Tecniche per la visione stereoscopica

ing. Mario Muratori

Rai
Centro Ricerche e
InnovazioneTecnologica
Torino

Sommario
Fin dalla sua ideazione, la stereoscopia ha stimolato invenzioni per la visualizzazione del materiale visivo stereoscopico. Tuttavia, il problema di veicolare il canale corretto all'occhio corrispondente non è ancora stato risolto definitivamente: esistono diverse tecniche, basate su principi differenti, ognuna delle quali può risultare preferibile ad altre in specifiche utilizzazioni, ma a tutt'oggi non esiste un metodo chiaramente superiore agli altri in ogni occasione.
In questo articolo si descrivono i principi di base su cui si fondano le più importanti tecniche di visualizzazione stereoscopica, si accenna alle loro possibili applicazioni alla televisione, illustrandone le caratteristiche fondamentali.

1. Introduzione

1.1 Le basi della stereoscopia

In [1] si illustrano i principi di funzionamento della stereoscopia.

Questi si basano su alcune caratteristiche della visione umana; in particolare sulla convergenza oculare verso un punto (*punto di fissazione*), in genere ubicato in posizione centrale rispetto all'oggetto di interesse, e sull'analisi delle disparità tra i punti retinici corrispondenti (*stereopsi*).

La prima caratteristica implica che le due scene viste dai due occhi siano percepite come spazialmente coincidenti.

La seconda, resa possibile dal processo della *fusione sensoriale*, permette di valutare la posizione spaziale dei punti costituenti la superficie visibile dell'oggetto rispetto al punto di fissazione e quindi di percepire la tridimensionalità dell'oggetto osservato.

Le tecniche stereoscopiche mirano a riprodurre, in sede di visualizzazione, la stessa configurazione geometrica che si ha durante l'osservazione di una scena da parte di un osservatore reale (*geometria di osservazione*).

Posto quindi che il sistema di ripresa emuli un osservatore "medio" – posizione di prima approssimazione, in quanto nella pratica potrebbero risultare preferibili configurazioni differenti – e che quindi produca una coppia di segnali video, nel nostro caso televisivi, ripresi con una data geometria, il problema fondamentale dei sistemi di visualizzazione consiste nel veicolare ciascuno di tali segnali all'occhio corrispondente e solo

a quello, riproducendo virtualmente la geometria di osservazione in modo da stimolare la visione tridimensionale stereoscopica nell'osservatore[Nota 1].

1.2 Generalità sulle tecniche stereoscopiche

Dall'inizio della stereoscopia, ossia dallo stereoscopio di Wheatstone del 1833, le tecniche stereoscopiche hanno subito forti cambiamenti man mano che la tecnologia ha permesso di realizzare sistemi più complessi ed efficienti.

La scelta di una specifica tecnica dipende anche dalla tecnologia degli apparati di visualizzazione disponibili: per esempio, in campo televisivo è più agevole utilizzare tecniche che richiedono apparati elettronici, mentre in altri casi, ad esempio nella cinematografia dove si usano principalmente sistemi ottici ed elettromeccanici, possono risultare più opportuni altri metodi.

In questo articolo ci si focalizza sulle tecniche basate su apparati elettronici, in particolare di tipo televisivo, che vengono presentate suddividendole in famiglie, a seconda dei principi di funzionamento. Vi sono infatti tecniche che sfruttano le caratteristiche fisiche della luce, quelle che si basano sulle caratteristiche dei segnali televisivi costituenti la coppia stereoscopica, infine altre che si fondano sulle caratteristiche costruttive degli apparati.

Complessivamente va rilevato che, attualmente, non esiste una tecnica preferibile in assoluto, ma solo tecniche che si adattano meglio di altre alla specifica utilizzazione.

Nota 1 - Per la precisione si cerca principalmente di stimolare la stereopsi.
Nota 2 - Quello che qui interessa è la forma che assume l'onda in corrispondenza degli schermi di proiezione e/o dell'osservatore. Ambedue si trovano in situazioni di far field e molto lontani dalla sorgente in termini di lunghezze d'onda: quindi il fascio luminoso si può ritenere ben approssimato da un'onda piana.

1.3 Richiami di fisica

La *luce* (dal latino, *lux*, *lucis*) è l'agente fisico che rende visibili gli oggetti. In particolare, il termine luce si riferisce alla porzione dello spettro elettromagnetico visibile all'occhio umano.

Le tre grandezze che descrivono la luce sono: la *luminosità*, legata all'ampiezza dell'onda, il *colore*, legato alla *frequenza* (o alla *lunghezza d'onda*), e la *polarizzazione*, che indica la direzione lungo la quale oscilla il campo elettrico dell'onda elettromagnetica che costituisce il fascio luminoso.

La luce che si utilizza nei sistemi di visualizzazione si propaga per onde piane[Nota 2], di cui la figura 1 propone una illustrazione.

In questo caso, i campi elettrico e magnetico sono rappresentati dalle espressioni seguenti [2]:

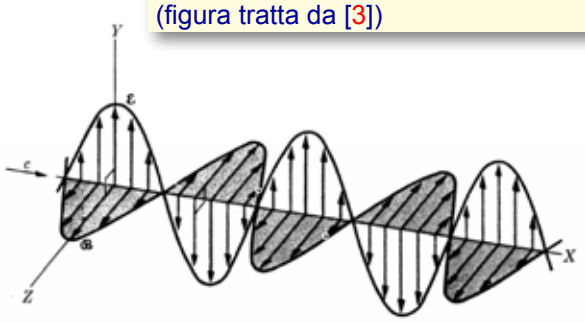
$$\mathbf{E} = \mathbf{e}\ E_0\ e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t+\varphi)}$$

(1)

$$\mathbf{B} = \mathbf{e}\times\mathbf{k}\ B_0\ e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t+\varphi)}$$

E_0, B_0 sono le ampiezze dei campi, rispettivamente, elettrico e magnetico. Come anticipato sopra, l'ampiezza dell'onda supporta l'informazione di luminosità, che è quella che serve per generare l'immagine visibile e non è utilizzabile per la separazione dei canali costituenti la coppia stereoscopica. L'ampiezza è legata anche alle

Fig. 1 – Onda elettromagnetica piana (figura tratta da [3])



caratteristiche energetiche dell'onda (energia trasportata, momento e momento angolare) che qui non vengono considerate.

Il campo elettrico oscilla su un piano perpendicolare al campo magnetico e ambedue sono perpendicolari alla direzione di propagazione data dal *vettore d'onda* **k**.

Più interessante è il vettore **e** che indica la direzione di oscillazione del campo elettrico e pertanto denominato *vettore polarizzazione*[Nota 3]. Sfruttando il fatto che l'occhio è insensibile alla polarizzazione, alcune tecniche utilizzano onde con polarizzazione diversa per veicolare le due componenti della coppia stereoscopica. Si utilizzano filtri polarizzatori per generare luce polarizzata e per separare le diverse polarizzazioni generate[Nota 4].

φ è un fattore di fase che è utile tenere in conto trattando con luce coerente, per esempio in olografia. L'occhio non è sensibile alla fase della luce incidente. Questa grandezza non è direttamente sfruttabile per la separazione delle due componenti stereoscopiche. Tuttavia, si utilizzano sfasamenti fissi per generare polarizzazioni circolari o ellittiche.

$\omega = 2\pi f$ è la pulsazione; di particolare interesse è la frequenza $f = c/\lambda$ poiché è direttamente legata al colore dello stimolo luminoso[Nota 5]. Essendo agevole costruire dei filtri colorati che siano trasparenti od opachi alle diverse frequenze, alcune tecniche stereoscopiche (anàglifo e Infitec™) utilizzano questa grandezza cercando di mantenere buona la riproduzione colorimetrica.

1.3.1 La polarizzazione

Se il fenomeno luminoso è costituito da una singola onda piana, la polarizzazione coincide con l'unica direzione possibile in cui oscilla il campo elettrico, come illustrato in figura 1, ed è definita *lineare*.

Siccome il sistema di riferimento è arbitrario, è sempre possibile pensare che il campo elettrico sia il risultato della somma vettoriale di due componenti perpendicolari tra loro e giacenti sul piano definito dal vettore campo elettrico e dal vettore campo magnetico[Nota 6]. In questo caso si interpreta l'onda risultante come la combinazione lineare di due onde piane aventi la stessa frequenza e la stessa fase[Nota 7], mentre l'ampiezza può essere diversa.

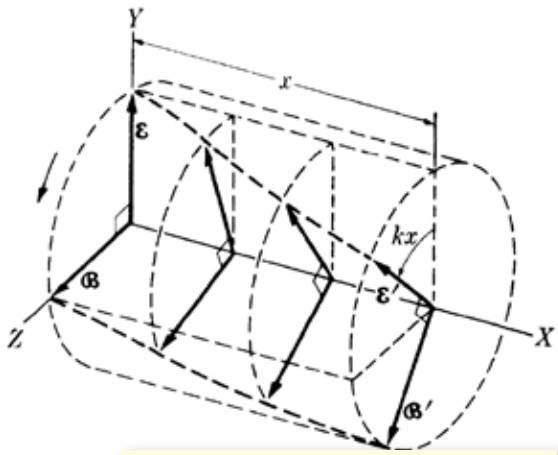


Fig. 2 – Polarizzazione circolare (figura tratta da [3])

Nel particolare caso in cui le due componenti abbiano sì la stessa frequenza, ma siano sfasate di +/- π /2, il prodotto della loro combinazione è un vettore campo elettrico rotante attorno alla direzione di propagazione, come illustrato in figura 2, con senso di rotazione dipendente dal

Nota 3 - Per definizione, la polarizzazione di un'onda elettromagnetica è la direzione di oscillazione del campo elettrico.
Nota 4 - Per le onde piane le possibili polarizzazioni ortogonali sono due. Nel caso di polarizzazione lineare i vettori polarizzazione sono anche geometricamente perpendicolari tra loro; nel caso di polarizzazione circolare le soluzioni ortogonali sono caratterizzate dall'opposto senso di rotazione (destrorso/sinistrorso) del vettore campo elettrico.
Nota 5 - Spesso nel campo della fisica della luce si utilizza la lunghezza d'onda $\lambda = c/f$, che però varia in dipendenza dell'indice di rifrazione ossia della velocità di propagazione della luce nel mezzo considerato.
Nota 6 - Il piano YZ nella figura 1 e nella figura 2.
Nota 7 - Per semplicità si considera implicitamente un'onda sinusoidale. Peraltro, altre forme d'onda possono ridursi a combinazioni di onde sinusoidali tramite un'analisi di Fourier.

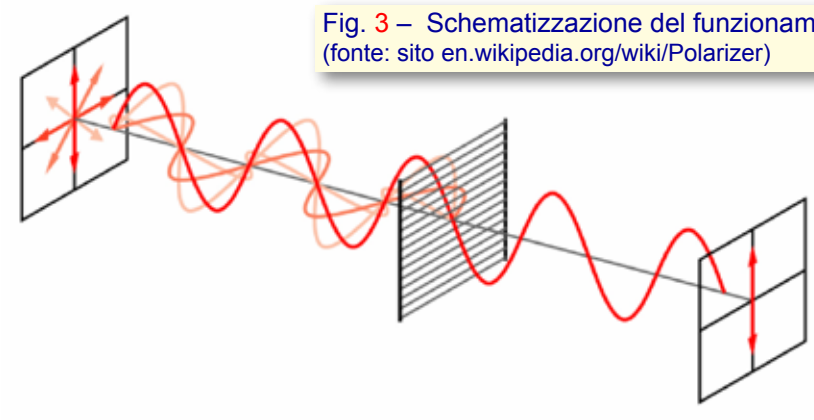


Fig. 3 – Schematizzazione del funzionamento di un filtro polarizzatore lineare
(fonte: sito en.wikipedia.org/wiki/Polarizer)

segno dello sfasamento.

Se le ampiezze delle due componenti sono uguali si ottiene una polarizzazione *circolare*, altrimenti la polarizzazione si definisce *ellittica*.

1.3.2 Filtri polarizzatori

Vi sono diversi metodi per costruire filtri polarizzatori che permettono di ottenere luce polarizzata.

I filtri ad assorbimento[Nota 8] lasciano passare pressoché indisturbate le onde elettromagnetiche con una data polarizzazione, riflettendo o assorbendo le altre, come illustrato schematicamente in figura 3.

Se un fascio di luce già polarizzato linearmente attraversa un filtro polarizzatore, l'intensità luminosa viene attenuata secondo la legge di Malus[Nota 9]:

(2) $I = I_0 \cos^2(\theta)$

dove I_0 è l'intensità della luce entrante, I è l'intensità della luce uscente e θ è l'angolo tra la direzione della polarizzazione della luce incidente e l'asse del filtro polarizzatore.

Come conseguenza, in un filtro ideale, se l'angolo θ è di 90° la luce viene completamente assorbita, se è di 0° attraversa totalmente il filtro.

In un filtro reale, la trasparenza per θ nullo non è totale e quindi si avrà una certa attenuazione anche se la luce incidente è polarizzata secondo l'orientamento del filtro, il che implica una riduzione della luminosità.

Neppure l'opacità per θ = 90° risulta totale, per cui si riscontra ancora un residuo di luce uscente dal filtro anche se la luce incidente ha polarizzazione ortogonale[Nota 10]. Nelle applicazioni stereoscopiche questo implica che il canale indesiderato risulta ancora visibile sebbene fortemente attenuato: l'effetto è quello di percepire una doppia figura e il fenomeno in gergo è chiamato *ghost*.

Per ottenere luce polarizzata circolarmente, di solito si usano filtri costituiti dalle cosiddette *lamine in λ/4*.

Nota 8 - Ci sono anche filtri di altro tipo; per esempio le finestre di Brewster, che si basano sulle proprietà della riflessione delle onde elettromagnetiche.
Nota 9 - Dal nome di Etienne-Louis Malus (1775-1812) ingegnere, fisico e matematico francese.
Nota 10 - Il rapporto tra il coefficiente di trasmissione relativo alla componente indesiderata e quello relativo alla componente voluta varia da 1/500 per filtri Polaroid a circa $1/10^6$ per i prismi di Glan-Taylor.
Nota 11 - Alcuni materiali anisotropi sono caratterizzati dal presentare indici di rifrazione diversi a seconda della direzione di propagazione della luce al loro interno. I materiali cristallini birifrangenti presentano due indici di rifrazione diversi. In questi materiali, un raggio luminoso incidente si divide in due fasci (ordinario e straordinario) che si propagano con velocità diverse, quindi subendo uno sfasamento relativo.

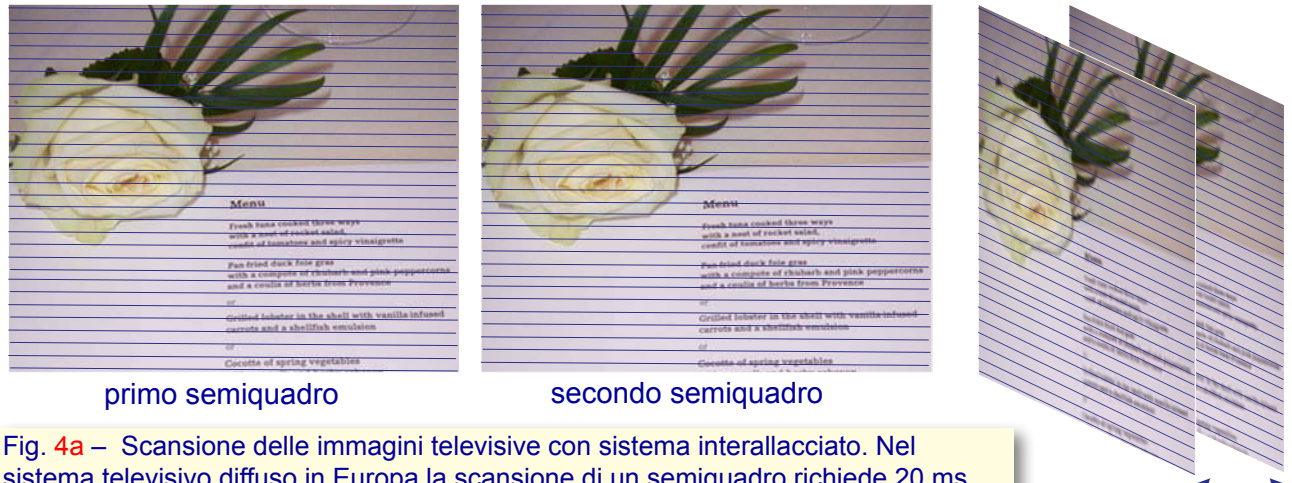


Fig. 4a – Scansione delle immagini televisive con sistema interallacciato. Nel sistema televisivo diffuso in Europa la scansione di un semiquadro richiede 20 ms. La scansione di un intero quadro richiede 40 ms.

Queste sono formate da uno strato di materiale ottico birifrangente[Nota 11]. In questo tipo di materiali i raggi luminosi si dividono nei due raggi *ordinario* e *straordinario* che, nei filtri di interesse, hanno polarizzazioni lineari ortogonali e velocità di propagazione differente[Nota 12], sicché subiscono uno sfasamento relativo proporzionale allo spessore del materiale.

Se lo sfasamento in termini di lunghezza d'onda è pari a multipli dispari di $\lambda/4$, ossia, in termini di fase, risulta uguali a multipli dispari di $\pi/2$, quando i due raggi escono dal materiale si ricombinano generando un'onda polarizzata circolarmente.

Si noti che illuminando il filtro con un fascio non monocromatico, solo la componente luminosa la cui lunghezza d'onda soddisfa esattamente le condizioni anzidette esce dal filtro con una polarizzazione circolare perfetta. Le componenti aventi lunghezze d'onda differenti risulteranno polarizzate ellitticamente[Nota 13].

Questo è uno dei motivi per cui i filtri polarizzatori circolari presentano una reiezione al canale indesiderato inferiore rispetto ai filtri polarizzatori lineari.

1.4 Richiami di tecnica televisiva

Negli apparati di ripresa, l'energia luminosa proveniente dalla scena inquadrata viene focalizzata sulla superficie del sensore che funge da trasduttore ottico-elettrico, generando un segnale di tipo elettrico[Nota 14] distribuito spazialmente.

Per poter utilizzare tale segnale conviene renderlo monodimensionale. Ciò si ottiene tramite la scansione per righe del sensore, generando

Fig. 4b – Scansione delle immagini televisive con sistema progressivo. La scansione di un quadro richiede 40 ms.

Nota 12 - Gli indici di rifrazione per i due raggi sono diversi.
Nota 13 - Ogni polarizzazione ellittica può essere scomposta nella somma di due polarizzazioni lineari or-togonali o di due polarizzazioni circolari con rotazione contrapposta.
Nota 14 - Per esempio un accumulo di cariche elettriche di valore proporzionale all'intensità luminosa.

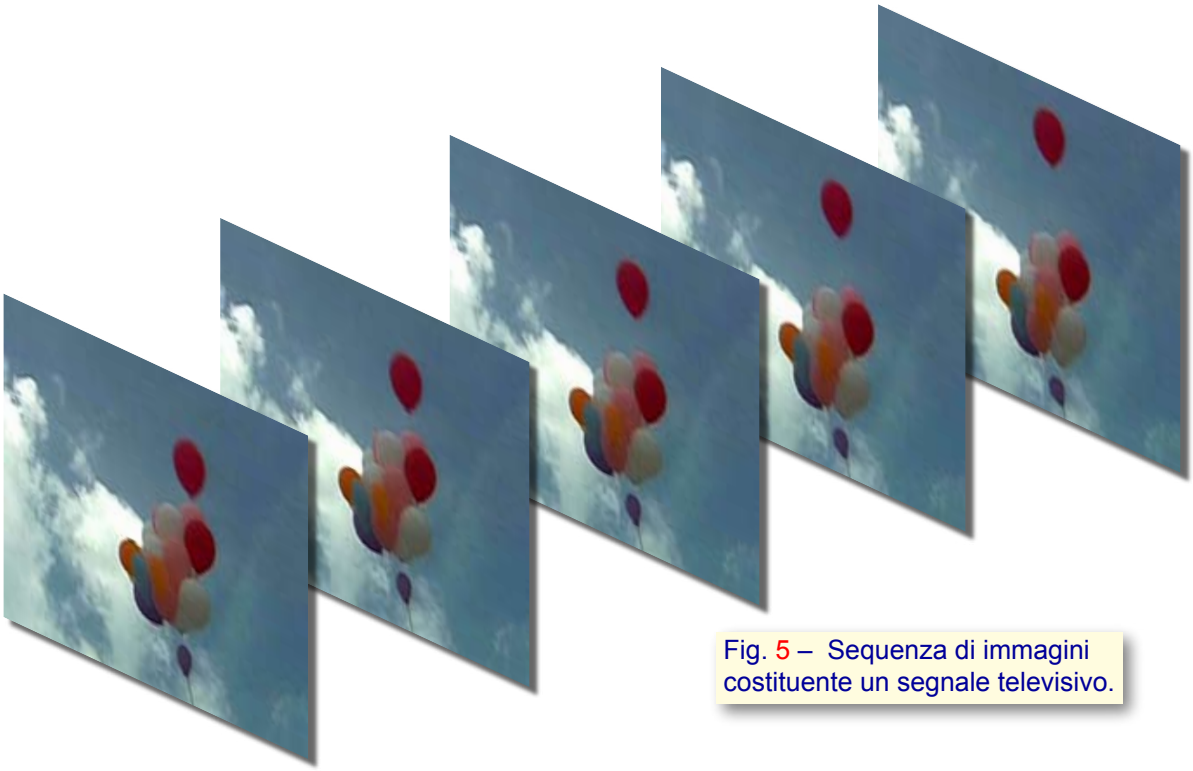


Fig. 5 – Sequenza di immagini costituente un segnale televisivo.

un segnale continuo nel tempo. Al termine della scansione di una immagine si ripete l'operazione procedendo alla scansione di una nuova immagine che, nel frattempo, avrà generato un nuovo segnale elettrico sul sensore (figure 4a, 4b).

Per una migliore comprensione della tecnica conviene riferirsi direttamente all'immagine piuttosto che agli specifici fenomeni fisici che si svolgono sul sensore. L'operazione di serializzazione del segnale elettrico corrisponde alla scansione, effettuata per righe, di una successione di immagini (figura 5).

Nei sistemi interallacciati tali immagini sono formate dalla metà delle righe costituenti un quadro e vengono chiamate perciò *semiquadri*. Vi sono delle motivazioni tecniche, che non interessa approfondire in questa sede, che giustificano l'adozione di questo tipo di scansione.

Ai fini della comprensione di alcune tecniche illustrate nel seguito, è importante considerare il segnale televisivo come una successione di immagini distinte che vengono presentate alla *frequenza di quadro*. Tra un'immagine e la successiva vi è un periodo di tempo, in linea di principio, "vuoto" nel quale si possono inserire altre immagini ottenendo una multiplazione *temporale*.

2. Tecniche

2.1 Tecniche basate sulle caratteristiche fisiche della luce

2.1.1 Anàglifo

Principi di funzionamento

La tecnica degli anàglifi è descritta in particolare in [4], di prossima pubblicazione.

Secondo il Perucca [5], la dizione corretta è: *metodo degli anàglifi*.

Si tratta di un metodo per l'osservazione di immagini stereoscopiche basato sull'impiego di *colori complementari*: le due immagini costituenti la coppia stereoscopica sono colorate con colori

Fig. 6 – Immagine anàglifa.

complementari - attualmente si utilizza preferibilmente il rosso e il ciano – e vengono presentate sovrapposte e contemporaneamente (figura 6).

Osservando l'anaglifo con occhiali aventi come lenti dei filtri colorati corrispondenti ai colori usati per le immagini (figura 7), 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.

Il livello di assorbimento del colore complementare da parte del filtro colorato definisce la reiezione al canale indesiderato.

La visione stereoscopica si ottiene perché la funzionalità della fusione, operata dal cervello, si basa sul riconoscimento delle forme.

Fig. 7 – Occhiali per anaglifo

La percezione del rilievo invece deriva dall'interpretazione (inconscia) delle differenze tra le due immagini dovute alle differenti viste prospettiche come disparità orizzontali.

Si noti che assieme alla fusione sensoriale si verifica anche una "fusione colorimetrica": i colori percepiti dai due occhi si sommano ottenendo la riproduzione del colore per sintesi addittiva. Per questo motivo è possibile utilizzare immagini mancanti dei 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.

Applicazioni

L'anàglifo è particolarmente adatto alle applicazioni basate su stampa a colori[Nota 15]. in questo caso le informazioni supportate dai primari colorimetrici sono tutte alla stessa definizione e non si verificano i problemi illustrati nel prossimo paragrafo che si hanno invece con i segnali televisivi.

La tecnica è stato utilizzata a più riprese nel campo fotografico e cinematografico, anche grazie alla sua economicità, ma non si è mai affermata per la scarsa qualità soggettiva delle immagini. Anche produzioni cinematografiche recenti, sebbene distribuite su DVD e quindi con una qualità relativamente buona, non sembrano aver entusiasmato il pubblico.

In campo televisivo ci sono stati diversi tentativi di produrre e trasmettere programmi in anàglifo. Soprattutto si è trattato di iniziative promozionali, volte a suscitare interesse in potenziali spettatori, spesso realizzate con l'ausilio della carta stampata, in genere riviste di settore, con le quali si

Nota 15 - Per la verità in quel campo sarebbe anche difficile usare altre tecniche. Si rileva l'uso di pellicole a microprismi per realizzare l'analogo degli schermi autostereoscopici per la produzione di cartoline, carte da gioco e simili. Tale metodo è però di difficile adozione in caso di immagini stampate su giornali, riviste, ecc.

forniscono gli occhiali necessari.

Non si rileva però nessuna iniziativa che abbia avuto un successo rilevante e duraturo.

Analisi delle caratteristiche

La tecnica anaglifica potrebbe essere interpretata come un multiplex nel dominio delle frequenze (frequency division multiplexing), peraltro molto grezzo considerato che si divide brutalmente in due tale dominio (rosso, quindi frequenze basse, in un canale e le alte frequenze, regione del verde fino al blu, nell'altro canale).

Una multiplazione nel dominio delle frequenze più raffinata è operata nel sistema Infitec™ di cui si parla nel seguito.

Apparentemente l'anàglifo sembrerebbe adatto all'uso televisivo, in quanto non richiede una coppia di segnali (canali), ma utilizza un solo segnale di caratteristiche standard.

La compatibilità tecnica non implica però quella "di servizio", in quanto un osservatore non equipaggiato con gli appositi occhiali con filtri colorati vede le immagini anàglife come composte da due immagini colorate sfalsate tra loro e quindi percepisce una qualità inaccettabile.

Tuttavia, anche la qualità delle immagini anàglife televisive visualizzate con gli occhiali appropriati in genere non è buona.

Ciò è principalmente dovuto al fatto che le informazioni relative alle forme, per le quali è importante la definizione dell'immagine, vengono, con la tecnica anàglifa, supportate sia dalla luminanza, ma anche, soprattutto, dai segnali di crominanza.

In ogni sistema televisivo diffusivo e di registrazione (e anche di produzione, salvo rare eccezioni) di uso normale, questi vengono filtrati, a volte con banda passante assai limitata, e quindi le immagini anàglife televisive sono in genere poco definite.

Inoltre, la reiezione del canale indesiderato è sufficiente se si usano filtri colorati di qualità, ma gli occhiali normalmente forniti come gadget in occasione di iniziative promozionali – cioè la gran parte delle volte in cui si trasmettono programmi in anàglifo – hanno filtri di qualità spesso non sufficiente per ottenere una buona reiezione del canale indesiderato.

Infine, la riproduzione colorimetrica non è, in genere, pienamente soddisfacente.

2.1.2 *Infitec™*

Infitec™ è un acronimo per *interferenz filter technik*. E' un marchio di Daimler-Chrysler Research and Technology di Ulm, di cui Barco (nota azienda di produzione di sistemi di visualizzazione) è licenziataria.

Principi di funzionamento

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

Se le sorgenti di luce colorata sono reali, non è possibile riprodurre tutti i colori visibili, ma solo una parte di essi (*gamut*); tale parte è tuttavia sufficientemente ampia per ottenere una riproduzione del mondo reale più che accettabile: i risultati della stampa, della fotografia, della cinematrografia e della televisione a colori lo dimostrano.

La scelta dei primari colorimetrici, ossia delle sorgenti di luce colorata che si mescolano per ottenere i diversi colori[Nota 16], in linea di principio è arbitraria e viene fatta sulla base della disponibilità di sorgenti con le caratteristiche colorimetriche ed energetiche desiderate. Normalmente si utilizzano sorgenti che emettono luce con una lunghezza d'onda compresa in una banda nell'intorno del massimo di sensibilità dei fotorecettori retinici [6].

Tale banda è relativamente ampia, sicché si

Nota 16 - Ciò nella sintesi *addittiva*, ma il principio espresso è valido anche per la sintesi *sottrattiva*.

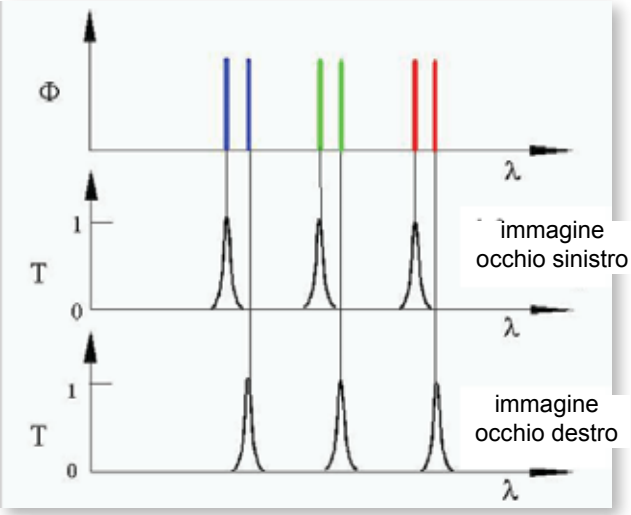


Fig. 8 – Coppia di terne di primari colorimetrici associati alle due componenti stereoscopiche [6].

possono utilizzare due o più terne di primari colorimetrici diverse tra loro per rappresentare la stessa scena senza sensibili variazioni di percezione.

Il principio di funzionamento del sistema Infitec™ è appunto quello di utilizzare due terne di primari colorimetrici, associando una terna a ciascuna delle due componenti di una coppia stereoscopica (figura 8).

Il sistema è attualmente proposto per sistemi di visualizzazione a proiezione, e il filtraggio per ottenere le due terne di primari è effettuato all'interno dei proiettori tramite filtri ottici dicroici, caratterizzati da un'elevata trasparenza nella banda passante, un'elevata opacità nella banda attenuata e una ridottissima banda di transizione.

Il sistema Infitec™ passivo utilizza due proiettori, ciascuno equipaggiato con un sistema di filtri dicroici opportuno, quello attivo utilizza invece un solo proiettore, con raddoppio della frequenza di quadro. In ambedue i casi, le immagini sono proiettate sovrapposte su un comune schermo per proiezione (figura 9).

Gli osservatori indossano occhiali speciali dotati di filtri dicroici - davanti a ciascun occhio si trova il filtro adatto alla terna corrispondente - che permettono di discriminare le due componenti della coppia stereoscopica.

Applicazioni

Il sistema è stato sviluppato principalmente per sistemi di proiezione di elevata qualità, che generalmente vengono utilizzati per presentazioni.

E' un sistema di visualizzazione pura, nel senso che richiede di essere alimentato con i due segnali costituenti la coppia stereoscopica, a prescindere dalle modalità con cui questi vengono prodotti, registrati o trasmessi.

Pertanto in linea di principio potrebbe anche essere utilizzato in ambito televisivo come sistema di visualizzazione di qualità, in particolare se basato su proiettori o display a retroproiezione.

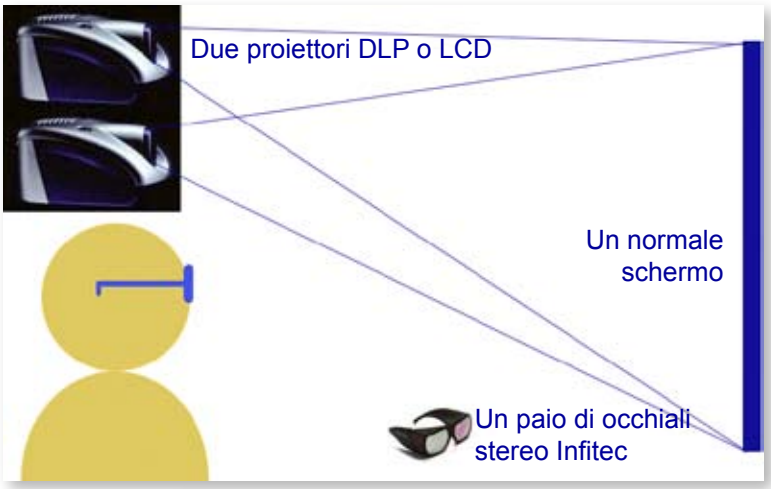


Fig. 9 – Schematizzazione del sistema di proiezione stereoscopica Infitec.

Analisi delle caratteristiche

Il sistema Infitec™ potrebbe anche essere visto come un sistema di multiplazione nel dominio delle frequenze migliore dell'anàglifo.

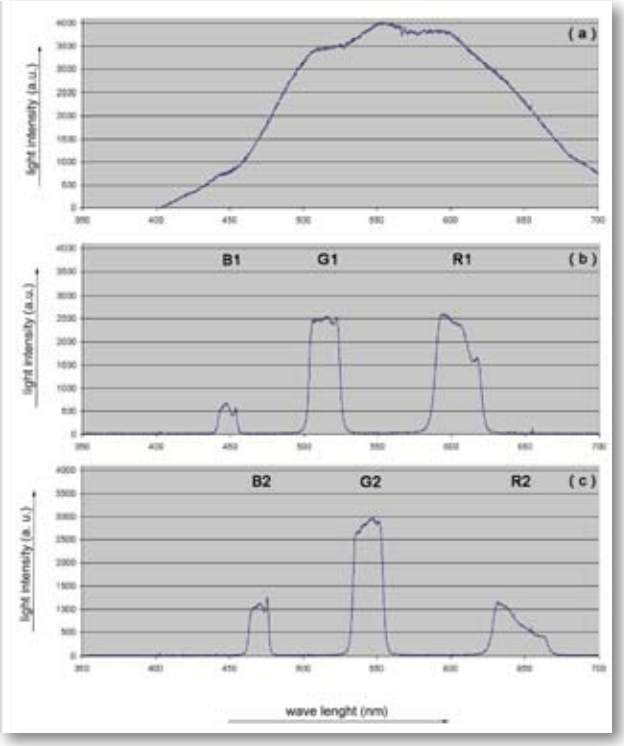


Fig. 10 – Risultato dei filtraggi ottici nel sistema Infitec (fonte: www.barco.com).

Dalla figura 10, che illustra il risultato dei filtraggi ottici volti a ricavare le due terne di primari, si nota che la banda è utilizzata in modo più articolato rispetto all'anàglifo.

Tuttavia, l'analisi nel dominio colorimetrico che si è riportata nei paragrafi precedenti spiega in modo più completo il principio di funzionamento della tecnica.

Complessivamente, il sistema Infitec™ presenta caratteristiche colorimetriche e fotometriche molto interessanti, in quanto è in grado di riprodurre molto fedelmente i colori (usa due terne complete di primari colorimetrici), ha valori di luminosità e di contrasto molto buoni grazie all'elevata trasparenza dei filtri dicroici in banda passante e presenta una elevata reiezione al canale indesiderato (pressoché totale assenza di ghost) grazie all'elevata opacità dei filtri in banda attenuata.

A differenza del sistema di proiezione basato sulla polarizzazione, non ha bisogno di schermi particolari, il che migliora ulteriormente le caratteristiche ottiche del sistema poiché gli schermi per proiezione "normali" hanno un elevato coefficiente di riflessione (sono molto "luminosi") e diffondono la luce permettendo l'osservazione anche da posizioni molto angolate.

Attualmente il sistema è venduto a prezzi piuttosto elevati, probabilmente definiti anche in base alle caratteristiche del mercato di potenziale interesse (aziende interessate a presentazioni di forte impatto).

In ogni caso gli occhiali sono sì passivi, ma essendo equipaggiati con filtri in vetro sono relativamente pesanti e delicati.

2.1.3 Polarizzazione

Principi di funzionamento

Nel tratto compreso tra il display all'osservatore i segnali costituenti la coppia stereoscopica devono necessariamente essere costituiti da segnali ottici.

In questo tragitto si inseriscono dei filtri polarizzatori in modo tale che a valle di questi, i due segnali siano trasportati da onde elettromagnetiche con polarizzazioni ortogonali.

Con occhiali le cui lenti siano dei filtri polarizzatori adatti ad oscurare l'immagine non corrispondente e a lasciare visibile quella diretta all'occhio corretto, si ottiene la separazione dei due canali e quindi un osservatore che li indossi percepisce l'effetto prospettico dato dalla visione stereoscopica.

Vi sono diverse configurazioni possibili.

Proiezione

Questa configurazione prevede l'uso di una coppia di proiettori come illustrato in figura 11.

Ciascun proiettore viene alimentato con una delle

componenti della coppia stereoscopica. Siccome gli apparati sono completamente separati, possono accettare anche segnali non sincronizzati. Ovviamente il ritardo tra i segnali dovrà essere tale che la differenza di temporizzazione tra le scene visualizzate rimanga entro i limiti accettati dall'apparato di visione umana.

Di fronte agli obiettivi dei proiettori si pongono i filtri polarizzatori come illustrato nella figura 11 e schematizzato in figura 12.

Le immagini sono proiettate su uno schermo metallizzato, adatto a mantenere la polarizzazione, e la veicolazione delle corrette componenti stereoscopiche agli occhi corrispondenti è realizzata tramite la separazione operata dai filtri polarizzatori montati sugli occhiali indossati dall'osservatore (figura 13).

Fig. 11 – Sistema di proiezione stereoscopico basato su coppia di proiettori (in questo caso SIM2 per HDTV) in associazione a filtri polarizzatori (visibili attraverso i fori sul portello).

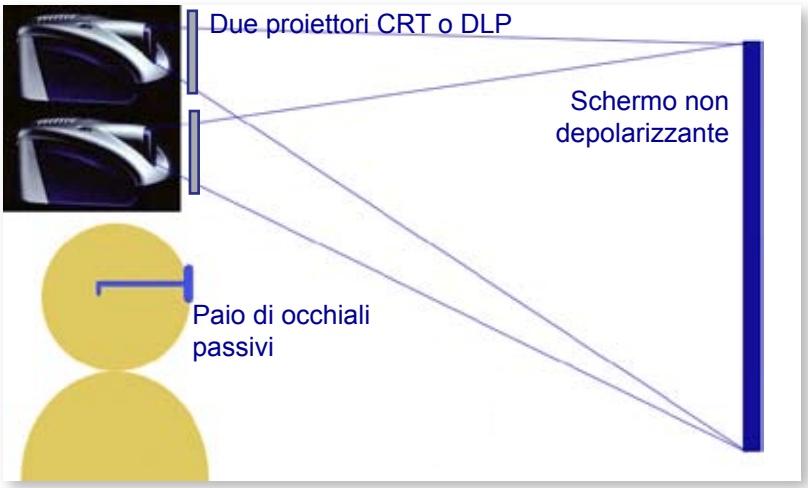


Fig. 12 – Schematizzazione di sistema di proiezione stereoscopica basato su coppia di proiettori e filtri polarizzatori.

Fig. 13 – Esempio di occhiali con filtri polarizzatori.

Nota 17 - Tale tipo di filtro è anche noto con la denominazione commerciale registrata di ZScreen.

Filtri polarizzatori commutabili[Nota 17]

Questi filtri sono basati su un pannello LCD che funge da filtro polarizzatore commutabile.

A seconda del valore del segnale di pilotaggio del pannello, il filtro genera una polarizzazione circolare destrorsa o sinistrorsa, cioè le due possibili soluzioni ortogonali per la polarizzazione circolare.

Ponendo tale pannello di fronte ad un display alimentato con un segnale a frequenza di quadro doppia, come illustrato in figura 14, e sincronizzando opportunamente il pannello con l'immagine visualizzata sul display, si ottiene una multiplazione temporale di immagini formate da luce polarizzata circolarmente, alternativamente destrorsa e sinistrorsa.

Fig. 14 – Monitor CRT con schermo polarizzatore commutabile, il relativo driver e occhiali polarizzatori.

Fig. 15 – Schematizzazione di sistema di proiezione stereoscopica basato su singolo proiettore e filtro polarizzatore commutabile.

Una variante del sistema, schematizzata in figura 15, prevede l'inserzione di un filtro polarizzatore commutabile davanti ad un proiettore alimentato con una sequenza multiplata temporalmente e quindi con frequenza di quadro doppia. Il resto del sistema è analogo a quello descritto in precedenza.

LCD con filtri polarizzatori integrati

La NHK (Nippon Hōsō Kyōkai) ha sviluppato un display sperimentale in cui i filtri polarizzatori circolari destrorsi e sinistrorsi sono posti a linee alterne davanti agli elementi costituenti i pixel di un pannello LCD-TFT.

In tal modo si è superato il problema della dimensione del pannello filtrante poiché i filtri sono integrati nel pannello in fase di costruzione.

Applicazioni televisive

Tutti i sistemi basati sulla polarizzazione sono sistemi di visualizzazione pura, nel senso che richiedono di essere alimentati con i due segnali costituenti la coppia stereoscopica, a prescindere dalle modalità con cui questi vengono prodotti, registrati o trasmessi.

In linea di principio, questi sistemi potrebbero essere utilizzati in ambito televisivo come sistemi di visualizzazione di qualità.

Analisi delle caratteristiche

Il sistema basato sulla polarizzazione è uno dei migliori per spettacoli pubblici su grande schermo poiché, oltre ad offrire una eccellente qualità soggettiva delle immagini, la gestione degli occhiali con filtri polarizzatori è sicuramente meno onerosa di quella che adotta occhiali shutter (la possibile alternativa di elevata qualità), per il minor costo degli occhiali e perché questi sono passivi e non hanno bisogno che di una minima manutenzione.

Anche se la trasparenza dei filtri polarizzatori non è totale[Nota 18], la perdita di luminosità è accettabile e la riproduzione del contrasto è elevata. La riproduzione colorimetrica è abbastanza buona, anche se i filtri di questo tipo sono caratterizzati da dominanti bluastre o color seppia.

I sistemi basati sulla polarizzazione lineare mostrano un effetto ghost inferiore poiché i filtri polarizzatori lineari hanno una reiezione alla polarizzazione ortogonale superiore ai filtri polarizzatori circolari. Tuttavia, in genere, anche i filtri economici di ambedue i tipi offrono una qualità sufficiente da questo punto di vista.

I sistemi basati su due proiettori presentano la difficoltà tecnica di richiedere un preciso allineamento dei proiettori. Se poi si adotta la polarizzazione lineare si aggiunge anche la difficoltà di allineare i filtri.

Lo schermo deve essere perfettamente riflettente per mantenere la polarizzazione, e pertanto in genere è metallizzato. I normali schermi per proiezione sono infatti diffondenti, quindi perdono la polarizzazione e non possono essere usati, però sono molto più luminosi e presentano angoli di visione maggiori rispetto a quelli riflettenti.

Una caratteristica del sistema basato su due proiettori, che può avere risvolti positivi, è che non richiede una sincronizzazione perfetta tra i due canali, il che può semplificare la realizzazione della sorgente del segnale stereoscopico[Nota 19].

I sistemi basati sui filtri polarizzatori commutabili necessitano di display funzionanti al doppio della frequenza di quadro e di un multiplatore temporale.

Inoltre, non è possibile produrre economicamente dei filtri di grandi dimensioni, pertanto è difficile trovare filtri commutabili da applicarsi a monitor con diagonale maggiore ai 21”. Per contro è possibile produrre dei filtri di questo tipo adatti per l’inserimento all’interno dei proiettori. In questo caso si semplifica il sistema in quanto si usa un solo proiettore, ma si complica il proiettore che deve funzionare a frequenza di quadro doppia.

Si noti che la luce emessa dai pannelli LCD e TFT è polarizzata poiché le celle LCD sono costituite da una serie di filtri polarizzatori. Gli stessi cristalli liquidi modificano l’orientamento del vettore polarizzazione a seconda della tensione di pilotaggio.

Pertanto, l’uso di filtri polarizzatori, sia circolari che lineari, con queste sorgenti deve essere considerato attentamente e, in genere, non è possibile associare liberamente filtri e display. Peraltro, alcuni produttori offrono degli apparati che includono negli LCD i filtri necessari.

Nota 18 - Un filtro polarizzatore lineare ideale dimezza l’intensità di un flusso luminoso non polarizzato.
Nota 19 - Presso il Centro Ricerche della Rai per un certo periodo si è utilizzata una sorgente a basso costo che generava segnali stereoscopici con uno sfasamento di mezzo semiquadro tra le due componenti stereo, senza che si avvertissero artefatti sensibili.

2.2 Tecniche basate sulle caratteristiche dei segnali

Uno dei metodi comunemente utilizzati nel campo telecomunicazionistico per trasmettere informazioni su di un canale, consiste nel sequenzializzarle e trasmetterle in tempi successivi (*time division multiplexing*). E' implicita la necessità di memorizzare le informazioni fino all'istante in cui possono essere veicolate sul canale.

Tale tecnica si adatta bene ai segnali in formato digitale, ma è spesso applicabile anche ad altri tipi di segnale, in particolare a quelli campionati. Infatti, generalmente i campioni sono degli impulsi di durata[Nota 20] breve rispetto al periodo di campionamento e quindi, in linea di principio, si prestano ad essere serializzati.

Il segnale televisivo è campionato nel tempo; anche se la scansione dell'intero quadro si svolge su un periodo temporale relativamente lungo e prefissato dagli standard (nello standard europeo è pari a 40 ms, corrispondente ad una frequenza di quadro pari a 25 Hz), si può ritenere che il singolo pixel venga campionato nella telecamera e riprodotto nel display in un periodo di tempo molto più breve.

Si ricorda che la scansione spaziale del quadro per righe, e dei quadri nel tempo, è un modo per campionare temporalmente e spazialmente l'informazione ottica della scena ripresa, che di per sé è continua nel tempo e nello spazio. In effetti il segnale televisivo si può considerare, con ottima approssimazione, una sequenza temporale di immagini bidimensionali ognuna costituente un *quadro*[Nota 21] televisivo.

In linea di principio è quindi possibile registrare, trasmettere e riprodurre più sequenze televisive sullo stesso canale o supporto di registrazione, semplicemente intervallando opportunamente nel tempo i quadri (o i semiquadri) ricavati dalle singole sequenze.

Nel seguito si analizzano due particolari realizzazioni basate su questo principio.

2.2.1 Multiplex temporale con raddoppio della frequenza di quadro

Principi di funzionamento

In questo sistema, un multiplatore temporale (figura 16) viene alimentato contemporaneamente[Nota 22] con i due segnali televisivi costituenti la coppia stereoscopica, e per ciascuno di essi ne registra un quadro (o semiquadro) per volta.

In uscita riproduce i quadri (o semiquadri) memorizzati, alternando i canali (quadro 1 del canale destro, quadro 1 del canale sinistro, quadro 2 del canale destro, quadro 2 del canale sinistro, ecc.) col conseguente raddoppio della frequenza di quadro (figura 17).

Per quanto riguarda la visualizzazione si possono adottare diverse tecniche, che hanno in comune l'utilizzazione di un singolo apparato visualizzatore (monitor o proiettore) come illustrato in figura 18.

Nota 20 - Per essere precisi, il modello di campione utilizzato nella teoria del campionamento è una distribuzione delta di Dirac di ampiezza appropriata e di durata nulla. Nella pratica, il campione si gene-ra analizzando il segnale da campionare in un intervallo molto breve, la cui durata dipende dalla tecnologia adottata. La riproduzione del campione in genere è una funzione porta di durata appropriata, non superiore al periodo di campionamento (inverso della frequenza di campionamento).
Nota 21 - L'intera immagine forma un quadro nei sistemi progressivi, tipici dei sistemi informatici. In campo televisivo tradizionalmente si scandisce l'immagine in due "passate", ognuna delle quali forma un semiquadro contenente la metà delle righe costituenti l'immagine; due semiquadri formano un'immagine completa (quadro).
Nota 22 - Per semplificare l'eleborazione, conviene spesso che i segnali in ingresso siano sincronizzati (con un segnale di genlock), quindi temporalmente coincidenti.

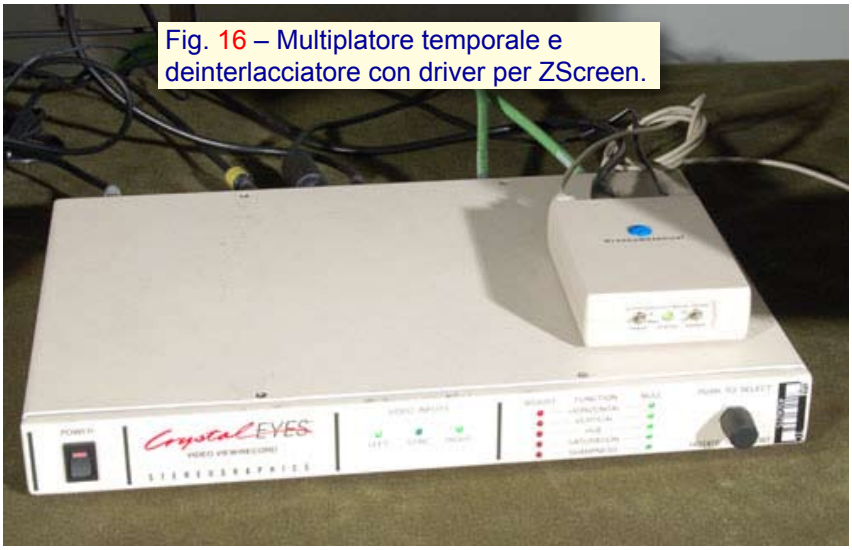


Fig. 16 – Multiplatore temporale e deinterlacciatore con driver per ZScreen.

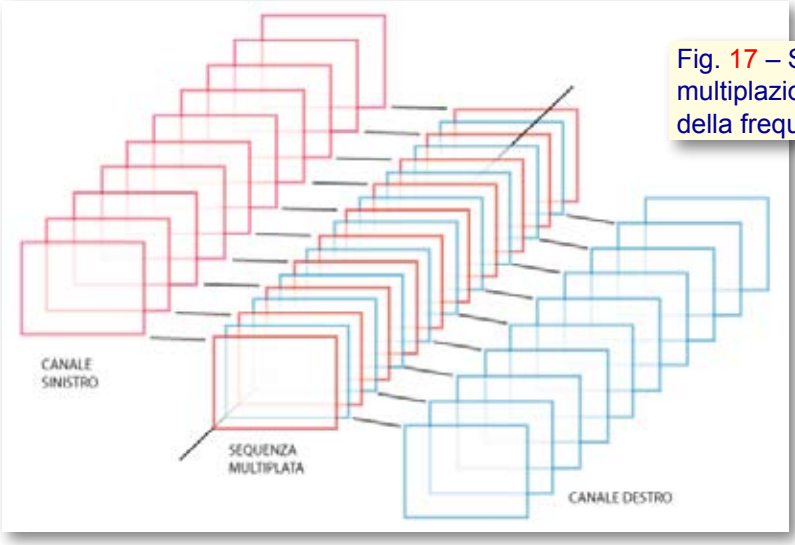


Fig. 17 – Schematizzazione della multiplazione temporale con raddoppio della frequenza di quadro.

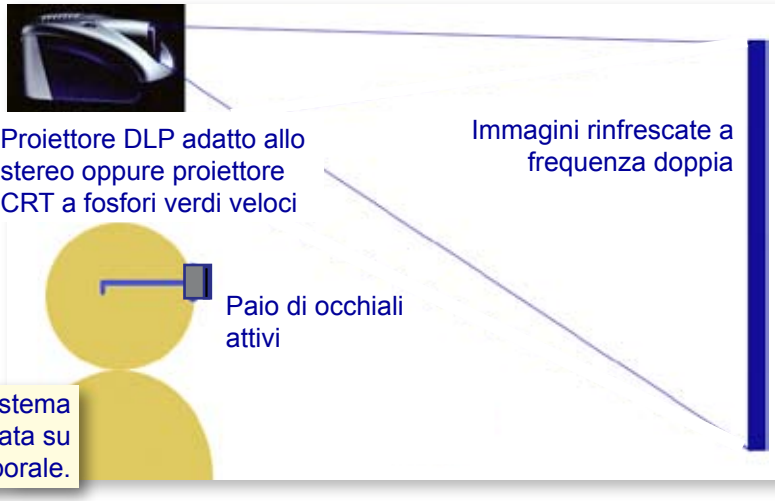


Fig. 18 – Schematizzazione del sistema di proiezione stereoscopica basata su multiplazione temporale.

Fig. 19a – Occhiali shutter.

Fig. 19b – Particolare del pannello LCD di occhiali shutter.
(fonte: sito sterero3d.com)

Occhiali shutter

Questo sistema è tradizionalmente associato agli occhiali attivi comunemente chiamati occhiali *shutter* (che corrisponde al temine italiano *otturatore*) (figure 19a e 19b).

Al posto delle lenti, questi occhiali hanno dei piccoli pannelli LCD che, a seconda del valore di un apposito segnale di controllo, sono trasparenti (figura 19b) od opachi. Il segnale di controllo è generato dalla circuiteria contenuta nella montatura degli occhiali, per questo si dice che gli occhiali sono *attivi*, ed è asservito al segnale di sincronismo trasmesso agli occhiali tramite cavo o collegamento ad infrarossi (IR) (figura 20).

La figura 21 illustra la tipica configurazione del visualizzatore, col trasmettitore IR posto sopra il monitor.

Fig. 20 – Trasmettitore a raggi infrarossi per il controllo degli occhiali shutter.

Rendendo alternativamente trasparenti od opachi i pannelli LCD posti davanti agli occhi dell'osservatore in sincronismo con il quadro visualizzato dal display, si ottiene la presentazione all'occhio corretto della sequenza corrispondente.

Tale tecnica si applica sia a monitor (figura 21) che a sistemi di proiezione[Nota 23].

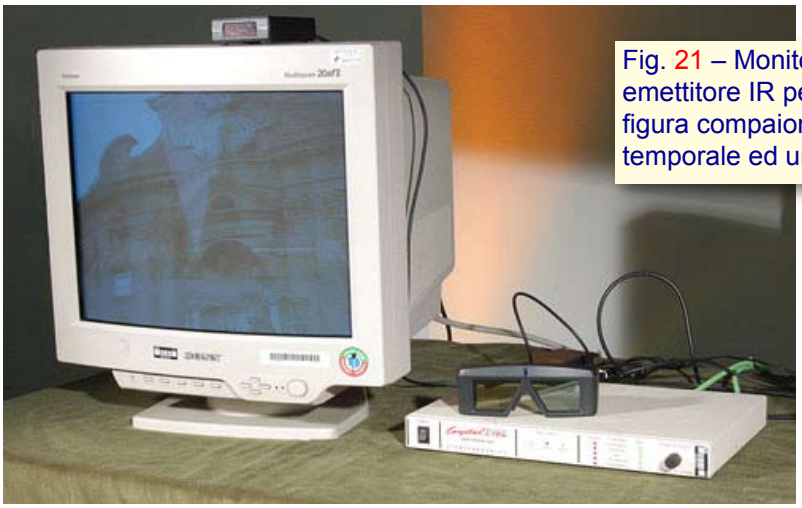


Fig. 21 – Monitor equipaggiato con emettitore IR per occhiali shutter (in figura compaiono anche un multiplatore temporale ed un paio di occhiali).

Nota 23 - Si ricorda che la multiplazione temporale è uno dei sistemi adottati dal sistema IMAX-3D.

Filtri polarizzatori commutabili

Un metodo alternativo consiste nell'utilizzare uno speciale filtro che commuti la polarizzazione della luce che lo attraversa tra due polarizzazioni ortogonali.

Di norma il filtro è realizzato tramite un pannello LCD e la polarizzazione ottenuta è di tipo circolare; la commutazione avviene tra polarizzazione circolare destrorsa e quella sinistrorsa[Nota 24] (figura 14).

La discriminazione tra i due segnali della coppia stereoscopica si effettua tramite occhiali passivi equipaggiati con filtri polarizzatori.

Infitec™ attivo

Un'ulteriore tecnica è il sistema Infitec™ attivo. La tecnica adottata nel sistema Infitec™ per proiettare e discriminare le componenti stereoscopiche è descritta in paragrafi precedenti cui si rimanda per approfondimenti.

Nel sistema Infitec™ attivo, la terna di primari viene commutata in sincronismo con il quadro della componente stereoscopica che si sta proiettando; i filtraggi necessari sono effettuati nel singolo proiettore utilizzato per la visualizzazione.

Gli occhiali da utilizzarsi sono del tipo passivo con i filtri ottici dicroici comunemente utilizzati per il sistema Infitec™.

Applicazioni

Anche questa è una tecnica di visualizzazione pura, nel senso che il multiplatore richiede di essere alimentato con i due segnali costituenti la coppia stereoscopica, a prescindere dalle modalità con cui questi vengono prodotti, registrati o trasmessi.

Pertanto potrebbe anche essere utilizzata in ambito televisivo come sistema di visualizzazione di qualità elevata.

Analisi delle caratteristiche

Il principale pregio di questo sistema è che le sequenze componenti la coppia stereoscopica sono presentate, singolarmente, con la propria frequenza di quadro originale, nel caso europeo 50Hz, e quindi sono esenti da flicker[Nota 25].

Il ritardo di mezzo periodo di scansione di quadro (l'inverso della frequenza di quadro) che subisce una delle due componenti la coppia stereoscopica, in genere non è avvertito e non origina difetti visivi.

Un ulteriore pregio è che si utilizza un solo apparato di visualizzazione o di proiezione. Oltre alla conseguente riduzione dei costi[Nota 26], le immagini risultano spazialmente coincidenti per la stessa costruzione dell'apparato di visualizzazione, caratteristica particolarmente importante nel caso dei sistemi a proiezione, per i quali l'allineamento dei proiettori risulta spesso problematico.

Le caratteristiche colorimetriche e fotometriche del sistema dipendono dal tipo di visualizzazione adottata (occhiali shutter, polarizzazione, Infitec™), ma sono generalmente di elevata qualità.

In genere gli occhiali shutter presentano una attenuazione luminosa sensibile - dimezzano l'energia luminosa incidente sugli occhi - che in questo caso viene compensata dal raddoppio della frequenza di quadro. Rispetto alle altre tecniche sono caratterizzati da un'elevata reiezione del segnale indesiderato, ma sono piuttosto pesanti e costosi.

Nota 24 - La Stereographics commercializza tale prodotto col marchio ZScreen; la NuVision offre prodotti analoghi.
Nota 25 - Per essere più precisi: non presentano un flicker maggiore di quelle originali.
Nota 26 - In realtà usare un solo proiettore potrebbe essere fonte di risparmio, ma questo, dovendo supportare una frequenza di quadro doppia, potrebbe essere molto più costoso di un proiettore "normale".

Per quanto riguarda la qualità dei sistemi a polarizzazione o Infitec™ si rimanda ai paragrafi precedenti.

La qualità complessiva del sistema a multiplazione temporale dipende anche dalla qualità delle elaborazioni effettuate dal multiplatore. Questo infatti, se opera con segnali analogici, deve digitalizzare i segnali per poterli memorizzare in attesa dell'istante corretto per presentarli all'uscita multiplata, e tale operazione è una possibile fonte di artefatti.

Inoltre, per utilizzare i visualizzatori di tipo informatico[Nota 27] che si rendono necessari perché, a differenza dei comuni display, supportano la frequenza di quadro raddoppiata, è necessaria un'operazione di deinterallacciamento del segnale televisivo in ingresso che è un'ulteriore potenziale sorgente di artefatti.

2.2.2 Field-Sequential

Principi di funzionamento

La tecnica di multiplazione temporale con raddoppio della frequenza di quadro necessita, come abbiamo visto, di apparati specifici.

Tuttavia, nel caso in cui si utilizzi la tecnica di visualizzazione con occhiali shutter, all'apparato di visualizzazione non si richiedono specifiche particolari, eccetto la capacità di operare con frequenze di quadro elevate, cosa che i monitor di tipo televisivo di norma non sono in grado di fare.

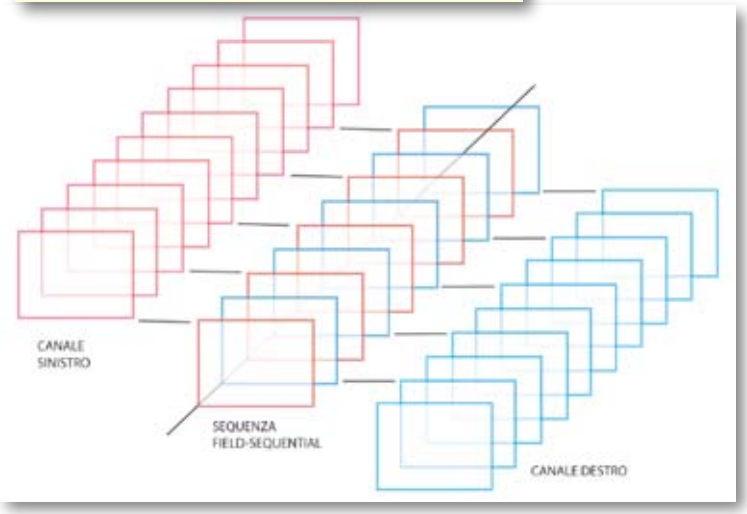
Perciò, volendo mantenere il principio della multiplazione temporale per goderne le caratteristiche positive[Nota 28] ma desiderando utilizzare apparati standard, si è sviluppata la tecnica chiamata *field-sequential*.

Come indica il nome, la sequenza multiplata è formata dai semiquadri delle componenti stereoscopiche sottocampionate temporalmente, intervallati nel tempo secondo la struttura seguente: semiquadro 1 del canale destro, semiquadro 2 del canale sinistro, semiquadro 3 del canale destro, semiquadro 4 del canale sinistro, e così via[Nota 29] (figura 22). Si noti che i semiquadri sono temporalmente posizionati in modo corretto, quindi le scene non subiscono ritardi relativi.

Applicazioni televisive

La sequenza multiplata è in tutto per tutto una sequenza televisiva standard e quindi può essere maneggiata con i normali apparati televisivi, in particolare quelli di tipo consumer.

Fig. 22 – Schematizzazione di multiplazione del tipo field-sequential.



Nota 27 - Sono comuni i monitor CRT. Esistono alcuni proiettori in grado di funzionare a frequenze di quadro pari o superiori a 100Hz, ma in genere i monitor con pannelli piatti (plasma e LDC/TFT) non sono in grado di funzionare a frequenze di quadro così elevate.
Nota 28 - Con particolare riferimento all'elevata reiezione al segnale indesiderato (assenza del ghost) che caratterizza gli occhiali shutter.
Nota 29 - I canali possono essere scambiati tra loro: la struttura indicata è solo indicativa della tecnica. Il punto fondamentale è che le singole sequenze costituenti la coppia stereo sono sottocampionate temporalmente: per generare la sequenza multiplata si prende alternativamente un semiquadro dell'una e un semiquadro dell'altra.

Fig. 23 – Sistema di visualizzazione del tipo field-sequential: sono visibili uno schermo al plasma, un lettore per DVD (dietro), un sincronizzatore (sotto) e, sopra lo schermo, un paio di trasmettitori IR per sincronizzare gli occhiali shutter.

Il punto cruciale consiste nell'estrazione, dalla sequenza multiplata, dei sincronismi atti a comandare gli occhiali shutter.

Mentre è piuttosto agevole estrarre i sincronismi intercettando il segnale (PAL, S-Video, in componenti) tra una sorgente esterna, per esempio un lettore DVD, e il monitor televisivo[Nota 30], in genere non è possibile estrarre i sinconismi dal ricevitore incluso nel televisore.

Per questo motivo questo sistema è limitato ad applicazioni che si possono definire *home stereo*: cioè la visualizzazione casalinga di materiale televisivo stereoscopico.

Sul mercato esistono sistemi consumer a prezzo relativamente basso, che vengono proposti in associazione a materiale audiovisivo registrato su DVD. La scelta del supporto è tecnicamente al passo coi tempi, ma in linea di principio sarebbe possibile anche utilizzare dei supporti magnetici quali le cassette (figura 23).

Analisi delle caratteristiche

La principale caratteristica di questo sistema è la presenza di un forte flicker dovuto al sottocampionamento temporale delle singole componenti stereoscopiche: infatti all'occhio dell'osservatore ognuna di queste appare come una sequenza di immagini con frequenza di quadro dimezzata (nel sistema europeo, pari a 25 Hz). Ciò diminuisce anche la luminosità, perché solo la metà delle immagini – e quindi dell'energia luminosa - viene ricevuta dal singolo occhio.

Tuttavia, la possibilità di utilizzare lettori DVD e (teoricamente) collegamenti video in componenti in bassa frequenza, permette al sistema di offrire una discreta qualità in termini di definizione.

L'adozione di occhiali shutter implica un effetto ghost trascurabile e quindi un'ottima riproduzione dell'effetto prospettico oltre ad una buona riproduzione colorimetrica.

Nota 30 - Con particolare riferimento a sistemi di *home stereo* disponibili sul mercato.

2.3 Tecniche basate sulle caratteristiche del sistema di visione

In questo capitolo si descrivono tecniche in cui la separazione dei canali, ossia la veicolazione del canale corretto all'occhio corrispondente, viene ottenuta grazie alla geometria fisica ed ottica dell'apparato visualizzatore.

2.3.1 Casco HMD (Head Mount Display)

Principi di funzionamento

In sostanza, gli Head Mount Display sono degli aggeggi che permettono di posizionare due schermi di piccole dimensioni, in genere LCD, direttamente di fronte agli occhi dell'osservatore (figura 24).

In linea di principio, l'alimentazione dei due schermi con la coppia stereoscopica può essere completamente indipendente e i segnali non devono necessariamente essere sincronizzati tra loro.

Applicazioni televisive

Attualmente il sistema è principalmente utilizzato in associazione ad applicativi informatici di tipo ludico o in applicazioni speciali, soprattutto militari. Non si rilevano utilizzazioni in campo televisivo.

Fig. 24 – Apparato HMD
(fonte: www.vrlogic.com)

Analisi delle caratteristiche

La qualità delle immagini è direttamente collegata alla qualità degli schermi dell'HDM, che attualmente non raggiungono definizioni elevatissime[Nota 31] anche perché di piccole dimensioni.

La luminosità, il contrasto e la riproduzione colorimetrica sono quelle tipiche dei pannelli adottati, in genere di tipo LCD-TFT e quindi, in linea di massima, risulta buona.

In genere si tratta di apparati relativamente costosi e non particolarmente agevoli da indossare. Tuttavia questi difetti sono accettabili in certe applicazioni dove si richiede un'elevatissima immersività (applicativi ludici avanzati) o la visualizzazione contemporanea di molte informazioni con presentazione virtuale o semivirtuale dell'ambiente operativo (applicazioni militari particolari).

2.3.2 Schermi autostereoscopici

La percezione della prospettiva è basata sulla visione parallattica, ossia dal fatto che gli occhi osservano la stessa scena da due prospettive leggermente differenti.

Lo scopo degli apparati autostereoscopici consiste nel riprodurre due o più prospettive (viste) della stessa scena, separandole in modo che gli occhi dell'osservatore ne possano vedere due differenti per volta (figura 25).

Se le prospettive sono più di due, si può fare in modo che l'osservatore possa muoversi davanti allo schermo osservando la coppia di viste relativa al punto di osservazione.

La separazione delle viste avviene sfruttando la geometria della configurazione di visione. In linea di principio esistono due metodi: gli schermi a *barriera* e quelli a *microlenti*.

Nota 31 - Dalla ricerca in rete appositamente effettuata, si ricava che la risoluzione più frequente sia 800*600. Alcuni apparati di pregio offrono risoluzione pari a 1280*1024.

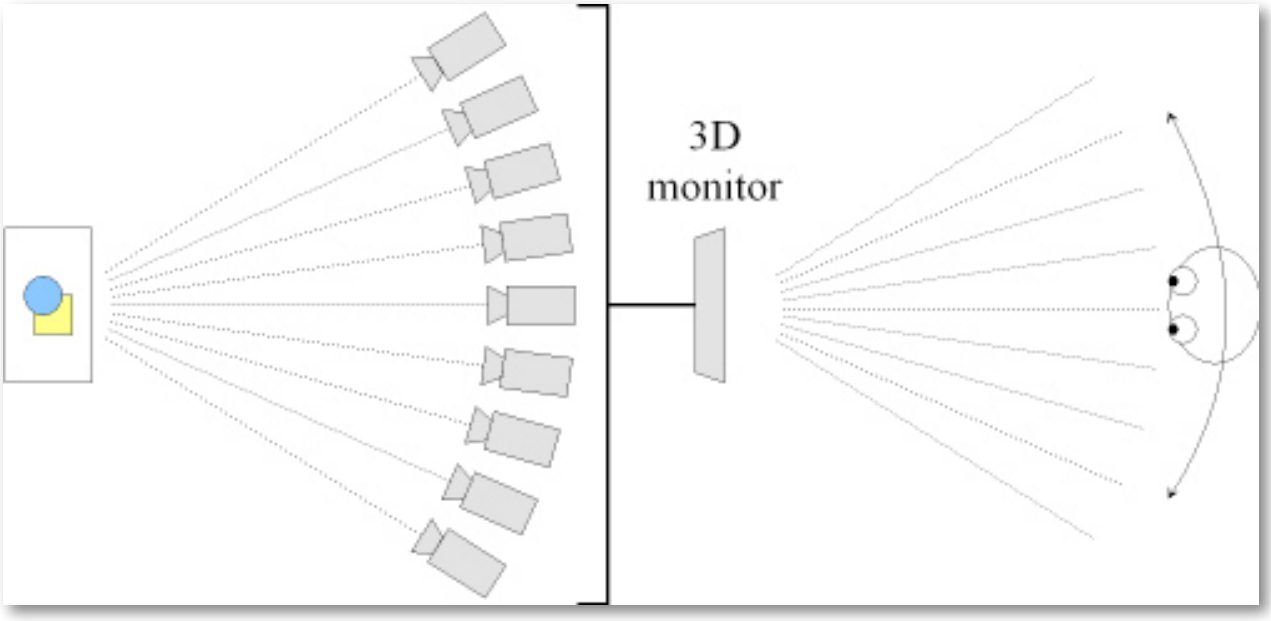


Fig. 25 – Schematizzazione del principio di funzionamento dei display autostereoscopici.

Schermi autostereoscopici a barriera di parallasse

Principi di funzionamento

Normalmente i display autostereoscopici a barriera sono basati su di un pannello LCD modificato.

Le particolari realizzazioni dei vari produttori cambiano leggermente soprattutto per quanto riguarda le modalità di realizzazione della barriera parallattica, ma i principi di base del funzionamento del display rimangono sostanzialmente identici.

Nella forma più tradizionale dell'apparato, le due immagini costituenti la coppia stereoscopica sono suddivise in strisce verticali, ognuna associata ad una colonna di pixel del pannello LCD.

Le immagini sono visualizzate contemporaneamente e le colonne di pixel sono associate alternativamente all'una o all'altra delle due componenti stereoscopiche.

Una barriera anteposta al pannello LCD, grazie alla parallasse oculare, rende visibile all'occhio corretto solo la componente stereoscopica relativa (figura 26), mascherando quella non corrispondente.

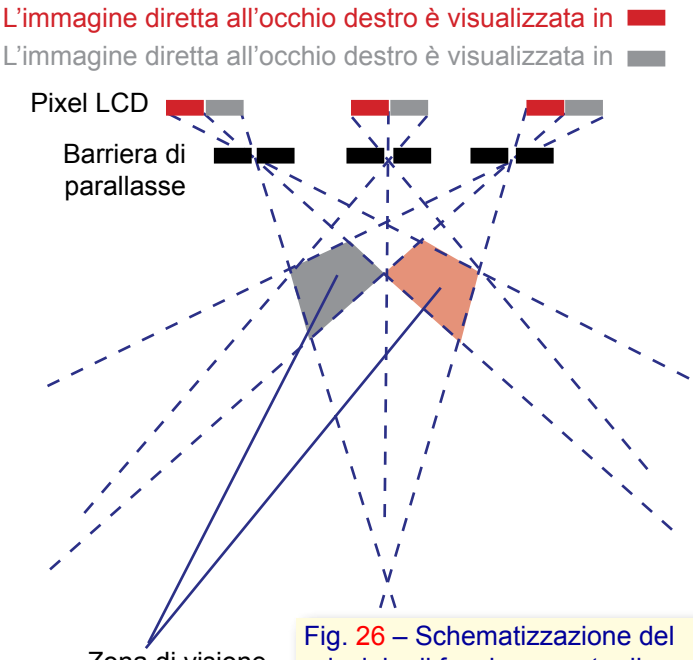


Fig. 26 – Schematizzazione del principio di funzionamento di uno schermo autostereoscopico a barriera. (fonte: www.3dweb.org.uk)

In alcune realizzazioni la retroilluminazione del pannello LCD non è omogenea, ma viene realizzata tramite delle sorgenti luminose a forma di striscia verticale (figura 27a). L'effetto è analogo a quello ottenibile con una barriera di mascheramento (figura 27b).

Nel sistema "basico" la visualizzazione stereoscopica avviene solamente in certe posizioni, determinate dalla geometria del sistema apparato-osservatore (gli occhi dell'osservatore devono ricadere nelle "zone di visione" illustrati in figura 26); è sufficiente che l'osservatore si sposti anche solo di pochissimi centimetri perché la visione stereoscopica svanisca.

Per ovviare a questo inconveniente, sono stati sviluppati dei display muniti di un sistema di *head-tracking*, capace di individurare la posizione della testa dell'osservatore rispetto al monitor. In questi apparati, l'attivazione delle sorgenti luminose lineari componenti il pannello di illuminazione dell'LCD viene controllata di modo da ottenere un effetto paragonabile allo spostamento della barriera di mascheramento. Di conseguenza si ottiene il posizionamento delle zone in cui è percepibile l'effetto stereoscopico in corrispondenza della posizione degli occhi dell'osservatore.

Esistono inoltre dei sistemi che, al fine di non subire il dimezzamento della definizione orizzontale tipica della tecnica di base, utilizzano alternativamente ambedue i sottoinsiemi di pixel e modificano opportunamente la barriera.

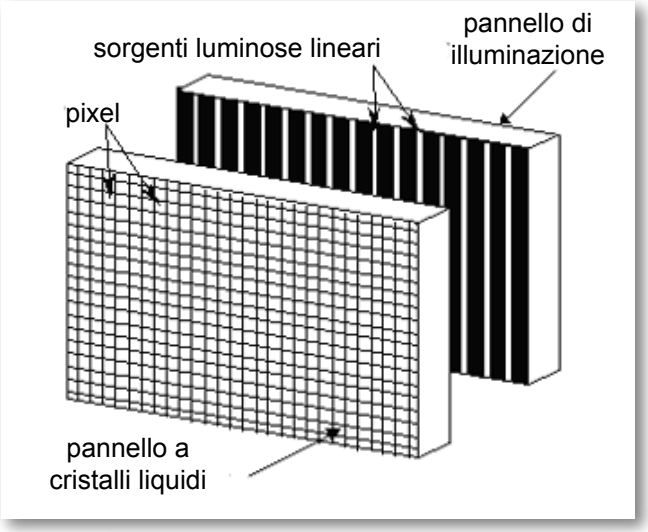


Fig. 27a – Illuminazione del pannello LCD tramite sorgenti luminose a striscia.
(fonte: www.lithium.it)

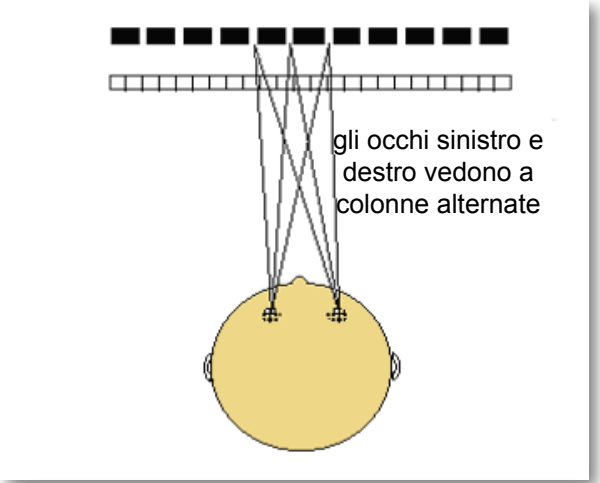


Fig. 27b – Schematizzazione del principio di funzionamento del display di fig. 27a.
(fonte: www.lithium.it)

Applicazioni televisive

Si tratta anche in questo caso di una tecnica di visualizzazione pura, nel senso che il display (figura 28) richiede di essere alimentato con i due segnali costituenti la coppia stereoscopica, a prescindere dalle modalità con cui questi vengono prodotti, registrati o trasmessi.

Il sistema è inerentemente *single-user*, cioè adatto alla visione da parte di un solo utente. I sistemi dotati di head-tracking permettono all'utente di

Fig. 28 – Schermi autostereoscopici a barriera.

muoversi, ma non permettono di incrementare il numero di osservatori.

Per questo motivo si ritiene che questa tecnologia non sia adatta ad applicazioni di tipo televisivo, eccetto nei casi in cui si preveda un'utenza monoutente, come per i terminali mobili.

Analisi delle caratteristiche

La riproduzione colorimetrica offerta da questo tipo di tecnologia è quella tipica del pannello LCD su cui gli apparati sono basati.

La luminosità risulta ridotta, sia che si tratti di barriere di mascheramento reali o virtuali; nel primo caso a causa del mascheramento operato dalla barriera, nel secondo a causa della ridotta superficie emittente delle sorgenti luminose lineari.

In ogni caso si rileva il dimezzamento della definizione orizzontale del pannello, dato che questo deve visualizzare contemporaneamente due immagini costituenti la coppia stereoscopica.

Schermi autostereoscopici a microlenti

Principi di funzionamento

Sul pannello "piatto"[Nota 32] che costituisce l'apparato visualizzatore, viene sovrapposta una sottile lamina trasparente composta da lenti semicilindriche o semisferiche di piccole dimensioni[Nota 33] (figura 29), ad una distanza tale che la superficie del pannello coincida con il piano focale delle lenti.

La diffrazione della luce operata dalle lenti permette di dirigere la luce emessa dai pixel del pannello nella direzione voluta: un osservatore che si trovi esattamente di fronte allo schermo vedrà i pixel che si trovano in corrispondenza al centro di ciascuna lente, mentre un osservatore che si trovi disassato vedrà altri pixel, non corrispondenti al centro delle lenti (figura 30).

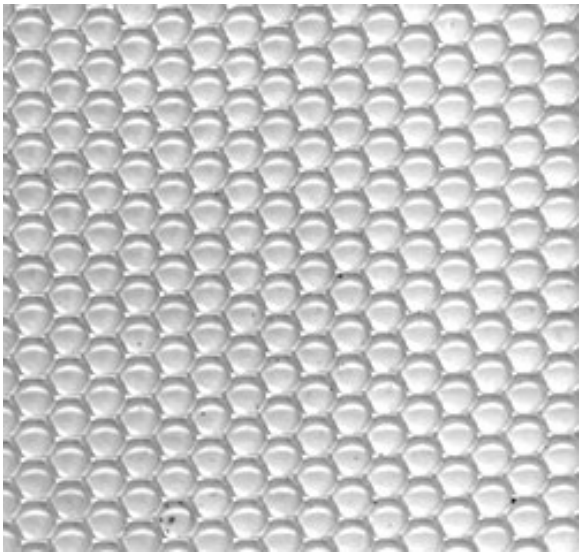


Fig. 29 – Microlenti
(fonte: http://www.lenstar.org/history/ch2.htm)

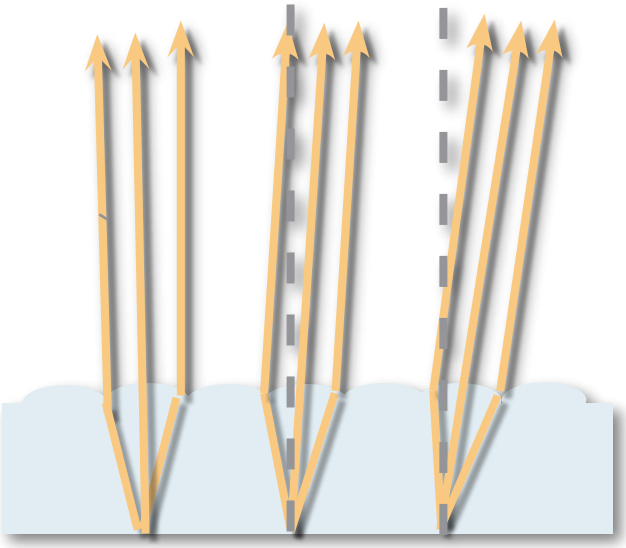


Fig. 30 – Diffrazione delle microlenti.

Nota 32 - Esistono apparati basati sia su LCD-TFT che su pannelli al plasma.
Nota 33 - Ogni lente deve coprire una matrice formata da pochi pixel (da un minimo di 5 ad un massimo 9; in questo caso potrebbero essere disposti secondo una matrice 3x3).

A causa della parallasse associata alla visione binoculare, per ogni microlente gli occhi vedono due pixel differenti. Complessivamente, quindi, ogni occhio osserva un insieme di pixel (ciascun pixel associato ad una microlente) differente dall'altro.

Associando le immagini componenti la coppia stereoscopica a questi insiemi di pixel si ottiene la visione stereoscopica (figura 31).

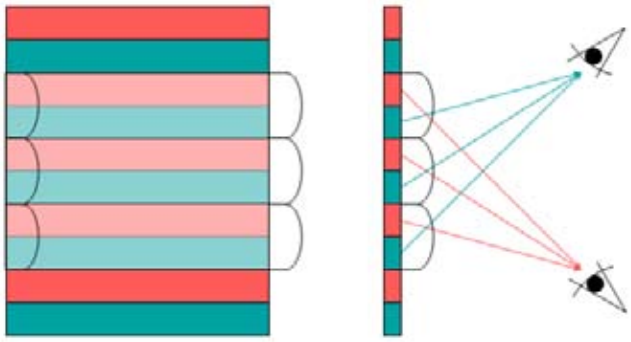


Fig. 31 – Schematizzazione della visione stereoscopica con display a microlenti.

Per ottenere un elevato angolo di visuale di fronte allo schermo, utile per lasciare libertà di movimento all'osservatore e per una utilizzazione multiutente, si utilizzano più insiemi di pixel, posizionati sul pannello in modo che ogni insieme illumini un settore di spazio differente (figura 32).

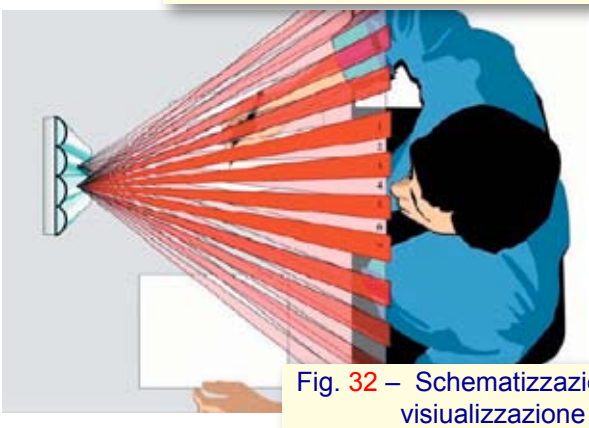


Fig. 32 – Schematizzazione della visiualizzazione a settori.

In questo modo, ad ogni angolo di visuale si può associare un'immagine che riproduca l'oggetto osservato da quello specifico angolo di osservazione. Per questo motivo ogni insieme di pixel associato ad un settore si indica con il termine *vista*.

Tale tecnica si può adottare anche per la visione stereoscopica posto di utilizzare una coppia di insiemi di pixel per ogni vista.

Il posizionamento dei singoli pixel costituenti l'insieme di sorgenti che generano una vista viene ottimizzato di modo da ottenere una transizione graduale tra un settore di visualizzazione e quelli adiacenti (figura 33), nonché la riduzione degli effetti ottici indesiderati generati dalle microlenti (in particolare l'effetto moiré).

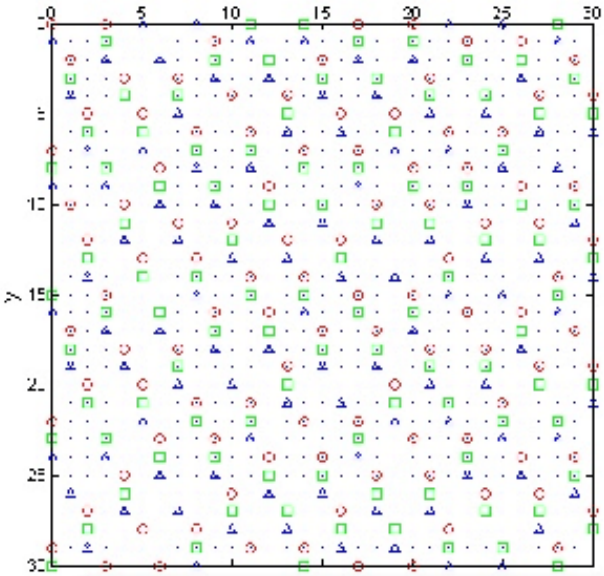


Fig. 33 – Esempio di disposizione dei pixel costituenti le viste in un display autostereoscopico a microlenti.
(fonte: iss.bu.edu/pagniel/Research/Subsampling/subsampling.html).
Il particolare tipo di posizionamento dei pixel illustrato in figura si chiama Interzigging ed è stato sviluppato dalla Stereographics Corp.

Ad una certa disposizione dei pixel corrisponde una disposizione o una forma particolare delle microlenti. Per esempio, in figura 34 si illustra un metodo basato su lenti semicilindriche inclinate rispetto alla verticale.

Applicazioni televisive

Attualmente questi schermi non sono adatti ad usi televisivi.

Vengono invece commercializzati per usi pubblicitari[Nota 34] e alimentati tramite apparati informatici perché l'elaborazione necessaria per generare le varie viste viene effettuata non in tempo reale in fase di generazione delle sequenze (raramente si tratta di scene dal vero) o in fase di post-produzione.

Tuttavia, questa è l'unica tecnologia di visualizzazione attualmente disponibile che offra ottime qualità fotometriche (luminosità e contrasto elevati) e ottima riproduzione colorimetrica, che sia adatta all'uso multiutente, che non richieda un posizionamento specifico dell'utente e che non necessiti di accessori da indossare da parte dell'osservatore.

In altre parole, potrebbe essere considerata la tecnologia di elezione per usi televisivi se non fosse per i problemi descritti in seguito che al giorno d'oggi la limitano ad usi diversi.

Analisi delle caratteristiche

Questa tecnica ha due problemi principali.

Il primo è che il display necessita di un numero [Nota 35] di viste superiore alle due che formano la coppia stereoscopica, il secondo è che la risoluzione dei pannelli attualmente disponibili non permette di visualizzare le singole viste con una definizione ritenuta sufficiente.

Nota 34 - Gli apparati con schermo di grandi dimensioni (all'incirca 40") sono proposti per la visualizzazione di clip pubblicitarie in grandi spazi quali aeroporti o grandi magazzini. Apparati con schermi di dimensioni inferiori (p.es. 8") sono pensati per equipaggiare distributori automatici di bibite o simili, oppure per la visualizzazione di clip pubblicitarie su mezzi pubblici (p.es. taxi).
Nota 35 - In genere si usano tra le 5 e le 9 viste. Con meno di 5 viste la visualizzazione stereoscopica avviene con un angolo di visione troppo limitato, mentre un numero di viste maggiore di 9 non si rilevano miglioramenti apprezzabili.

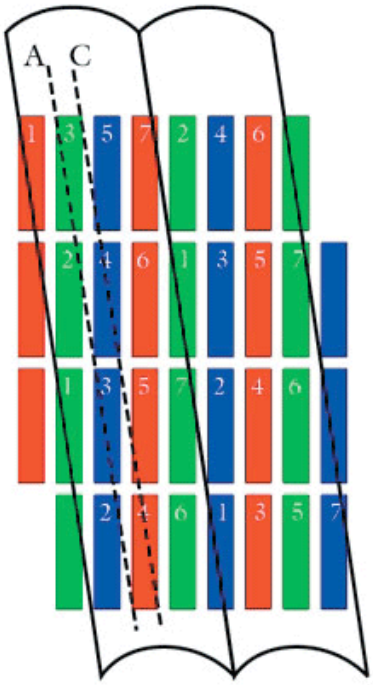


Fig. 34 – Microlenti semicilindriche inclinate.

Attualmente sul mercato esiste una famiglia di display in grado di calcolare le viste mancanti a partire da un segnale video associato ad una mappa di profondità. Questo sistema potrebbe essere di interesse nel futuro per applicazioni televisive in quanto richiede di essere alimentato con due soli segnali, ma bisognerebbe valutarne a fondo le caratteristiche poiché, almeno in teoria, è passibile di artefatti stereoscopici, in particolare il cardboard effect, i cui effetti sulla qualità soggettiva sono da valutare.

Altri display richiedono invece di essere alimentati con tutte le viste previste dalla specifica realizzazione tecnologica, eventualmente sottocampionate spazialmente per adattarle alla definizione del monitor.

In genere tali segnali sono generati con sistemi di computer grafica e adattati al monitor in fase di post-produzione. La generazione di molte viste utilizzando altrettante telecamere è un metodo evidentemente poco proponibile se non per sistemi sperimentali.

La necessità di visualizzare contemporaneamente diverse viste porta di conseguenza anche a ridurre la definizione effettiva del pannello del display. Per esempio, i sistemi basati su 9 viste usano in genere matrici di pixel di dimensione 3x3, e quindi limitano ad un terzo la definizione orizzontale e verticale del pannello adottato nel display.

Questa tecnologia potrebbe avere uno sviluppo significativo in futuro[Nota 36], in particolare se si riusciranno a sviluppare dei pannelli con un numero significativamente superiore di pixel (per esempio adatti alla Ultrahigh Definition TV), i quali permetterebbero di ottenere le diverse viste necessarie con definizione HDTV o superiore.

Si noti che gli schermi autostereoscopici a microlenti sono inerentemente adatti alla tecnologia chiamata Integral Imaging, che è una tecnica stereoscopica con diverse caratteristiche interessanti[Nota 37] che potrebbe avere uno sviluppo nel prossimo futuro.

Bibliografia

1. G.Colace, M.Muratori: “Televisione stereoscopica, le basi della tecnica stereoscopica”, Elettronica e Telecomunicazioni, n. 2, Agosto 2004 (www.crit.rai.it)
2. Wikipedia – voce: “Polarizzazione della radiazione elettromagnetica”, http://it.wikipedia.org/wiki/Polarizzazione_della_radiazione_elettromagnetica
3. Alonso, Finn: “Elementi di fisica per l’università – II campi e onde”, Inter European Editions
4. M.Muratori: “Tecniche di visualizzazione stereoscopica basate sulla frequenza: anàglifo e Infitec™”, Elettronica e Telecomunicazioni, n. 2, Agosto 2007, (www.crit.rai.it)
5. E. Perucca: “Dizionario di ingegneria”, UTET
6. Jorke, Fritz: “Infitec – A New Stereoscopic Visualization Tool by Wavelength Multiplex Imaging”, Infitec GmbH (info@infitec.net)

Nota 36 - La tecnica dell’Integral Imaging ha notevoli caratteristiche positive e sembra promettente. Al momento è limitata dal numero di celle sensibili nei sensori delle telecamere e dal numero di pixel dei display.
Nota 37 - Per la quale si dovranno sviluppare anche sensori per telecamera dotati di un numero notevol-mente superiore di celle rispetto a quelli attuali.