vertici sui tre piani definiti dagli assi (RG , RB e GB) sono i colori secondari.
- Non importa a quale asse si assegna quale colore primario: basta farlo in modo consistente.

Questo modello è semplice dal punto di vista computazionale, e rispecchia il funzionamento dell'hardware (monitor, fotocamere, ecc.), ma non include le caratteristiche percettive, quindi la manipolazione di colori rappresentati in RGB non è immediata.

10.1 Codifica delle immagini RGB

Un'immagine a colori codificata in RGB consiste di tre piani immagine, ciascuno dei quali descrive una delle tre componenti.

Il numero di bit usato per rappresentare ogni pixel nello spazio RGB è detto **profondità colore**. Ad esempio, se si usano 8 bit per rappresentare ciascuna delle tre componenti, il pixel ha una profondità di 24 bit, e il numero di colori distinti rappresentabili nell'immagine è $(2^8)^3 = 16\,777\,219$.

Il colore può anche essere rappresentato usando solo 8 bit per pixel, mediante una tabella (look-up table), chiamata **colormap**, che associa ciascun valore di 8 bit a un colore. I vantaggi sono

- un risparmio di memoria, perché (a parità di numero di pixel) una codifica a 8 bit occupa meno spazio di una a 24 bit;
- la possibilità di sperimentare diversi assegnamenti di colori, cambiando semplicemente la colormap;

ma, in compenso

- si possono rappresentare solo 256 colori distinti;
- il formato si complica, perché diventa necessario memorizzare anche la colormap, e accedere a essa ogni volta che si visualizza/elabora l'immagine.

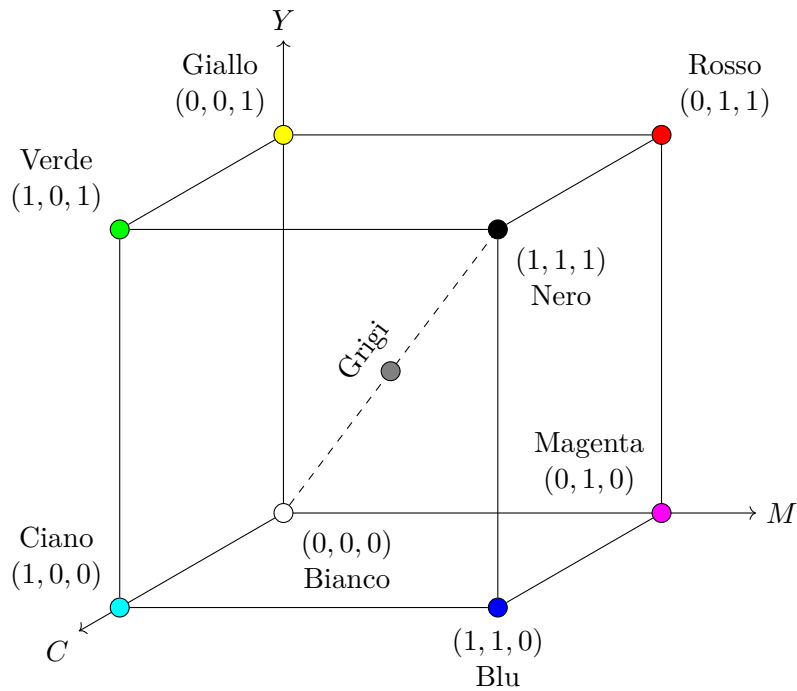
Il processo che trasforma un'immagine a 24 bit in una a 8 bit è chiamato **color quantization**. Spesso, la differenza tra l'immagine a 24 bit iniziale e quella a 8 bit risultante è abbastanza piccola da non essere visibile.

11 Modello CMY

Il modello CMY si ricava da RGB mediante la trasformazione

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Anch'esso, quindi, può essere rappresentato come un cubo:



- L'origine corrisponde a un pigmento che non assorbe alcuna lunghezza d'onda, ovvero al colore bianco.
- Il vertice esterno rappresenta un pigmento che assorbe tutte le lunghezze d'onda, cioè il colore nero.
- I colori primari e secondari sono "scambiati" rispetto a RGB.

I dispositivi che depositano pigmenti richiedono in input colori in forma CMY, oppure effettuano la conversione da un input RGB.

11.1 Spazio CMYK (quadricromia)

In base alla sintesi sottrattiva, mescolando in parti uguali ciano (C), magenta (M), e giallo (Y), si dovrebbe ottenere il nero.

In pratica, il colore nero così ottenuto non è sufficientemente “pieno”. Per rimediare, nella sintesi viene aggiunto del nero (K). Si ricava così lo spazio colore CMYK, detto anche *quadricromia*.

12 Gamut dei sistemi RGB e CMY

Si definisce **gamut** l’intervallo di colori che può essere riprodotto in un dato sistema.

Il gamut dei sistemi RGB e CMY(K) non coincide: ci sono colori che possono essere riprodotti in RGB, ma non in CMY, e viceversa. Inoltre, nessuno dei due sistemi è in grado di riprodurre tutti i colori visibili all’occhio umano.

13 Spazio HSI/HSL

Lo spazio HSI, o HSL, è vicino alla descrizione percettiva del colore, in quanto specifica i colori in termini di:

- tinta (hue);
- saturazione (saturation);
- intensità (intensity/lightness).

Lo spazio HSI è ricavato da RGB. Infatti, collegando un vertice “colorato” del cubo ai vertici bianco e nero, si ottiene un triangolo contenente tutti i colori della tinta scelta, che variano per intensità (spostandosi lungo la diagonale nero-bianco) e per saturazione (la quale aumenta all’allontanarsi dalla diagonale): essi sono tutte le possibili diluizioni di tale colore con il bianco e/o il nero. Allora, a livello intuitivo, per costruire lo spazio HSI si fa ruotare il cubo RGB intorno alla diagonale nero-bianco, ottenendo così una sorta di doppio cono:

- la diagonale, corrispondente all’intensità, diventa l’altezza, lungo la quale sono quindi disposti i grigi;
- i vari colori giacciono su un *piano colore*, perpendicolare all’altezza, che può avere, equivalentemente, forma triangolare, esagonale, o circolare;
- le tinte (hue) si trovano sulla circonferenza del piano colore, e si identificano misurando, in senso orario, l’angolo da un asse di riferimento (per esempio il rosso);

- la saturazione è la lunghezza del vettore a partire dal centro (poiché si hanno i grigi al centro e i colori puri sulla circonferenza).

