

Tecniche di visualizzazione stereoscopica basate sulla frequenza: anàglifo e Infitec



ing. Mario **Muratori**

Rai
Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica
Torino

1. Introduzione

Uno dei principali problemi della stereoscopia consiste nella difficoltà di veicolare all'occhio corretto il rispettivo canale in fase di visualizzazione.

Nel caso di stereoscopia "tradizionale"^{Nota 1} si dà per scontato il tipo di ripresa - con una coppia di telecamere affiancate - e si assume che in qualche modo si possa alimentare l'apparato di visualizzazione con la coppia di segnali stereoscopici^{Nota 2} - eventualmente prelevandola da un canale trasmissivo.

Nota 1 - Qui si indica con l'aggettivo "tradizionale" la stereoscopia basata su una coppia di immagini fisse o in movimento, in contrapposizione ad altre forme più evolute di stereoscopia, in particolare quella basata sull'integral imaging.

Nota 2 - Oppure, in alcuni sistemi, con un segnale video e una mappa di profondità che, in linea di principio, si possono ricavare relativamente facilmente dalla coppia di segnali stereoscopici.

Sommario

Uno dei primi metodi introdotti per la visualizzazione stereoscopica con sovrapposizione delle immagini fu l'anàglifo.

La tecnica si adatta bene alle tecnologie di stampa a colori e fu largamente adottata durante il boom della fotografia della fine del 1800.

L'anàglifo è stato utilizzato in seguito anche alla cinematografia e vi sono proposte recenti anche su DVD; di conseguenza vi furono tentativi di applicarlo anche alla televisione. In questo caso, però, mostra evidenti limiti che ne hanno fortemente limitato ogni prospettiva, confinandolo ad iniziative promozionali o sperimentali.

La tecnica denominata col marchio registrato di Infitec sfrutta anch'essa, in modo molto ingegnoso, la frequenza della luce, ottenendo un sistema di elevatissime prestazioni proposto soprattutto per presentazioni visive di qualità.

Al contrario, le tecniche di visualizzazione sono numerose, ognuna caratterizzata da fattori positivi e fattori negativi. Nessuna si impone in assoluto per le sue qualità, alcune si adattano meglio di altre alla configurazione di visione^{Nota 3}, altre sono invece decisamente poco utilizzate^{Nota 4}.

Normalmente si visualizzano i due canali sovrapposti spazialmente [1], quindi il problema consiste nel separare i due segnali prima che giungano all'occhio dell'utente.

Alcuni metodi si basano su tecniche "sistemistiche", per esempio moltiplicando nel tempo i due segnali e separandoli con occhiali *shutter*, le cui lenti diventano trasparenti od opache in sincronia con il segnale visualizzato. Altre tecniche si basano sulle proprietà della luce, in particolare la polarizzazione o la frequenza^{Nota 5}.

In questo articolo si descrivono due tecniche basate sulla frequenza della luce: il metodo dell'*anàglifo* e la tecnica denominata *Infitec*TM.

2. Anàglifo

2.1. Generalità

Il termine deriva dal tardo latino *anaglyphus*, a sua volta derivato dal greco $\alpha\nu\alpha\text{-}\gamma\lambda\upsilon\phi\omicron\sigma$, cesellato.

Secondo il Perucca, la dizione corretta è: *metodo degli anàglifi*. Si tratta di un metodo per l'osservazione di immagini stereoscopiche basato sull'impiego di *colori complementari* [2]: le due immagini costituenti la coppia stereoscopica sono colorate con colori complementari, ad esempio rosso e ciano.

Osservandole contemporaneamente con occhiali aventi come lenti dei filtri colorati^{Nota 6} - corrispondenti ai colori usati per le immagini, nell'esempio sopra: rosso e ciano - ogni occhio vede solo l'immagine colorata con lo stesso colore del filtro postogli di fronte, mentre il colore complementare viene annullato (visto come nero) poiché

assorbito dal filtro. In questo modo si riesce a far pervenire a ciascun occhio l'immagine corrispondente, separando le due componenti stereoscopiche.

La visione stereoscopica si ottiene perché la funzionalità della fusione sensoriale, operata dal cervello e fondamentale per il riconoscimento degli oggetti, si basa principalmente sul riconoscimento delle forme, che vengono riconosciute anche se hanno colori falsati.

La percezione del rilievo invece deriva dalla stereopsi, ossia dall'interpretazione delle diffe-

Nota 3 - Le tecniche a proiezione sono preferibili in caso di multiutenza in grandi sale, p.es. cinema. Alcuni sistemi autostereoscopici non permettono la visione multiutente, quindi sono più adatti alla visualizzazione di dati che all'uso televisivo.

Nota 4 - Le tecniche oggi più diffuse sono basate sulla polarizzazione della luce e sulla moltiplicazione nel tempo con occhiali attivi (*shutter*). Gli HDM (Head Mount Display) sono utilizzati solo in applicazioni di nicchia soprattutto per il costo e la modalità di uso monoutente. I display autostereoscopici incontrano ancora difficoltà tecniche di realizzazione [7]. I sistemi basati su anàglifo e tecnica Infitec sono trattati nel seguito dell'articolo.

Nota 5 - Si noti che l'ampiezza dell'onda elettromagnetica costituente la luce supporta l'informazione di luminosità del pixel, mentre l'occhio è insensibile alla fase della luce incidente. Pertanto questi due parametri non possono essere utilizzati per discriminare i due canali della coppia stereoscopica.

Nota 6 - Un filtro ottico è uno strumento che trasmette selettivamente la luce con particolari proprietà (una particolare lunghezza d'onda, una gamma di colore o di luce), bloccando invece le rimanenti. Sono comunemente usati in fotografia e in molti strumenti ottici. I filtri ad assorbimento sono di solito fabbricati in vetro a cui sono stati aggiunti vari materiali inorganici o organici. Questi componenti assorbono alcune lunghezze d'onda della luce lasciandone passare altre. A volte si utilizzano materiali plastici (per esempio policarbonato o acrilico) per produrre filtri di gel, più leggeri e meno costosi di quelli vitrei.

renze tra le due immagini dovute alle differenti viste prospettiche, che sono visibili grazie alla separazione tra i canali operata dai filtri di cui sono equipaggiati gli occhiali.

Si noti che assieme alla fusione sensoriale si verifica anche una “fusione colorimetrica”: i colori percepiti dai due occhi si sommano ottenendo una riproduzione del colore per sintesi additiva. Per questo motivo è possibile utilizzare coppie formate da immagini mancanti di colori primari (il verde ed il blu nel canale colorato di rosso, il rosso nell’altro), ottenendo come risultato complessivo una resa colorimetrica relativamente accettabile, ancorché obiettivamente non ottimale.

2.2. La produzione di immagini anàglife

Il metodo classico per produrre un anàglifo consiste nel riprendere la scena con una coppia di mezzi di ripresa appaiati, posti ad una certa distanza tra loro, filtrare con filtri opportunamente colorati le due immagini, sovrapponendole in fase di stampa o di visualizzazione in modo da evidenziare le disparità orizzontali derivanti dal parallasse di ripresa.

In linea di principio, il filtraggio colorimetrico può essere effettuato in qualsiasi fase del processo: dalla ripresa alla fase di visualizzazione o stampa; in genere, quando le immagini vengono elaborate al computer con appositi applicativi, per esempio per realizzare ritocchi, filtri, effetti, composizioni e così via, risulta conveniente effettuare il filtraggio in questa fase, in quanto gli applicativi più evoluti hanno gli strumenti necessari per ottenere anàglifi (layer, regolazione dei livelli dei primari, ecc.).

Anticamente si utilizzavano solamente le coppie di primari rosso-verde o rosso-blu. In questo modo la riproduzione del colore era di scarsa qualità, perché con due soli primari non si può riprodurre una gamma di colori sufficiente.

Attualmente si preferisce invece adottare la coppia di colori complementari rosso-ciano; la complementarietà di questi due colori permette

una migliore reiezione di quello indesiderato; inoltre il ciano è composto dai due primari verde e blu, quindi complessivamente si utilizzano tutti i tre primari ottenendo una migliore resa colorimetrica, in particolare sull’incarnato.

In genere l’immagine sinistra è filtrata per rimuovere il blu e il verde: rimane il rosso che attraversa il filtro rosso (che negli occhiali per anàglifo è posto davanti all’occhio sinistro). L’immagine destra è filtrata per rimuovere il rosso: rimangono le componenti blu e verdi che attraversano il filtro ciano.

2.3. La visualizzazione

Per la visualizzazione degli anàglifi si utilizzano occhiali dotati di filtri colorati; in figura 1 si riporta una tipica caratteristica in frequenza per il filtro rosso e quello blu.

Davanti all’occhio sinistro si trova un filtro rosso, davanti a quello destro sono stati utilizzati filtri di diverso colore a seconda degli orientamenti del periodo: nel passato si sono adottati filtri verdi oppure blu, oggi giorno è preferito un filtro di colore ciano capace di far passare le componenti sia blu che verdi (figura 2).

Gli occhiali più semplici, equipaggiati con semplici filtri di gelatina, non compensano la differenza

Fig. 1 – Caratteristiche spettrali di filtri colorati blu e rosso (fonte: [3]).

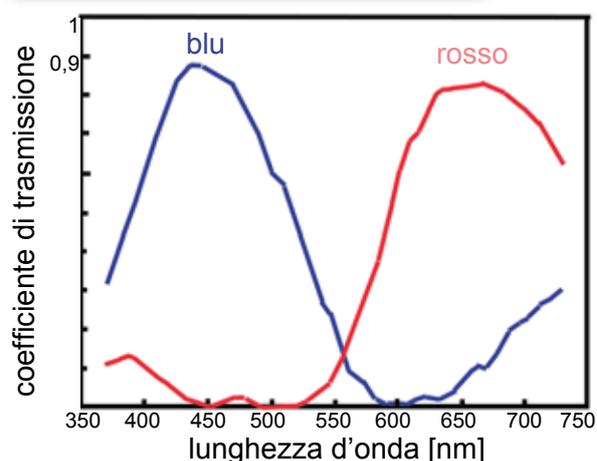




Fig. 2 – Occhiali per per la visualizzazione degli anàglifi.



Fig. 4 – Occhiali di tipo anachrome.
(fonte: sito en.wikipedia.org/wiki/Anaglyph_image)

di lunghezza focale, pari a 250 nm, tra il rosso e il ciano. Nei sistemi ottici tale differenza provoca la distorsione chiamata aberrazione cromatica^{Nota 6} (figura 3).

In stereoscopia l'effetto è che l'immagine sinistra, colorata di rosso, appare sfocata rispetto a quella destra – che normalmente è dominante relativamente alla messa a fuoco.

Tecniche migliorative

I filtri di maggiore spessore e di materiale opportuno^{Nota 7} possono essere prodotti in modo da fungere da lenti con una potenza ottica di valore tale da compensare l'aberrazione cromatica.

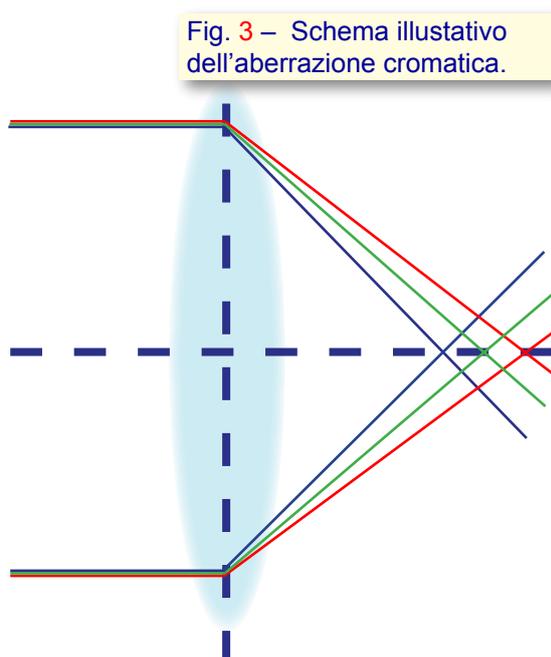


Fig. 3 – Schema illustrativo dell'aberrazione cromatica.

Normalmente si adotta una diottria pari a +1/2 sulla lente rossa; in tal modo però si ingrandisce leggermente l'immagine sinistra, introducendo un'altra distorsione potenzialmente fastidiosa.

Un altro tipo di ottimizzazione consiste nell'adottare un filtro ciano che permetta anche il passaggio di una piccola percentuale di rosso per migliorare la resa cromatica dell'incarnato; ovviamente il filtraggio effettuato sulle immagini ne deve tenere conto.

In una variante denominata anachrome, oltre ad adottare il filtro ciano modificato (figura 4),

Nota 6 - In ottica, l'aberrazione cromatica è un difetto nella formazione dell'immagine dovuta al diverso valore di rifrazione delle diverse lunghezze d'onda che compongono la luce che passa attraverso il mezzo ottico. In pratica succede che per radiazioni policromatiche le componenti con lunghezza d'onda più corta (blu) vengono rifratte maggiormente rispetto a quelle con lunghezza d'onda più lunga creando una dispersione dell'immagine sul piano focale. Questo effetto è particolarmente fastidioso nei microscopi e nei telescopi. L'aberrazione cromatica viene corretta, ma non del tutto eliminata, utilizzando un sistema ottico composto da lenti multiple di materiali a diversa dispersione in modo che le differenze tra gli angoli di rifrazione per la stessa lunghezza d'onda si annullino tra loro (sistemi ottici acromatici).

Nota 7 - Vi sono diversi materiali plastici trasparenti e con proprietà ottiche notevoli; si segnalano, come esempio, il polimetilmetacrilato (Plexiglas), infrangibile e più trasparente del vetro, e il policarbonato, usato nelle lenti infrangibili per occhiali.

in fase di stampa viene limitata anche l'entità delle disparità orizzontali in modo che il bordo degli oggetti appaia solo leggermente sdoppiato, ottenendo delle immagini quasi compatibili 2D (appaiono come piccoli difetti di allineamento di stampa), ma riducendo in proporzione l'effetto prospettico.

In [3] è descritto un metodo matematico di ottimizzazione volto ad ottenere l'immagine anàglifa migliore possibile dal punto di vista percettivo, operando sia sul filtraggio colorimetrico che sulla composizione delle due componenti filtrate.

Il metodo tiene conto delle caratteristiche spettrali dei filtri degli occhiali e dell'emissione delle sorgenti luminose costituenti i pixel del display, nonché delle curve di sensibilità dell'occhio medio in funzione della frequenza.

A detta dell'Autore, tale processo di ottimizzazione dà risultati migliori rispetto ai metodi empirici descritti in precedenza. Tuttavia sembra piuttosto specifico per il display considerato e quindi non appare direttamente utilizzabile in campo televisivo dove non si possono imporre limiti troppo stringenti sul display da utilizzare.

2.4. Evoluzione e applicazioni non televisive

Gli inizi

Nel 1853, W. Rollman per primo illustrò la tecnica dell'anàglifo usando disegni colorati in blu e rosso (su fondo nero) e degli occhiali con lenti degli stessi colori.

Nel 1858 Joseph D'Almeida incominciò a proiettare immagini con la lanterna magica, usando filtri rossi e verdi.

Louis Ducas du Hauron^{Nota 8} fu il primo, nel 1891, ad ottenere anàglifi stampati. Il suo metodo consisteva nello stampare sullo stesso foglio due negativi, uno colorato di blu o verde e l'altro di rosso.



Fig. 5 – Immagine stereoscopica generata col metodo degli anàglifi; il canale sinistro (per l'occhio sinistro) è colorato in rosso, quello destro in ciano.

La produzione iconografica recente

Recentemente, immagini stereoscopiche in anàglifo hanno avuto una certa diffusione in Internet, su CD e in stampa, risultando relativamente gradevoli alla vista.

Ciò anche grazie ai filtri adottati (rosso - ciano), che permettono di utilizzare tutti e tre i primari colorimetrici e quindi offrono una migliore riproduzione del colore, soprattutto delle tonalità della pelle (incarnato), rispetto alle coppie di filtri rosso-blu e rosso-verde usati in passato.

Nota 8 - Louis Ducas Du Hauron (1837-1920) fu uno scienziato francese che diede importanti contributi allo sviluppo della fotografia a colori. Nel suo libro "Les Couleurs en Photographie" (1869) propose il metodo sottrattivo per la fotografia a colori. Al tempo le sue teorie non vennero messe in pratica per la mancanza di materiali adatti, ma sono alla base delle moderne tecniche fotografiche. Nel 1891 brevettò il metodo degli anàglifi per la fotografia stereoscopica. Fu premiato nel 1900 con la "Progress Medal" dalla Royal Photographic Society per il suo lavoro nel campo della fotografia a colori.

Molto interesse, anche per la novità del contenuto, hanno suscitato le immagini di Marte diffuse dalla NASA (figura 6).

La cinematografia stereoscopica a metà del XX secolo

Nel periodo 1952-1954 i film stereoscopici ebbero una certa fortuna con più di trenta titoli distribuiti in tutto il mondo, anche se successivamente furono soppiantati dal sistema Cinemascope a grande schermo.

Tuttavia, secondo la documentazione reperita, la quasi totalità di tali film era proiettata con la tecnica della proiezione con luce polarizzata e non in anàglifo.

L'interesse per i film stereoscopici risorse più volte durante gli anni '60, '70 e '80 grazie a semplificazioni nella tecnica di proiezione, in particolare con i sistemi SpaceVision, usato da Oboler^{Nota 9}, e Stereovision utilizzato da Silliphant^{Nota 10} che utilizzavano un solo proiettore. In ambedue i casi si trattava ancora, però, di sistemi basati sulla polarizzazione della luce.

Quest'ultimo rimase il formato principale per la cinematografia stereoscopica fino all'avvento dell'IMAX, nella cui versione stereoscopica (IMAX-3D), peraltro, non si adotta la tecnica anàglifa^{Nota 11}.

La cinematografia recente

Nel 2003, il film Spy Kids 3D basato sulla tecnica degli anàglifi ebbe un buon successo commercia-

le nei cinema. Al contrario, nel 2005, il film The Adventures of SharkBoy & LavaGirl, realizzato anch'esso in anàglifo dagli stessi creatori di Spy Kids, non riuscì a coprire gli investimenti.

Per confronto, nello stesso periodo i film basati su tecnica polarizzata incontrarono maggior successo di pubblico e commerciale; si citano ad esempio Chicken Little della Disney del 2005 e diversi film in formato IMAX tra cui Polar Express del 2004.

Nota 9 - Arch Oboler (1909-1987), famoso per le sue opere radiofoniche, nel 1960 produsse, scrisse e diresse il film Fantastic Invasion of Planet Earth 3-D, per la proiezione del quale utilizzò la tecnica chiamata SpaceVision che richiedeva un solo proiettore (anziché una coppia) ed era basata sulla polarizzazione della luce. Nel 1952 scrisse, produsse e diresse il film Bwana Devil, considerato il primo film stereoscopico a colori prodotto negli Stati Uniti, proiettato con la tecnica chiamata Natural Vision, basata su due pellicole.

Nota 10 - Allan Silliphant scrisse, produsse e diresse il film The Stewardesses (1969, 1971; www.thestewardesses.com) che fu il film tridimensionale ad ottenere il maggior guadagno della storia (forse anche perché conteneva contenuti sessuali rilevanti per il tempo, essendo classificato come "softcore"). Il film fu girato in pellicola 35mm e proiettato con un formato speciale chiamato Stereovision sviluppato dalla Stereovision International, azienda dello stesso Silliphant. La visualizzazione avveniva con tecnica a luce polarizzata e non fu mai proiettato in anàglifo.

Nota 11 - Nei cinema IMAX-3D si utilizzano sistemi a polarizzazione e a multiplazione temporale.

Fig. 6 – Immagine della superficie di Marte in anàglifo. (fonte: [sito mars.jpl.nasa.gov/MPF/mpf/anaglyph-arc.html](http://sito.mars.jpl.nasa.gov/MPF/mpf/anaglyph-arc.html))



Da quanto emerge dalla documentazione reperita, sembrerebbe che si possano sintetizzare le vicende del mercato cinematografico sostenendo che la tecnica con luce polarizzata, migliore dal punto di vista tecnico, è preferita nei cinema, dove la maggior complessità sistemistica e logistica (uso di proiettori speciali o accoppiati, gestione degli occhiali equipaggiati con filtri polarizzatori) non rappresenta un grosso problema, mentre il metodo dell'anàglifo è preferito per l'home cinema, dove l'esigenza di ridurre i costi e l'assenza di apparati specifici rappresentano forti limitazioni.

2.5. Anàglifo e televisione

La tecnica anaglifica, anche se non è compatibile con la televisione bidimensionale "normale" per via dello sdoppiamento delle immagini colorate, sembrerebbe relativamente adatta all'uso televisivo poiché richiede un solo canale trasmissivo: viene quindi evitata l'esigenza di maneggiare due canali (eventualmente sincronizzati), cosa necessaria invece in altre tecniche stereoscopiche, nonché il dimezzamento della frequenza di quadro e le difficoltà nel ricavare la sincronizzazione per gli occhiali attivi richiesti dalla tecnica field-sequential.

Tuttavia le trasmissioni sperimentali finora effettuate a più riprese da diversi operatori non hanno avuto una buona accoglienza presso il pubblico.

Ciò sembrerebbe dovuto principalmente al fatto che in tutti i sistemi televisivi utilizzati per la trasmissione e la registrazione, DVD compresi, i segnali di crominanza vengono filtrati, e in certi sistemi piuttosto notevolmente, riducendone la definizione. Ricostruendo l'immagine a partire da tali segnali la definizione complessiva non è elevata e questo può degradarne la qualità soggettiva.

La scarsa fedeltà nella riproduzione del colore e la non elevata saturazione riducono ulteriormente la qualità soggettiva al punto che tale tipo di visualizzazione non gode di elevato gradimento da parte dell'utenza.

La sperimentazione svolta presso il Centro Ricerche

Presso il Centro Ricerche Rai è sorta l'esigenza di mostrare l'effetto reale delle problematiche sopra esposte.

Pertanto si è sviluppato un programma software per la generazione di una sequenza anàglifa a partire da una coppia stereoscopica^{Nota 12}. L'algoritmo prevede:

- una trasformazione lineare per rappresentare i segnali nel dominio dei primari colorimetrici RGB
- il filtraggio colorimetrico
- la combinazione delle due sequenze filtrate in un'unica sequenza anàglifa
- una nuova trasformazione lineare per rappresentare i segnali nel formato YC_rC_b (luminanza e crominanza) adottato per la visualizzazione.

Si noti che le ultime due operazioni si possono commutare.

Il filtraggio adottato è molto semplice e consiste nell'annullare il contributo dei primari non voluti nel canale preso in considerazione. Ciò corrisponde ad applicare una coppia di filtri - del tipo passa basso per il rosso e passa alto per il ciano - caratterizzati da una attenuazione nulla in banda passante, attenuazione infinita in banda attenuata e con la banda di transizione ricadente completamente nella banda compresa tra il verde ($\lambda=550$ nm circa) ed il rosso ($\lambda=650$ nm circa).

Tale tipo di filtraggio è senz'altro rozzo in confronto al metodo di ottimizzazione descritto in [3], ma si ritiene che tale ottimizzazione migliori la resa colorimetrica, mentre in campo televisivo i maggiori problemi nascono dal filtraggio delle

Nota 12 - I segnali televisivi sono disponibili in formato digitale, il che permette di effettuare agevolmente elaborazioni tramite calcolatore elettronico.

componenti cromatiche e sono questi gli artefatti che ci si propone di evidenziare.

Analisi dell'algoritmo

Anche se il segnale televisivo a colori è generato sotto forma delle tre componenti relative ai tre primari colorimetrici (rosso R, verde G, blu B), normalmente i segnali televisivi sono memorizzati ed elaborati nel formato "luminanza più due segnali di cromatiche", dove questi ultimi sono filtrati per limitarne la banda e sottocampionati.

Per questo lavoro si è adottato il formato ritenuto il massimo della qualità per le normali utilizzazioni^{Nota 13}, che è quello definito dalla raccomandazione ITU-R BT.601-5 [4] in cui si prevede che i segnali di cromatiche siano sottocampionati di un fattore due rispetto al segnale di luminanza^{Nota 14}.

Nella stessa raccomandazione si riportano anche le matrici di conversione tra il dominio RGB e il formato $Y C_r C_b$, che rappresentano semplici trasformazioni lineari interpretabili come un cambio di sistema di riferimento colorimetrico. In notazione matriciale, la trasformazione si può rappresentare nel modo seguente:

$$(1) \quad [Y C_r C_b]^T = [M] [R G B]^T$$

Dove:

- $[Y C_r C_b]^T$ rappresenta il segnale video nelle tre componenti luminanza più cromatiche.
- $[M]$ è la matrice di trasformazione tra dominio RGB e formato $Y C_r C_b$ riportata in [4], comprensiva delle necessarie normalizzazioni
- $[R G B]^T$ rappresenta il segnale video nelle tre componenti relative ai primari colorimetrici R, G e B.

La matrice $[M]$ è invertibile: pertanto il segnale è trasformabile di nuovo esattamente nel formato RGB di partenza applicando la matrice

inversa:

$$(2) \quad [R G B]^T = [M]^{-1} [Y C_r C_b]^T$$

Dove $[M]^{-1}$ è la matrice inversa di $[M]$.

Il concetto è facilmente comprensibile se si pensa che la moltiplicazione matriciale in questo caso corrisponde ad un cambio di sistema di riferimento colorimetrico: è ovvio che cambiando il riferimento il vettore rappresentato non si modifichi.

È anche ovvio, tuttavia, che se si modifica il valore delle componenti in un certo dominio, non sarà possibile ricostruire i valori originali applicando la trasformazione inversa. In particolare si deve tenere in conto che i vettori che compaiono nelle relazioni indicate rappresentano dei segnali, il cui valore, funzione del tempo e dello spazio, viene modificato quando si applicano operazioni quali per esempio un filtraggio nel dominio delle frequenze.

Il segnale nel dominio dei primari RGB dato dalla (2) può essere considerato la somma della componente a bassa frequenza (apice BF) e della componente ad alta frequenza (apice AF) del segnale rappresentato in termini di componenti $Y C_r C_b$:

$$(3a) \quad [R G B]^T =$$

$$[M]^{-1} [Y C_r C_b]_{BF}^T + [M]^{-1} [Y C_r C_b]_{AF}^T$$

Se la componente di alta frequenza viene modificata, per esempio da un filtraggio nel dominio delle frequenze che annulli le componenti di cromatiche in alta frequenza, è chiaro che non si potrà ricostruire esattamente il segnale RGB

Nota 13 - Per usi particolari è stato standardizzato anche il formato 4:4:4 dove le tre componenti non sono filtrate.

Nota 14 - Il formato è noto anche come 4:2:2. Si noti che si considerano qui segnali digitali, che permettono di applicare direttamente elaborazioni con algoritmi numerici.

di partenza:

$$(3b) \quad [R \ G \ B]^T \neq$$

$$[M]^{-1} [Y \ C_r \ C_b]^T_{BF} + [M]^{-1} [Y \ 0 \ 0]^T_{AF}$$

Tenendo conto di quanto detto, si analizzi l'algoritmo implementato per ottenere l'immagine anàglifa, che in notazione matriciale, si può rappresentare nel seguente modo:

$$(4) \quad V_A =$$

$$[M] [F]_S [M]^{-1} [V]_S + [M] [F]_D [M]^{-1} [V]_D =$$

$$[T]_S [V]_S + [T]_D [V]_D$$

Dove:

- $V = [Y \ C_r \ C_b]^T$ rappresenta il segnale video nelle tre componenti luminanza più cromaticità.
- $[F]$ è la matrice che rappresenta il filtraggio colorimetrico effettuato dando un peso opportuno alle componenti del segnale video. Gli apici S e D indicano rispettivamente il filtro per il canale sinistro e destro.
- $[T] = [M] [F] [M]^{-1}$ è la matrice che tiene conto delle due trasformazioni e del filtraggio colorimetrico. Gli apici S e D indicano rispettivamente il canale sinistro e quello destro.

In altre parole: il segnale relativo al singolo canale della coppia stereoscopica ($[V]_{S,D}$) viene trasformato in formato RGB tramite moltiplicazione matriciale con $[M]^{-1}$; in questo dominio si effettua il filtraggio colorimetrico implementato con la moltiplicazione per l'opportuna matrice $[F]_{S,D}$; il risultato dei filtri sulle due componenti stereo viene trasformato di nuovo nel formato $Y \ C_r \ C_b$ per la sua utilizzazione con i comuni apparati e le due componenti - derivate dall'elaborazione dei canali sinistro e destro - sono sommate per generare l'immagine anàglifa. Si noti che sono tutte operazioni lineari e che le ultime due pos-

sono essere commutate.

Come accennato in precedenza, il segnale televisivo si può rappresentare come somma di una componente a bassa frequenza e di una ad alta frequenza (nella trattazione che segue non ha importanza la frequenza di taglio né l'esatto andamento dei filtri, purché si considerino solo operazioni lineari):

$$(5) \quad [V] = [V]_{BF} + [V]_{AF} =$$

$$[Y \ C_r \ C_b]^T_{BF} + [Y \ C_r \ C_b]^T_{AF}$$

Sostituendo la notazione riportata in (5) nella (4) si ottiene:

$$(6) \quad V_A =$$

$$[T]_S ([Y \ C_r \ C_b]^T_{BF S} + [Y \ C_r \ C_b]^T_{AF S}) +$$

$$[T]_D ([Y \ C_r \ C_b]^T_{BF D} + [Y \ C_r \ C_b]^T_{AF D}) =$$

$$[T]_S [Y \ C_r \ C_b]^T_{BF S} + [T]_D [Y \ C_r \ C_b]^T_{BF D} +$$

$$[T]_S [Y \ C_r \ C_b]^T_{AF S} + [T]_D [Y \ C_r \ C_b]^T_{AF D} = V_{ABF} + V_{AAF}$$

Si noti che la componente in bassa frequenza dell'immagine anàglifa è ricostruita perfettamente:

$$(7a) \quad V_{ABF} =$$

$$[T]_S [Y \ C_r \ C_b]^T_{BF S} + [T]_D [Y \ C_r \ C_b]^T_{BF D}$$

Mentre la componente in alta frequenza - composta sia dalla luminanza che dalla cromaticità - non è ricostruita perfettamente in quanto, in ottemperanza alla raccomandazione citata, le componenti di alta frequenza delle cromaticità sono azzerate, ottenendo:

$$(7b) \quad V_{AAF} = [T]_S [Y \ 0 \ 0]^T_{AF S} + [T]_D [Y \ 0 \ 0]^T_{AF D}$$

Ricordando le relazioni (3a) e (3b) si noti che il filtraggio sulle cromaticità non permette la ricostruzione perfetta del segnale nel dominio

RGB^{Nota 15} su cui si opera il filtraggio colorimetrico. La successiva trasformazione [M] diffonde ulteriormente gli artefatti di cui sono affetti i segnali RGB su tutte e tre le componenti - Y , C_r e C_b - che vengono visualizzate.

Da questa analisi risulta che l'immagine anàglifa (figura 7a) è meno definita rispetto all'originale (figura 7b) perché solo la componente in bassa frequenza viene generata correttamente, e contiene degli artefatti in quanto la componente in alta frequenza non viene ricostruita perfettamente.

Fig. 7a – Immagine anàglifa.



Fig. 7b – Immagine originale.



3. InfitecTM Nota 16

3.1. Premessa

Secondo il principio della tricromia, ogni colore visibile può essere riprodotto con un'opportuna miscela di tre colori primari.

Il metodo è ampiamente utilizzato nelle due forme chiamate sintesi additiva quando si sommano contributi luminosi generati da apposite sorgenti colorate, e sintesi sottrattiva quando si usano dei filtri per eliminare contributi luminosi di certi colori.

Per esempio, nei monitor televisivi a CRT si usa la sintesi additiva: i colori sono ottenuti miscelando la luce generata da sorgenti di luce rossa, verde e blu, costituite dai fosfori eccitati con l'intensità opportuna dal cannone elettronico. Nella stampa a colori si adotta invece la sintesi sottrattiva. Si usano degli inchiostri - nei sistemi tricromatici sono di colore giallo, ciano e magenta - che assorbono le componenti luminose diverse dal loro colore.

Dal punto di vista matematico la scelta dei primari è arbitraria. Nella pratica deriva dalla possibilità di ottenere le sorgenti luminose o i filtri assorbenti nei colori desiderati, considerando i parametri ottimali per la resa cromatica, per esempio la quantità di colori riproducibili (gamut).

Il principio della tricromia ha una giustificazione fisiologica. Infatti, i coni, recettori retinici attivi nella

Nota 15 - Si consideri che il segnale televisivo nasce sempre nel formato RGB poiché generato dai tre sensori inseriti nelle telecamere. La trasformazione nel formato $Y C_r C_b$ con relativo filtraggio è successiva, ma può essere realizzata già a livello di telecamera.

Nota 16 - InfitecTM è un acronimo per *interferenz filter technik* ed è un marchio di DaimlerChrysler Research and Technology di Ulm, di cui Barco (nota azienda di produzione di sistemi di visualizzazione) è licenziataria.

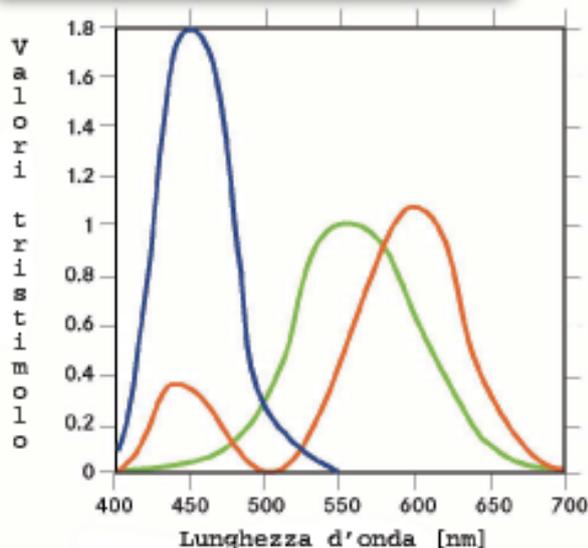
visione ad alti e medi livelli di luminosità ^{Nota 17} che consentono la percezione dei colori, sono differenziati in tre gruppi a seconda del tipo di sensibilità che presentano, dovuta alla presenza di particolari molecole chiamate fotopigmenti.

Gli andamenti della sensibilità dei coni in funzione della lunghezza d'onda della luce incidente, ossia del colore, sono riportati in figura 8.

Si noti che le curve di sensibilità presentano un valore di massimo che si trova a lunghezze d'onda differenti, in particolare nella zona del rosso (600 nm), del verde (550 nm) e del blu (450 nm). Per questo motivo è invalso l'uso di considerare i recettori come sensibili ai colori, rispettivamente, rosso, verde e blu. Ma questa è una semplificazione che non tiene conto che le curve di sensibilità dei recettori "rosso" e "verde" sono decisamente sovrapposte, e che, inoltre, i recettori "rossi" sono sensibili anche nella zona del blu.

In ogni caso, gli apparati visualizzatori a colori, per esempio schermi a CRT o LCD, sono basati su terne di sorgenti luminose, una per ogni pixel, che emettono luce a lunghezze d'onda vicine a quelle di massima sensibilità retinica.

Fig. 8 – Andamenti della sensibilità dei coni in funzione della lunghezza d'onda della luce incidente.

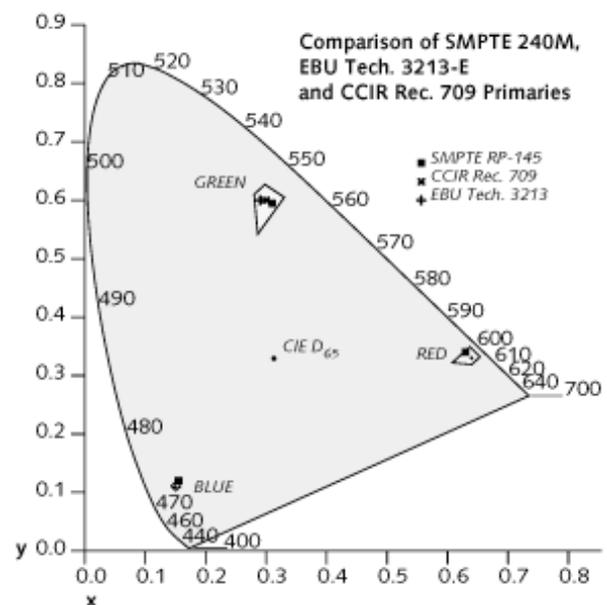


Per ottenere omogeneità nella riproduzione dei colori, tali terne sono state standardizzate dai principali enti, per esempio ITU-R, EBU, SMPTE. In figura 9 si riporta la posizione dei primari standardizzati dagli enti suindicati nel diagramma colorimetrico CIE; il primario rosso emette luce della lunghezza d'onda di circa 600-610 nm, il primario verde emette sui 550 nm e il primario blu emette luce a circa 470 nm, in accordo con gli andamenti di sensibilità dei fotorecettori.

Si noti che le diverse terne di primari non sono perfettamente coincidenti. Questo fa sì che alimentare un visualizzatore tarato su una terna colorimetrica con un segnale adatto per un'altra terna provoca una riproduzione colorimetrica non perfetta.

Nota 17 - Per completezza: la visione scotopica è la visione monocromatica dovuta unicamente all'attività dei bastoncelli della retina. Si tratta del tipo di visione che si ha quando il livello di illuminazione è molto basso e consente di rilevare differenze di brillantezza ma non differenze di cromaticità. La visione a livelli di illuminazione normali è la visione fotopica, mentre quella a livelli intermedi è la visione mesopica.

Fig. 9 – Posizione dei primari colorimetrici ITU-R, EBU e SMPTE nel diagramma CIE. (fonte: [5])



Tuttavia la vicinanza tra i primari indica che il gamut sia pressoché lo stesso per le tre terne.

Analizzando gli andamenti di figura 8 si nota che l'intervallo di lunghezze d'onda attorno al massimo nel quale la sensibilità retinica si mantiene a valori elevati è relativamente ampio: circa 70 nm per il rosso, 80 nm per il verde e 45 nm per il blu.

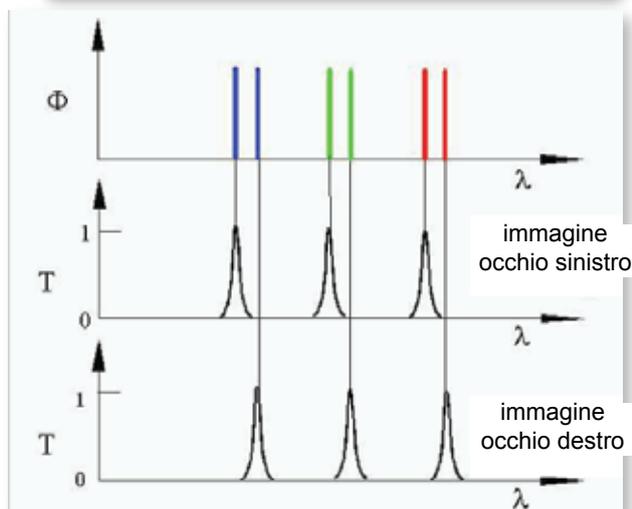
Pertanto è possibile utilizzare terne di primari leggermente differenziati in lunghezza d'onda, purché nell'intorno del massimo della sensibilità dei recettori, per ottenere percezioni molto simili.

Questo fa sì che i diversi primari illustrati in figura 9 suscitino percezioni praticamente uguali; in altre parole, le tre terne colorimetriche standardizzate da ITU-R, EBU e SMPTE sono praticamente equivalenti.

3.2. Principio di funzionamento

Il sistema Infitec sfrutta l'ampiezza delle curve di sensibilità retinica utilizzando due terne di primari colorimetrici molto vicini tra loro e posizionati nell'intorno del punto di massima sensibilità retinica, come schematizzato in figura 10 [5].

Fig. 10 – Coppia di terne di primari usati nel sistema Infitec (schematizzazione) (fonte: [5]).



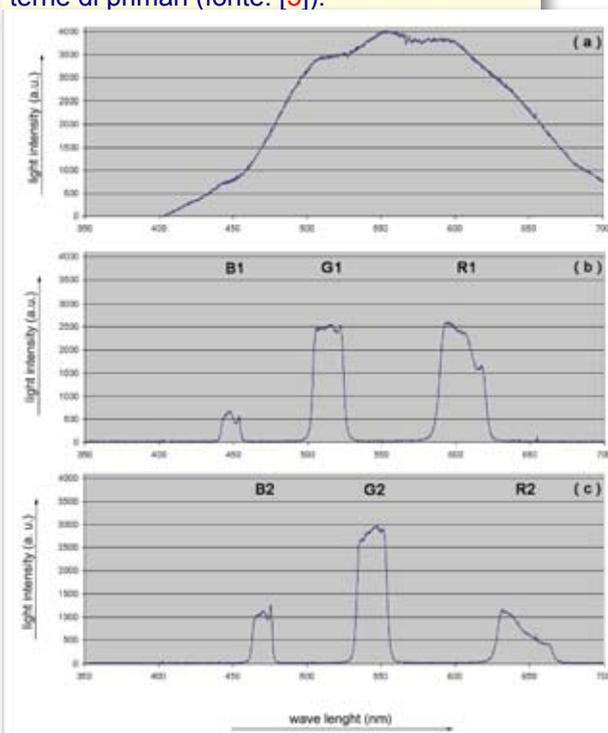
Ciascuna terna colorimetrica viene associata ad un segnale della coppia stereoscopica che si vuole visualizzare - previo suo adattamento ^{Nota 18} per tenere conto della posizione dei nuovi primari colorimetrici rispetto a quelli utilizzati in fase di generazione.

Nei sistemi di visualizzazione a proiezione, le due terne di primari sono ottenute filtrando con filtri ottici di tipo passabanda la luce emessa da una sorgente luminosa che, in pratica, consiste in una lampada ad incandescenza del tipo utilizzato nei proiettori ^{Nota 19}.

La figura 11 illustra lo spettro della sorgente e il risultato dei filtraggi passabanda.

Nota 18 - Si tratta di operare una trasformazione di base, in genere realizzata tramite prodotto matriciale con una matrice di trasformazione tra coordinate (corrispondenti alle terne di primari).
Nota 19 - Si ricorda che la Barco propone il sistema Infitec in sistemi stereoscopici a proiezione.

Fig. 11 – Spettro di una sorgente ad incandescenza (sopra) e il risultato dei filtraggi passabanda per ricavare le due terne di primari (fonte: [5]).



Per ottenere primari molto vicini in termini di lunghezza d'onda, le bande di transizione dei filtri devono essere piuttosto ripide. Per questo motivo si usano filtri dicroici che, a fronte di un maggior costo, presentano caratteristiche ottiche del livello necessario.

Nei sistemi a proiezione i due canali destro e sinistro vengono proiettati sovrapposti sullo stesso schermo, come schematizzato in figura 12; quest'ultimo non deve avere particolari caratteristiche ottiche a parte una buona capacità diffondente^{Nota 20}.

La separazione tra i due canali avviene a livello degli occhiali, illustrati in figura 13, indossati dall'osservatore ed equipaggiati con filtri con le stesse caratteristiche spettrali di quelli utilizzati per ricavare i primari colorimetrici.

3.3. Principali caratteristiche

Rispetto al sistema a proiezione di luce polarizzata, il sistema Infitec è caratterizzato da una migliore separazione tra canali dovuta alla elevata reiezione in banda attenuata delle componenti luminose indesiderate, caratteristica ottenuta anche grazie alle caratteristiche ottiche dei filtri dicroici^{Nota 21} adottati. Pertanto il fenomeno del ghosting è talmente limitato da non risultare apprezzabile.

Gli occhiali sono passivi. Tuttavia i filtri sono di materiale vetroso e quindi relativamente fragili e pesanti; inoltre sono a tutt'oggi relativamente cari.

I due canali della coppia stereoscopica vengono proiettati simultaneamente; non c'è sottocampionamento temporale, quindi il flicker non è apprezzabile, nel senso che rimane quello tipico del sistema video che alimenta i proiettori (nel caso televisivo europeo è a 50 Hz).

Il sistema Infitec ha prestazioni luminose paragonabili ai sistemi di proiezione standard 2D, in quanto la perdita di luminosità dovuta ai filtri è relativamente piccola, in particolare rispetto ai filtri polarizzatori, e non c'è sottocampionamento temporale come nei sistemi attivi.

Nota 20 - Infatti, a differenza del sistema a proiezione di luce polarizzata, per il quale è necessario utilizzare uno schermo riflettente che mantenga la polarizzazione, nel sistema Infitec qualsiasi schermo per proiezione (che in genere sono di tipo diffondente) è adatto.
Nota 21 - I filtri dicroici o a riflessione sono fabbricati rivestendo uno strato di vetro con uno strato ottico. Questi filtri riflettono le porzioni di luce non volute alla sorgente. Sono particolarmente indicati per lavori scientifici ad alta precisione, dato che la banda del filtro può essere selezionata con estrema precisione. Sono però molto più delicati e costosi dei filtri ad assorbimento.

Fig. 12 – Schema illustrativo di sistema di proiezione Infitec.

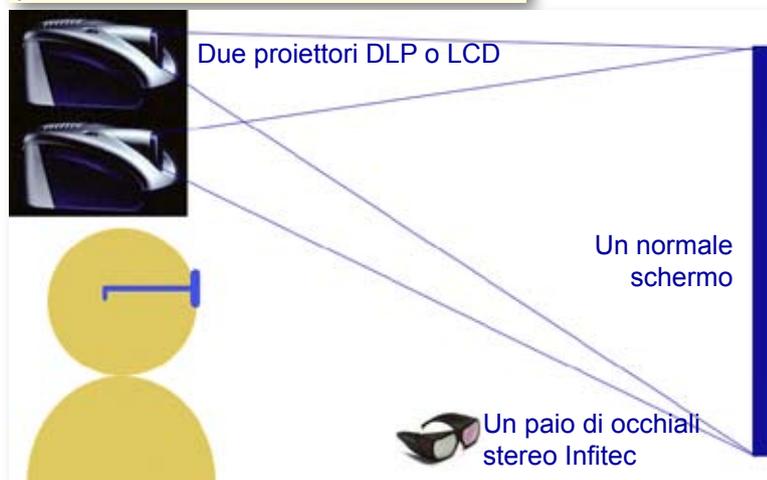


Fig. 13 – Occhiali con filtri Infitec (fonte: www.3dtiefenrausch.de).



La riproduzione colorimetrica è ottima.

Si noti che siccome la separazione dei canali viene effettuata nel campo delle frequenze, ossia dei colori, lo schermo non deve avere caratteristiche ottiche specifiche; in particolare non è necessario che sia di tipo riflettente, ma può essere un comune schermo per proiezione, con caratteristiche diffondenti. In questo modo si ottiene una migliore luminosità dell'immagine e un maggior angolo di visione rispetto alla tecnica di proiezione in luce polarizzata.

Bibliografia

1. G. Colace, M. Muratori – Televisione stereoscopica, le basi della tecnica stereoscopica – Elettronica e Telecomunicazioni, n. 2, Agosto 2004
2. E. Perucca – Dizionario di ingegneria - UTET
3. E. Dubois – A Projection Method to Generate Anaglyph Stereo Images – <http://mti.xidian.edu.cn/multimedia/2001/supp/icas-sp2001/MAIN/papers/pap2222.pdf>
4. Recommendation ITU BT.601-5 – STUDIO ENCODING PARAMETERS OF DIGITAL TELEVISION FOR STANDARD 4:3 AND WIDESCREEN 16:9 ASPECT RATIOS – ITU
5. H. Jorke, M. Fritz – Infitec - a new Stereoscopic Visualization Tool by Wavelength Multiplex Imaging – Proceedings Electronic Displays, September 2003, Wiesbaden (www.infitec.net/infitec_english.pdf)
6. C. A. Poynton – Wide Gamut Device-Independent Colour Image Interchange – Proceedings of the International Broadcasting Convention, 10-16 Sept. 1994, Conf. Publ. No. 397, copyright IEE, 1994 (www.poynton.com/PDFs/Colour_interchange.pdf)
7. M. Muratori – Tecniche per la visione stereoscopica – Elettronica e telecomunicazioni, n. 2, Aprile 2007.