

L'importanza del Colore in Computer Graphics

Alessandro Artusi

Il colore

La luce è definita come una forma di energia elettromagnetica di lunghezza d'onda compresa tra 380 e 760 nm circa, che prende il nome di *spettro visibile* [1]. Il sistema visivo dell'uomo (SVU) è sensibile ad una porzione ristretta dell'intera gamma della radiazione elettromagnetica, che ricopre un intervallo di lunghezze d'onda che va approssimativamente da 10^{-5} a 10^{16} nm.

La luce di una sola lunghezza d'onda separata dalle altre è definita *monocromatica*. La composizione spettrale della luce può essere rappresentata graficamente, vedi Figura 1, descrivendo così la *curva spettrale* della luce stessa.

La sensazione fisiologica che il SVU produce quando l'occhio viene colpito dalla luce riflessa, emessa o trasmessa da un oggetto, viene definita come colore. Naturalmente i colori

rappresentati nello schema di Figura 1, sono detti *colori spettrali*.

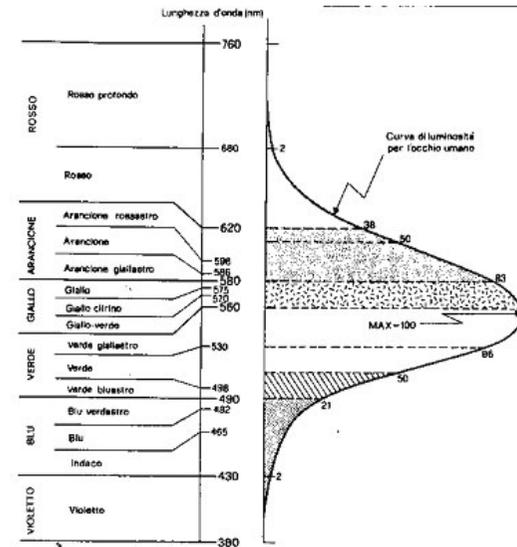


Fig. 1 Le sei gamme principali dello spettro dell'iride suddivise in tonalità intermedie. A destra è mostrata la loro luminosità per l'occhio umano adattato alla luce diurna, espressa in percento del suo valore massimo, che si ha in corrispondenza di 555 nm.

Alcune definizioni

Il colore può essere visto come una caratteristica di un oggetto, infatti spesso viene identificato con il suo colore. Ma come può produrre colore un oggetto, e come gli oggetti possono avere colori differenti?

Alessandro Artusi
 Institute of Computer Graphics and Algorithms
 University of Technology Vienna
 artusi@cg.tuwien.ac.at

Gli oggetti posseggono delle particelle, chiamate *pigmenti colorati*, che sono responsabili dell'assorbimento selettivo della luce. In altre parole la luce incidente, sulla superficie dell'oggetto, viene in parte riflessa e in parte no. La componente non riflessa penetra all'interno dell'oggetto e viene in parte assorbita dai pigmenti colorati che restituiscono solo le componenti spettrali non assorbite (*luce diffusa*). In questo modo gli oggetti ci appaiono colorati.

Ci sono però due tipi di oggetti: *opachi* e *trasparenti*. Nel caso di oggetti opachi la luce che arriva all'occhio del SVU è una miscela di luce riflessa e diffusa.

Per gli oggetti opachi viene definita *riflettanza* la percentuale di luce incidente che non viene assorbita, e *curva di riflettanza spettrale* la sua rappresentazione in funzione della lunghezza d'onda. Mentre per gli oggetti trasparenti viene definita *trasmissione* la percentuale di luce incidente che riesce ad attraversarlo, e *curva di trasmissione spettrale* la sua rappresentazione in funzione della lunghezza d'onda.

Un'analisi più attenta del fenomeno della percezione del colore rivela però che la definizione data in precedenza non è del tutto adeguata. Infatti il colore, più che una caratteristica degli oggetti, sembra essere il risultato a livello della nostra percezione fisiologica di molteplici fattori: proprietà del materiale, condizioni di osservazione, caratteristiche del sistema visivo, elaborazione da parte del cervello. Quindi è opportuno considerare il colore come una sensazione risultante dall'interpretazione a livello cerebrale dei dati raccolti dal sistema visivo. In altre parole noi percepiamo il colore e possiamo fare una distinzione tra la radiazione visibile che colpisce il sistema visivo

di un osservatore, *stimolo colore*, e la percezione del colore da parte dello stesso, *risposta colore*. Ovviamente c'è un qualcosa che genera questo stimolo, come ad esempio una sorgente luminosa o un oggetto che diffonde e riflette la luce incidente su di esso, a cui viene dato il nome di *oggetto stimolo*.

In ambito colorimetrico il colore è associato allo stimolo anziché alla risposta, e fa riferimento alla sensibilità visiva di un osservatore tipico, e il colore percepito viene definito come *sensazione di colore*. Mentre il termine *colore* viene invece usato per denotare una caratteristica dello stimolo.

I principali attributi dei colori, come vengono percepiti quando li si osserva isolatamente, sono: *tinta*, *saturazione* e *luminosità*.

La *tinta*, è la particolare sensazione cromatica prodotta da una radiazione luminosa. I colori che possiedono una tinta sono detti *cromatici*; ovviamente i colori privi di tinta sono invece detti *acromatici*. La *saturazione* di un colore, può essere definita come la sensazione del grado di concentrazione della tinta rispetto al contenuto di bianco. La *luminosità* corrisponde all'impressione di un colore che va da molto cupo a molto brillante.

A parità dei tre attributi precedenti, due colori risultano indistinguibili se vengono osservati nelle stesse condizioni ambientali.

Una caratteristica importante del colore è la sua apparenza, infatti non esiste una corrispondenza biunivoca tra stimoli colore e colori percepiti. Questo perché la sensazione di colore che un stimolo suscita in un osservatore è influenzata da molteplici fattori, di cui bisogna necessariamente tenere conto in tutte quelle applicazioni che richiedono una riproduzione fedele del colore [1]. In applicazioni dove l'apparenza del colore gioca un ruolo importante, considerare il processo

automatico che avviene all'interno del SVU definito come *adattamento cromatico* è di fondamentale importanza.

Come la curva di riflettanza o trasmittanza spettrale rappresenta l'attributo fisico del colore, l'apparenza di un colore può essere descritta più efficacemente facendo riferimento a degli attributi percettivi o psicologici [1].

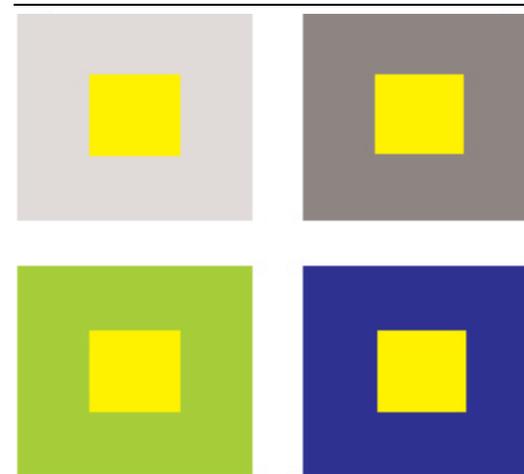


Fig. 2 Effetti di contrasto simultaneo: un colore appare più luminoso se osservato su uno sfondo scuro piuttosto che su uno sfondo chiaro (in alto); oppure su uno sfondo di un colore complementare piuttosto che di un colore poco dissimile (in basso).

In questo contesto anche fenomeni come: *costanza del colore*, *contrasto simultaneo* e *consecutivo* diventano importanti. La capacità degli oggetti di mantenere approssimativamente lo stesso colore al variare del tipo di illuminazione, è definito *costanza del colore*. È importante precisare che la costanza del colore è limitata a sorgenti luminose che offrono uno spettro ampio di lunghezze d'onda, come il Sole o i corpi incandescenti. Sono da escludere le sorgenti

monocromatiche. Infatti, un foglio di carta bianco illuminato da un fascio di luce rossa apparirà ovviamente rosso.

Un altro elemento che incide sulla percezione del colore è il contesto in cui esso viene osservato; dove per contesto si intende sia lo sfondo che eventuali colori contigui. Per esempio un qualunque colore appare più luminoso se osservato su uno sfondo scuro, piuttosto che su uno sfondo chiaro; oppure se viene osservato su uno sfondo di un colore ad esso complementare, piuttosto che di un colore poco dissimile. Questo fenomeno si chiama contrasto simultaneo ed è illustrato in Figura 2.

Solitamente anche le caratteristiche di superficie (liscia o ruvida, lucida o opaca, ecc.) alterano l'apparenza di un colore.

Altri fattori critici sono: la forma, la dimensione e il contorno della zona di colore osservata.

Il contrasto consecutivo può essere definito con un semplice esempio. Se si guarda per un attimo a occhio nudo una sorgente di luce, come il Sole, quando si chiudono gli occhi rimane la netta sensazione di una macchia luminosa che non scompare per diversi minuti e assume via via i colori più vari. Questo fenomeno, che è dovuto ad un eccessivo affaticamento dei fotorecettori visivi, è definito contrasto simultaneo. Una volta definito il colore e come questo può essere influenzato, diventa importante capire in che modo possa essere riprodotto. Le tecniche che consentono di miscelare stimoli sono di due tipi: *sintesi additiva* e *sintesi sottrattiva* [1][2].

La sintesi additiva si ha quando la luce di due o più sorgenti si combinano prima di raggiungere l'occhio. La sintesi sottrattiva, è alla base della mescolanza di colori ottenuti con pigmenti e tinte. Essa opera in modo opposto a quell'additiva, infatti il colore si

forma sottraendo energia luminosa che viene assorbita dai tre pigmenti dei tre primari. I colori delle luci iniziali sono detti *primari additivi*, nel caso della sintesi additiva, mentre nel caso della sintesi sottrattiva sono detti *primari sottrattivi*.

Ma perchè il colore possa essere utilizzato in applicazioni reali si rende necessaria la sua specifica in termini numerici. Una scienza chiamata *colorimetria* è nata con questo obiettivo. In particolare l'obiettivo primario della colorimetria è quello di studiare le relazioni che, dato uno stimolo descritto mediante le sue proprietà fisiche, permettono di precisare in termini numerici la sensazione di colore derivante da esso. La colorimetria si occupa inoltre della definizione di formule per il calcolo delle differenze colore che si riscontrano osservando stimoli le cui distribuzioni spettrali siano tali da non provocare una corrispondenza percettiva.

L'autorità guida in colorimetria è la *CIE (Commission Internationale de l'Eclairage)*, un comitato internazionale istituito col compito di definire tutti gli standard e le procedure da adottare nelle applicazioni colorimetriche.

In colorimetria la sensazione di colore derivante da uno stimolo di composizione spettrale arbitraria, viene descritta ricorrendo ad una terna di valori definiti *valori tristimolo* [3]. Essi permettono di identificare in maniera semplice colori percettivamente identici e di derivare delle grandezze direttamente correlate con gli attributi percettivi che descrivono l'apparenza del colore.

Nel corso di questi anni la *CIE* ha introdotto una serie di standard utili per definire la specifica del colore in modo univoco. Infatti già nel 1931 ha fissato un insieme di stimoli di riferimento standard e le quantità di tali stimoli necessarie per riprodurre tutti i colori dello spettro visibile per mescolanza

additiva. Questi dati definiscono l'*Osservatore Colorimetrico Standard CIE del 1931*, che riassume le caratteristiche di un osservatore medio per campi visivi di ampiezza compresa tra uno e quattro gradi.

Come primari sono state assunte tre luci monocromatiche, una rossa (R), una verde (G) e una blu (B), di lunghezze d'onda rispettive 700 nm, 546.1 nm e 435.8 nm. Le quantità di R, G e B necessarie per uguagliare una unità di potenze di ogni lunghezza d'onda dello spettro visibile definiscono le cosiddette *funzioni colour-matching*, $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$ (Figura 3), che permettono di ricavare i valori tristimolo di un qualunque stimolo colore a partire dalla sua distribuzione spettrale di potenza.

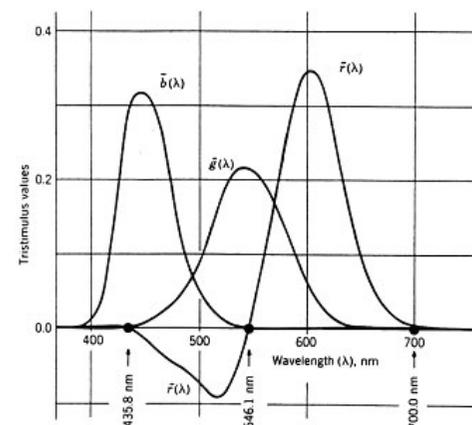


Fig. 3 Funzioni colour-matching relative ai primari R, G e B.

Sia $E(\lambda)$ la distribuzione spettrale di potenza di uno stimolo, i suoi valori tristimolo sono dati da:

$$R = K \sum_{\lambda} E(\lambda) \bar{r}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$G = K \sum_{\lambda} E(\lambda) \bar{g}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$B = K \sum_{\lambda} E(\lambda) \bar{b}(\lambda) \Delta\lambda$$

dove K è una costante di normalizzazione. Nella realtà le sommatorie sarebbero degli integrali che si estendono su tutto il range del visibile. Ma nelle applicazioni pratiche gli integrali vengono rimpiazzati da sommatorie, e lo spettro del visibile viene allora suddiviso in intervalli di uguale ampiezza ($\Delta\lambda$). In questo caso si ipotizza che la distribuzione spettrale di potenza dello stimolo si mantenga costante all'interno di ogni intervallo, pari al valore che essa assume nel punto centrale dell'intervallo stesso.

Questa approssimazione viene giustificata dal fatto che combinando additivamente due o più stimoli colore i corrispondenti valori tristimolo si sommano. Vengono ricavate dai valori tristimolo delle grandezze frazionarie, dette *coordinate di cromaticità*, che indicano le quantità relative dei tre stimoli primari necessarie per riprodurre un qualsiasi colore [1][2][4].

Per varie ragioni pratiche la CIE ha deciso di adottare uno schema in cui ogni colore possa essere descritto esclusivamente da grandezze positive [3].

Però questo obiettivo non è raggiungibile con nessuna terna di colori reali, quindi la CIE ha introdotto i cosiddetti *primari immaginari*. È bene sottolineare che i primari immaginari sono delle astrazioni matematiche e quindi non sono reperibili

in natura, nè possono essere sintetizzati artificialmente.

In questo modo si passa dai valori tristimolo R, G e B ai valori tristimolo immaginari X, Y e Z , ricavati da essi per mezzo di opportune trasformazioni lineari. Con le stesse trasformazioni lineari si possono ricavare le funzioni colour-matching $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$, relative ai nuovi primari di riferimento (Figura 4). Anche queste funzioni colour-matching $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ valgono solo per campi visivi di ampiezza compresa tra uno e quattro gradi.

Nel 1964 la CIE ha introdotto un ulteriore insieme di funzioni colour-matching, denotate con $\bar{x}_{10}(\lambda), \bar{y}_{10}(\lambda)$ e $\bar{z}_{10}(\lambda)$. Esse definiscono un nuovo osservatore ideale, noto come *Osservatore Colorimetrico Standard Supplementare CIE del 1964*.

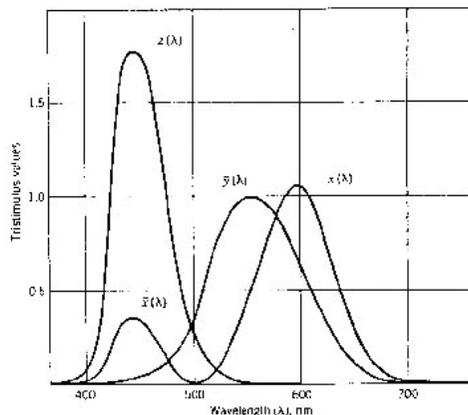


Fig. 4 Funzioni colour-matching relative ai primari immaginari CIE.

Dalle coordinate di cromaticità è possibile ricavare un importante diagramma noto come *diagramma di cromaticità xy CIE del 1931*, vedi Figura 5.

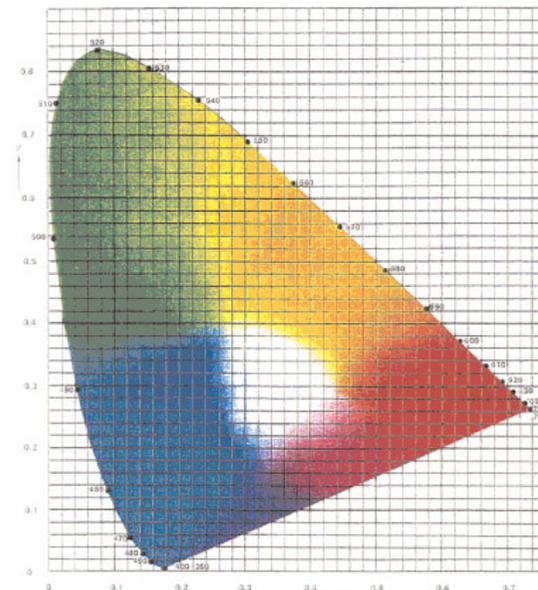


Fig. 5 Diagramma di cromaticità xy CIE del 1931.

La non uniforme distribuzione dei punti all'interno del diagramma xy fa sì che la distanza in esso tra una qualsiasi coppia di stimoli non sia un buon indice della differenza di colore percepita osservandoli. Infatti due punti molto vicini possono corrispondere sia a colori praticamente indistinguibili, sia a colori percettivamente molto diversi. Questo dipende dalla loro posizione all'interno del diagramma. È questa una grave limitazione del

diagramma xy, che la CIE ha cercato di superare con l'introduzione di altri diagrammi di cromaticità. Come si è visto in precedenza, un colore può essere rappresentato con una terna di valori. Da qui sembra ovvio derivare che uno spazio a tre dimensioni è sufficiente per rappresentare un insieme di colori. Questi spazi vengono chiamati *spazi colore* e ne esistono diversi con differenti caratteristiche. Possiamo suddividere gli spazi colore in due categorie generali: *dipendenti* e *indipendenti dal dispositivo*, dove per dispositivo si intende un qualsiasi dispositivo di input o output. Con il termine dipendenti dal dispositivo, si intendono spazi colore che sono strettamente legati alle caratteristiche del dispositivo come: primari, tecnica di sintesi di colore adottata ecc. Naturalmente con il termine indipendenti dal dispositivo, si intendono spazi colore che non sono legati alle caratteristiche di un qualunque dispositivo di input o output.

Lo spazio colore RGB è tipico dei dispositivi che producono il colore per sintesi additiva.

Ogni colore è rappresentato da un vettore di tre componenti che indicano le quantità dei primari rosso (R), verde (G) e blu (B) necessarie per sintetizzarlo. Questo spazio è rappresentato da un cubo avente un vertice nell'origine e gli spigoli paralleli agli assi, vedi Figura 6.

Un difetto non trascurabile di questo sistema risiede nella sua mancanza di uniformità. Infatti variazioni della stessa ampiezza sull'intervallo [0, 255] non sempre producono variazioni equivalenti nei colori percepiti. Per ottenere uguali differenze percettive in alcuni casi sono necessarie più di venti unità di distanza, mentre in altri una sola unità risulta più che sufficiente [5][6]. Lo spazio colore CMY, caratteristico dei dispositivi che producono il

colore per sintesi sottrattiva, presenta una struttura e una metrica molto simili a quelle del sistema RGB. Un colore è ancora rappresentato da un vettore di tre componenti che indicano le quantità di primari necessari a sintetizzarlo, in questo caso i primari in questione sono ciano (C), magenta (M) e giallo (Y).

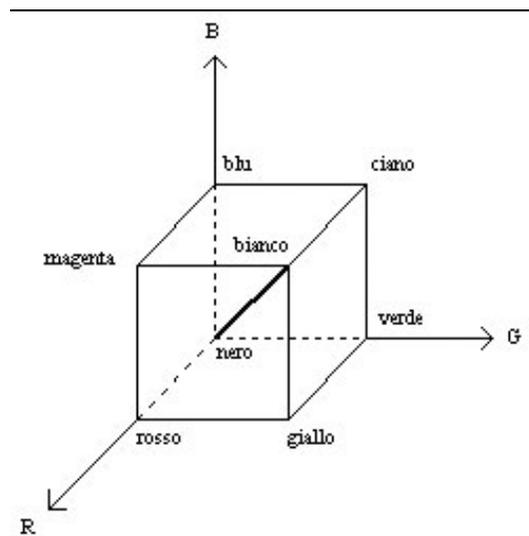


Fig. 6 Lo spazio colore RGB.

Per un intervallo [0, 255], la specifica di un colore nello spazio CMY può essere ricavata dalla sua specifica nello spazio RGB per mezzo delle seguenti trasformazioni lineari:

$$C = 255 - R \quad M = 255 - G \quad Y = 255 - B$$

Lo spazio colore CMY presenta le stesse limitazioni dello spazio colore RGB. In molte applicazioni è fondamentale disporre non solo di strumenti per la misura precisa del colore, ma anche di formule per la stima delle differenze percepite tra due stimoli [7].

A questo proposito la CIE ha introdotto l'impiego di due spazi colore approssimativamente uniformi, CIELUV e CIELAB, e delle relative formule di differenza. Gli spazi CIELUV e CIELAB sono stati giudicati ugualmente validi nell'approssimare le differenze di colore percepite da un osservatore tipico. Essi hanno trovato largo impiego rispettivamente in ambito additivo (televisione, monitor) e in ambito sottrattivo (produzione di sostanze coloranti).

In questi ultimi anni sono stati proposti una serie di spazi colore che sembrano rispondere, sotto certi aspetti, alle esigenze sia dei costruttori di dispositivi di input e output, che a coloro che si propongono di costruire sistemi software che hanno il compito di migliorare la qualità delle immagini riprodotte sui dispositivi stessi.

Il primo spazio colore, che cerca di dare una risposta a queste esigenze, è lo spazio sRGB. Questo spazio colore è stato proposto da Hewlett-Packard e Microsoft, con l'intenzione di standardizzare e completare la gestione del colore fra differenti dispositivi basandosi su di uno spazio colore RGB calibrato colorimetricamente, appunto lo spazio colore sRGB.

Lo spazio colore S-CIELAB è nato come estensione dello spazio colore CIELAB. Infatti lo spazio colore CIELAB è usato come metrica per misurare le differenze colore tra colori target, ma non presenta buoni risultati quando applicata ad immagini. Invece la sua estensione S-CIELAB permette di estendere la metrica CIELAB sulle immagini a colori.

➤ Perché è così importante in Computer Graphics

Come si è visto, nel paragrafo precedente, essendo il colore una componente importante della realtà si sono sviluppati standard per cercare di quantificarlo numericamente in modo da poterlo riprodurre in modo univoco e comparabile. Grazie a questi standard sono state sviluppate diverse tecniche usate in *Color Imaging* e in *Color Reproduction* che permettono di riprodurre un colore in modo adeguato su di un dispositivo.

Anche in *Computer Graphics*, in particolare nell'area della *Realistic Image Synthesis*, il colore gioca un ruolo importante. Basti a pensare all'obiettivo di quest'area, che è quello di riprodurre immagini il più possibile indistinguibili dalle scene reali. Quindi perché un'immagine possa essere indistinguibile dalla scena reale bisogna riprodurre nel modo corretto il colore.

➤ Come viene generato

In Computer Graphics sono stati proposti differenti metodi per il calcolo del colore della scena modellata da un sistema di rendering: RGB, *Gaussian quadrature sampling (GQS)*, *Linear-color representation (LCR)*, *Full-spectral local illumination (FSLI)* [8]. Il modello RGB rimane il più comune metodo adottato oggi dai sistemi di rendering. Le sorgenti luminose e le proprietà dei materiali sono rappresentate da tre lunghezze d'onda corrispondenti a rosso (R), verde

(G) e blu (B). Il calcolo del colore finale consiste nel moltiplicare i valori RGB delle sorgenti luminose con i rispettivi valori RGB dei materiali. Il vantaggio immediato è che questo calcolo può essere facilmente implementato in hardware e visualizzato attraverso un monitor standard CRT. Questo metodo presenta un ovvio svantaggio legato alla dipendenza dal dispositivo dei primari RGB. Infatti lo stesso colore RGB calcolato e visualizzato su di un dispositivo, può non apparire lo stesso se visualizzato su di un altro dispositivo. Un'altra limitazione, è l'impossibilità di avere una rappresentazione accurata dei colori metamericì.

La tecnica denominata GQS è stata introdotta da Meyer [9], che senza il calcolo completo della curva spettrale riesce a fornire una più accurata riproduzione del colore rispetto alla tecnica precedente. Infatti introduce l'idea di stimare la curva spettrale con un ristretto numero di basis function, scegliendole da una prima analisi del funzionamento del SVU. Da questo deriva un nuovo spazio colore chiamato AC1C2. Per costruire questo spazio Meyer usa un modello denominato appunto Gaussian quadrature, da dove deriva il nome di questa tecnica. Meyer trova che quattro curve spettrali, di quattro differenti colori, sono sufficienti per ottenere un'accurata valutazione di questo spazio [8].

Questo metodo permette una buona rappresentazione del colore per molte scene, questo grazie al fatto che si basa sui principi della percezione umana. Ma presenta lo svantaggio di rappresentare una curva spettrale con un numero limitato di esempi, sacrificando così molta informazione. Quindi quando è richiesta una riproduzione colorimetrica accurata, così come nella

rappresentazione di oggetti metamericì, questo metodo spesso presenta risultati indesiderati [8].

Un'altro metodo, che si basa sempre sulla definizione di basis function per una accurata riproduzione colorimetrica, è conosciuto come rappresentazione lineare del colore o Linear-color representation, ed è stato introdotto da Peercy [10]. Questi metodi cercano sempre di trovare il numero minimo di basis function necessarie per rappresentare l'informazione spettrale delle sorgenti luminose e dei materiali, ma utilizzando modelli matematici differenti dal metodo precedente come ad esempio l'analisi vettoriale. Il principale vantaggio di questi metodi, è rappresentato da un'elevata accuratezza nella rappresentazione colorimetrica pur utilizzando un basso numero di basis function [8]. Lo svantaggio è che le basis function devono essere calcolate prima della fase di rendering, e questo spesso presenta alcune difficoltà [8].

Garret e Fairchild [8] hanno presentato un modello che permette una completa computazione della curva spettrale (FSLI), come semplice estensione di OpenGL. Questa tecnica permette di simulare diversi fenomeni importanti come metamerismo e fluorescenza.

Pur essendo adeguata per molte applicazioni basate sul calcolo della curva spettrale, presenta diverse limitazioni. Infatti in OpenGL i modelli standard di lighting and shading sono dei semplici modelli, dove questa tecnica può essere solo applicata ad una singola iterazione tra sorgenti luminose e oggetti presenti nella scena (*local-illumination*). Come conseguenza, si ha che la scena modellata non sarà indistinguibile dalla scena reale ma avrà solamente una corretta riproduzione colorimetrica [8].

Naturalmente se si vuole raggiungere un grado di accuratezza maggiore bisogna integrare una corretta



rappresentazione colorimetrica, con i modelli che simulano in modo accurato le caratteristiche fisiche della scena (*global-illumination*)^[8]. In relazione a questa esigenza c'è un forte dibattito dove efficienza e accuratezza molto spesso entrano in contrasto tra loro. Infatti da una parte abbiamo molti algoritmi *global-illumination* che usano informazione spettrale, perchè viene dato maggiore peso all'accuratezza rispetto all'efficienza, ma dall'altro lato abbiamo esattamente l'opposto, efficienza a scapito dell'accuratezza, dove l'informazione spettrale non viene usata.

Ognuno dei modelli esposti sopra, per avere una più accurata rappresentazione colorimetrica, può essere adottato in congiunzione con un modello di *global-illumination*^[8].

Ward e Vileschin^[11] discutono le barriere nell'usare una completa costruzione della curva spettrale nei pacchetti di rendering commerciali, presentando una soluzione semplice quanto mai ovvia. Infatti introducono il termine di *spectral prefiltering*, che consiste nel calcolare i valori CIE XYZ per ogni colore, delle superfici della scena, sotto l'illuminante dominante e trasformarli nello spazio RGB, tenendo conto di un opportuno bilanciamento del bianco. Inoltre mostrano come adottando lo spazio colore *Sharp RGB* si possa migliorare la qualità, in termini colorimetrici, dei colori della scena riprodotti, rispetto all'utilizzo dello spazio colore sRGB. La soluzione presentata è ovvia semplicemente per due ragioni. Primo, il bilanciamento al bianco di riferimento è una operazione base utilizzata in Color Science per catturare la corretta riproduzione dei colori su di un sistema con differente bianco di riferimento, inoltre questa operazione è suggerita dalla stessa CIE. Questa operazione era spesso posticipata, alla fine del processo di rendering, prima

di visualizzare l'immagine sul display, Ward e Vileschin^[11] hanno solo anticipato l'uso di questa operazione. Secondo è ovvio che l'uso dello spazio colore *Sharp RGB* avendo una gamma cromatica più ampia dello spazio colore sRGB permette di archiviare migliori risultati.

Ci sono altri aspetti, non di minor importanza, che devono essere presi in considerazione in Computer Graphics. Pensiamo solo ad immagini che contengano valori di illuminanza elevati, come ad esempio quelli che possiamo trovare in fotografia o in scene del mondo reale. Queste immagini vengono chiamate immagini ad elevato range dinamico o brevemente *HDR*, con le quali si ha a che fare tutte le volte che si voglia riprodurre un qualcosa che possa essere il più realistico possibile. Infatti in Computer Graphics esistono molti pacchetti di rendering che permettono di generare immagini di questo tipo. A questo punto sorgono due problemi complessi, che possono essere enunciati con la seguente domanda: "Come rappresentare l'informazione di queste immagini e come visualizzarle sui dispositivi di output, i quali sono caratterizzati nell'avere un limitato range dinamico, senza perdere troppa informazione?"

In Computer Graphics si è lavorato a lungo negli ultimi dieci anni per dare una risposta ad entrambi i problemi. Nelle due sezioni successive verrà data una breve descrizione delle soluzioni proposte ed utilizzate fino ad ora.

➤ High Dynamic Range

Un'immagine HDR è un'immagine in cui sono presenti valori di luminanza che sono contenuti

nell'intero range di luce presente in natura. Queste immagini diventano importanti quando si vuole rappresentare un qualcosa che simuli ciò che un osservatore vede nel mondo reale. Molti pacchetti di rendering non sono in grado di generare immagini di questo tipo e codificano l'immagine nel classico spazio colore RGB, 24-bit, con 8-bit per ogni colore primario. In questo caso abbiamo un vantaggio non è necessario una operazione di mappatura nel ristretto range dinamico del display, che va sotto il nome di *Tone Mapping*, in particolare se entrambi, il software di rendering e il display, adottano lo standard sRGB^[12]. Ma nel caso si renda necessario l'uso di questo tipo di immagini, e non si introducano soluzioni differenti, si avrebbe una rappresentazione colorimetrica completamente sbagliata.

Una possibile soluzione a questo problema è usare una rappresentazione in floating-point dello spazio colore. Ma questo ha lo svantaggio di occupare troppo spazio, circa 96-bit per pixel, e come conseguenza avremmo troppa informazione da salvare su disco o da trasferire attraverso la rete. Ma esistono altri metodi, che si basano su alcune caratteristiche del SVU, che sono compatti e sufficientemente accurati. Questi metodi usano al massimo 32-bit per pixel, avendo così un notevole risparmio di spazio rispetto alla rappresentazione floating-point.

Quindi una volta che un'immagine HDR è stata generata, deve essere rappresentata in uno spazio colore indipendente dal dispositivo, che non occupi tanto spazio e che permetta di ottenere una superiore qualità dell'immagine qualunque sia il dispositivo di destinazione su cui venga rappresentata^[12].

Esistono diversi modelli per fare questo: *RGBE*, *Pixar*, *LogLuv*. Il modello *RGBE* (Red-Green-Blue-Exponent) utilizza 32-bit per pixel per catturare l'elevato range dinamico, ed è utilizzato in un famoso pacchetto di rendering che va sotto il nome di *Radiance*. Pixar invece usa 33-bit per pixel RGB nello spazio logaritmico. Anche questo è usato in un'altro pacchetto di rendering chiamato *REYES*. L'ultimo modello è il formato *LogLuv* che permette di catturare 5 ordini di magnitudine dell'intera gamma del visibile con soli 24-bit per pixel. La versione a 32-bit per pixel permette di catturare 38 ordini di magnitudine. Questo formato combina una rappresentazione logaritmica della luminanza, con una rappresentazione lineare delle cromaticità CIE [12]. Solo il formato *LogLuv* è in grado di coprire l'intero range dinamico dei colori percepibili. Infatti il formato *RGBE* è vero che ricopre un vasta parte dell'elevato range dinamico, ma è ristretto solo ai valori RGB positivi. Anche il formato *Pixar* è ristretto al gamut RGB e copre solo 3.8 ordini di magnitudine che sono marginali per rappresentare per la percezione umana [12].

➤ Tone Mapping

L'introduzione di immagini HDR ha introdotto il problema di come rappresentarle su di un dispositivo di output che ha un ristretto range dinamico rispetto a quello dell'immagine stessa. Questa operazione di mappatura va sotto il nome di *Tone Mapping*. In altre parole con *Tone Mapping* si vuole mappare l'elevato range dinamico dell'immagine nel ristretto range dinamico del

dispositivo di output cercando di perdere meno informazione possibile.

Possiamo vedere la tecnica di *Tone Mapping* anche in un'altro modo: riprodurre le stesse sensazioni visive dell'osservatore della scena originale sull'osservatore della scena riprodotta [13].

Gli aspetti importanti di questa operazione sono molteplici: *contrasto*, *visibilità*, *comportamento del SVU*. Vediamo ora in dettaglio i singoli aspetti.

Riprodurre la visibilità vuol dire rendere visibile un oggetto nella scena riprodotta se e solo se è visibile pure nella scena originale. Ma la riproduzione della visibilità non è sufficiente a garantire la corretta riproduzione della percezione umana. Infatti si rende necessario anche riprodurre l'esperienza soggettiva prodotta dalla visione della scena. Questa può essere catturata simulando correttamente il contrasto, la distribuzione dei toni e la riproduzione colorimetrica.

Il comportamento del SVU risulta per molti aspetti ancora sconosciuto, ma nonostante questo aspetti importanti come: *adattamento*, *difetti visuali*, sono ben noti. Infatti in questi ultimi anni, in *Computer Graphics*, si è percorsa la strada di simulare gli aspetti conosciuti del SVU per riprodurre l'apparenza visuale della scena modellata [14] [15] [16] [17] [18]. Ad esempio aspetti come i tre fondamentali tipi di adattamento del SVU: *Light*, *Dark* e *Chromatic adaptation* [13] sono stati ben studiati e simulati. Un'altro aspetto importante, che ci permette di riprodurre l'adattamento del SVU il più possibile a quello che un essere umano ha nella realtà, è costituito dal fatto che il SVU ha bisogno di tempo per adattarsi alle nuove condizioni di illuminazione. In altre parole l'adattamento non è immediato. Basti pensare a quando per esempio passiamo da una situazione con un basso livello di illuminazione ad

un'altra situazione con un livello di illuminazione superiore al precedente. Prima di vedere chiaramente i dettagli e i colori degli oggetti nella scena abbiamo bisogno di tempo. Questo processo prende il nome di *Time Dependency* [17] [18].

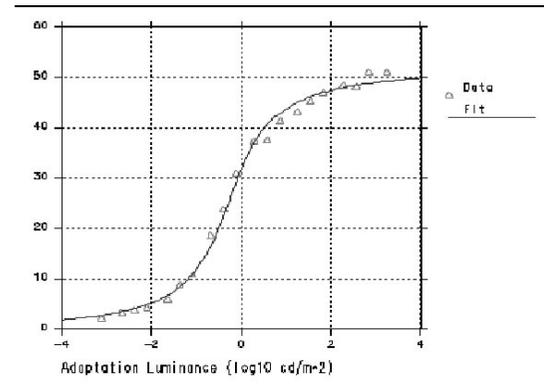


Fig. 7 Curva ottenuta sperimentalmente da Shaler, che mette in relazione la visual acuity con la luminanza [16].

Bisogna tenere conto anche di un'altro aspetto importante, legato al SVU, che si ha quando si presentano certe condizioni ambientali. In questo caso il SVU ne è influenzato; questo genera una serie di difetti la cui simulazione può aiutare nel ricostruire il suo corretto funzionamento.

Questo avviene, ad esempio, quando si è in particolari condizioni di illuminazione. Infatti livelli troppo bassi di illuminazione riducono la capacità del SVU di vedere i dettagli fini degli oggetti [16]. Questo fenomeno è chiamato *visual acuity* e in Figura 7 è mostrata la curva, ottenuta sperimentalmente da Shaler, che presenta il comportamento del SVU in funzione del livello di illuminazione. Il SVU, con

livelli bassi di illuminazione presenta un'altro limite chiamato *color sensitivity*. Questo limite riduce la capacità del SVU di discriminare i colori degli oggetti della scena.

Un'altro deficienza del SVU é quel fenomeno che va sotto il nome di *glare*. Il glare consiste in una serie di fenomeni generati all'interno del SVU quando si guarda direttamente una sorgente luminosa [15]. Questi fenomeni provocano una riduzione di contrasto della scena, e una riduzione della visibilità degli oggetti vicini alla sorgente luminosa. Tutto questo porta alla modifica dell'apparenza visuale della scena osservata.

➤ Conclusioni

In questo articolo è stata presentata una visione completa di come il colore rappresenta una componente importante in un'area come quella della Computer Graphics. Si sono volute mettere in evidenza le problematiche e le soluzioni proposte attraverso tutto il processo che porta alla visualizzazione finale dell'immagine su di un dispositivo di output.

Naturalmente, ci sono ancora molti quesiti a cui si deve rispondere e primo fra tutti é quello di riprodurre completamente e correttamente il funzionamento del SVU. Ma rispondere a questo quesito risulta veramente complesso per due motivi. Primo, siamo ancora lontani nel conoscere come realmente funziona, anche se si sono fatti passi da giganti permettendoci di individuare i suoi aspetti fondamentali. Secondo, come integrare tutti gli aspetti del SVU cercando di rispondere all'esigenza

della riduzione dei costi computazionali. A prima vista tutto questo può sembrare slegato dal contesto, ma in realtà non è così. Basti pensare di riprodurre il processo di adattamento del SVU, che si è visto nella sezione precedente, il quale richiede tempo prima di arrivare allo stato finale di adattamento. Sarebbe interessante essere in grado di riprodurre in tempo reale questo comportamento. A questo punto si presenta un secondo quesito, non meno importante del primo, come cercare di integrare tutte queste funzionalità che ci permettono di simulare meglio una scena reale, senza intaccare i costi computazionali.

In altre parole permetterci di realizzare applicazioni in tempo reale che siano in grado di simulare la scena reale. Questa rappresenta un'area di sicuro interesse che offre diversi spunti di discussione, e in questo momento in Computer Graphics si cerca sempre di più di integrare l'efficienza, in termini di costi computazionali, con l'accuratezza, in termini di capacità di simulare la scena reale, poichè questo è richiesto dal mercato.

➤ Bibliografia

- [1] Frova A., *Luce, colore e visione*, Editori Riuniti, 1984.
- [2] Agoston G. A., *Color theory and its application in art design*, Springer-Verlag, 1979.
- [3] Hunt R. W. G., *Colorimetry*, IBA Technical Review, n. 22, pp. 16-27, Novembre 1984.
- [4] Hunt R. W. G., *Measuring Color*, Jhon Wiley & Sons, 1987.
- [5] Taylor J. R., *Color spaces: language and framework for color*, Final Program and Proceedings of the First IS&T and SID's Color Imaging Conference: Transforms & Transportability of Color, pp.6-11, 7-11 Novembre 1993.
- [6] Travis D., *Effective color display: theory and practice*, Academic Press, 1991.
- [7] Wyszecky G. e Stiles W. S., *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae*, Jhon Wiley & Sons, 1982.
- [8] Garret M.J., Fairchild M.D., *Full-Spectral Color Calculations in Realistic Image Synthesis*, IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 1-7, 1999.
- [9] Meyer G. M., *Wavelength Selection for Synthetic Image Generation*, Computer Vision Graphics and Image Generation, Vol. 41, No. 1, pp. 57-79, 1988.
- [10] Peercy M. S., *Linear Color Representation for Full-Spectral Rendering*, Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH 93) ACM Press, Vol. 27, pp. 191-198, New York 1993.
- [11] Ward G., Vileshin E. E., *Picture Perfect RGB Rendering Using Spectral Prefiltering and Sharp Color Primaries*, Proceedings Eurographics Workshop on Rendering, pp. 117 - 124, 2002.
- [12] Ward G., *High Dynamic Range Imaging*, <http://positron.cs.berkeley.edu/~gwlarson/pixformat/>.

[13] Marini D., Artusi A. Rizzi A., *Il Problema della Rappresentazione dell'Immagine nell'Ambito dei Beni Culturali*, Comunicazione Multimediale per i Beni Culturali a cura di M. Rossi e P. Salonia - Editore Addison Wesley, 2002.

[14] Ferweda J. A., Pattanaik S. N., Shirley P., Greenberg D. P., *A Model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis*, Proceedings ACM SIGGRAPH'96, pp. 249 - 258, 1996.

[15] Spencer G., Shirley P., Zimmerman K., Greenberg D., *Physically-Based Glare Effects for Computer Graphics*, Proceedings ACM SIGGRAPH'95, pp. 325-334, 1995.

[16] Ward G., Rushmeier H., Piatko C., *A Visibility Matching Tone reproduction Operator for High dynamic Range Scenes*, IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, pp. 291 - 306, 1997.

[17] Pattanaik S. N., Tumblin J. E., Yee H., Greenberg D. P., *Time-Dependent Visual adaptation for realistic Real-Time Image Display*, Proceedings ACM SIGGRAPH'00, pp. 47 - 54, 2000.

[18] Durand F., Dorsey J., *Interactive Tone Mapping*, Eurographics Workshop on Rendering, pp. 219 - 230, 2000.

➤ Alessandro Artusi

Laureatosi in Scienze dell'Informazione nel Dicembre 1997 presso l'Università Statale di Milano. Dal Settembre 2000, sta svolgendo la sua attività di dottorato di ricerca presso l'Institute of Computer Graphics and Algorithms dell'Università Tecnologica in Vienna Austria, nell'ambito di diversi progetti europei: PAVR, Real Reflect.

Dal 1998 ad oggi ha preso parte a numerosi progetti di ricerca nazionali ed internazionali, tra cui: Progetto Italiano Tema 4 Nuove Tecnologie per la Stampa Tessile, Progetti Europei PAVR e Real Reflect, Progetto Austriaco Real Time Rendering of Urban Environments.

La sua attività di ricerca riguarda differenti aree come: color science, neural networks, realistic visualization (Tone mapping), real-time visualization ecc.

