

# Televisione stereoscopica l'effetto Pulfrich

ing. Mario **Muratori**  
**Rai**  
Centro Ricerche e  
Innovazione Tecnologica  
Torino

## 1. Introduzione

La percezione della profondità della scena notoriamente rende più coinvolgente la visione di spettacoli visivi quali il cinema e la televisione.

Le tecniche stereoscopiche risultano attualmente le uniche, in linea di massima, applicabili a cinema e televisione per ottenere questo risultato.

Senza l'aggiunta di accessori specifici, l'attuale sistema televisivo non permette la visione di una coppia stereoscopica, fatta eccezione per l'anaglifo. Questa tecnica, tuttavia, a causa delle caratteristiche del sistema televisivo<sup>Nota 1</sup> non offre una buona qualità e, inoltre, non risulta perfettamente compatibile col sistema televisivo standard, in quanto gli osservatori sprovvisti degli appositi occhiali con filtri colorati vedono immagini di qualità scadentissima.

Per ovviare a questi problemi, è possibile sfruttare un'illusione ottica nota come effetto Pulfrich, dal nome del fisico che lo scoprì

e lo descrisse per primo nel 1922 [1]. La tecnica è pienamente compatibile con il sistema televisivo, in quanto l'illusione nasce dal movimento dei soggetti inquadrati in combinazione con l'adozione di occhiali specifici. Siccome trattasi di illusione e non di vera stereoscopia, l'effetto tridimensionale non è pienamente controllabile e si verifica solo in particolari condizioni analizzate in questo articolo.

Nota 1 - In particolare a causa della limitazione della banda dei segnali di croma.

### Sommario

Le tecniche stereoscopiche non sono compatibili con l'attuale sistema televisivo e non possono quindi essere utilizzate nonostante che la percezione della profondità renda più gradevole lo spettacolo televisivo. Per ovviare a questo inconveniente si può sfruttare un'illusione ottica nota come "effetto Pulfrich" che, nelle particolari condizioni descritte nell'articolo, può dare sensazioni simili a quelle ottenibili con le tecniche stereoscopiche.

Il non trascurabile pregio del metodo è di essere pienamente compatibile con il sistema televisivo attuale, ma richiede tecniche di ripresa particolari e l'uso di occhiali specifici.

## 2. L'effetto Pulfrich

### 2.1 Premessa

Vi sono diverse illusioni ottiche causate dalla presentazione dicotica<sup>Nota 2</sup> di stimoli luminosi, tra cui quelle causate dal diverso ritardo con cui gli stimoli luminosi arrivano al cervello. In particolare si citano l'effetto Mach-Dvorak<sup>Nota 3</sup> e l'effetto Pulfrich che è analizzato in questo lavoro.

Nei primi anni del '900, Carl Pulfrich<sup>Nota 4</sup> era considerato un'autorità nel campo della stereoscopia e nella progettazione di strumenti stereoscopici. Curioso il fatto che perse la vista da un occhio, probabilmente a causa di un incidente subito in giovane età, sicché non percepì mai l'illusione ottica che prende il suo nome ([14]).

L'effetto Pulfrich venne descritto dettagliatamente da Pulfrich stesso in un articolo del 1922 ([1]), ma già in precedenza alcuni ricercatori notarono l'illusione ottica

lavorando con stereocomparatori, percependola però come disturbo e ritenendola originata da un difetto dello strumento.

La Zeiss, costruttore degli strumenti incriminati, incaricò Franke e F. Fertsch di studiare il problema. Quest'ultimo si rese conto che il fenomeno era causato dalla differenza di intensità luminosa incidente sui due occhi e lo spiegò in termini di differenza di latenza percettiva. Il figlio di Pulfrich, Hans, analizzò teoricamente le curve descrittive le traiettorie percepite. Pulfrich si accreditò l'idea che il fenomeno potesse essere utilizzato nella fotometria eterocromatica<sup>Nota 5</sup>.

### 2.2 Principio

L'effetto Pulfrich è un'illusione ottica per la quale un oggetto che si muove in un piano parallelo alla fronte dell'osservatore sembra muoversi al di fuori di tale piano, avvicinandosi o allontanandosi a seconda delle condizioni. L'illusione è stereoscopica in quanto non si verifica con vista monoculare.

Nota 2 - Stimolazione dicotica: presentazione contemporanea a due recettori dello stesso individuo (per esempio: i due occhi, le due orecchie) di due stimoli differenti. Stimolazione binotica: presentazione contemporanea a due recettori dello stesso individuo di due stimoli uguali. Stimolazione monotica: presentazione di un solo stimolo a un singolo recettore.

Nota 3 - L'effetto Mach-Dvorak genera l'illusione di profondità a causa del moto apparente di stimoli luminosi lampeggianti che giungono agli occhi sfalsati nel tempo. Mentre l'effetto Pulfrich si può spiegare con la differenza di latenza retinica in dipendenza dall'intensità luminosa dello stimolo, l'effetto Mach-Dvorak è causato dallo sfalsamento temporale con il quale sono emessi gli stimoli luminosi, e non dipende quindi dal sistema percettivo dell'osservatore.

Nota 4 - Carl Pulfrich nacque il 24 settembre 1858 a Dusseldorf, Germania. Studiò fisica, matematica e mineralogia all'università di Bonn. Ottenne il dottorato nel 1881. Dopo un breve periodo durante il quale svolse il servizio militare, insegnò e svolse attività di ricerca, entrò a far parte della Zeiss di Jena, Germania, nel 1890, dove rimase fino alla sua morte avvenuta nel 1927 per annegamento nel Mar Baltico, a causa del ribaltamento della sua canoa. Dalle sue pubblicazioni si deduce che ci furono tre fasi principali nella sua carriera: dal 1885 al 1899 si occupò di rifrattometria, dal 1899 al 1920 di stereoscopia e, infine, dal 1920 al 1927 il suo interesse fu rivolto alla fotometria. ([14]).

Nota 5 - Parte dell'ottica che si occupa della definizione e misurazione di quelle grandezze (quantità di luce, illuminamento, luminanza ecc.), che servono ad individuare le caratteristiche energetiche e gli effetti sull'occhio di un fascio di radiazioni luminose (sapere.it).

Per percepire il fenomeno, un occhio deve essere oscurato al fine di determinarne l'aumento della latenza visiva e, di conseguenza, il ritardo con cui l'immagine percepita dall'occhio raggiunge il cervello.

Per spiegare il fenomeno si faccia riferimento alla figura 1. Si assumano le seguenti posizioni:

- l'occhio oscurato è quello destro,  $O_d$ ;
- gli spostamenti del riferimento mobile  $P$  sono relativamente piccoli e avvengono nei dintorni del punto di fissazione  $P_f$ , nell'ambito dell'Area di Panum;
- il movimento del riferimento mobile  $P$  avviene sul piano  $\pi$ , parallelo al piano  $\sigma$  contenente i centri ottici oculari, e perpendicolare alla retta congiungente il punto di fissazione  $P_f$  con il punto medio del segmento congiungente i centri ottici oculari  $O_s$  e  $O_d$ ;
- la velocità  $v$  del riferimento mobile  $P$  è costante<sup>Nota 6</sup>;

Si supponga che all'istante  $t_1$  il punto di riferimento mobile  $P$  si trovi in corrispondenza del punto  $A$ .

La sua immagine proiettata sulla retina sinistra raggiunge il cervello dopo il tempo di latenza  $t_s$ , quindi nell'istante  $t_2 = t_1 + t_s$ . Nel frattempo il riferimento mobile avrà raggiunto il punto  $B$ , avendo percorso una distanza  $\Delta_s = v t_s$ .

La sua immagine proiettata sulla retina destra, invece, raggiunge il cervello dopo il tempo di latenza  $t_d$ , maggiore di  $t_s$  a causa dell'oscuramento dell'occhio, quindi nell'istante  $t_3 = t_1 + t_d$ . Nel frattempo il riferimento mobile avrà raggiunto il punto  $D$ , avendo percorso una distanza  $\Delta_d = v t_d$ .

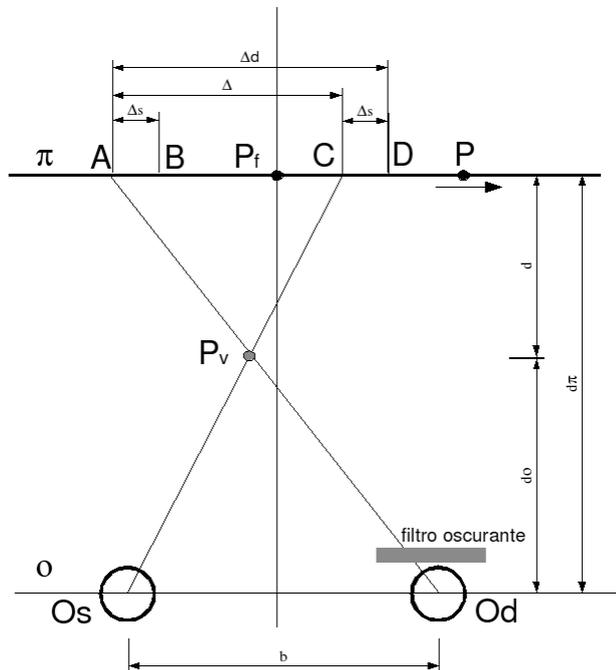


Fig. 1 – Schema geometrico per spiegazione effetto Pulfrich, punto di riferimento in spostamento verso destra

L'immagine proveniente dall'occhio sinistro che raggiunge il cervello all'istante  $t_3$  deriva dalla percezione del riferimento mobile quando questo si trova nel punto  $C$ , anticipato di  $\Delta_s$  rispetto al punto  $D$ .

Pertanto, all'istante  $t_3$  il cervello si trova ad elaborare un'immagine proveniente dall'occhio sinistro che percepisce il riferimento mobile  $P$  nel punto  $C$ , e un'immagine proveniente dall'occhio destro che percepisce il riferimento mobile  $P$  nel punto  $A$ . Componendo le due percezio-

**Nota 6** - Si noti che la spiegazione "classica" dell'effetto Pulfrich si basa sul movimento di un pendolo, in realtà mai usato da Pulfrich nei suoi strumenti costruiti per dimostrare l'effetto omonimo. Il movimento pendolare è caratterizzato da velocità non costante, il che implica una maggiore difficoltà di trattazione e non viene perciò considerato in questo lavoro.

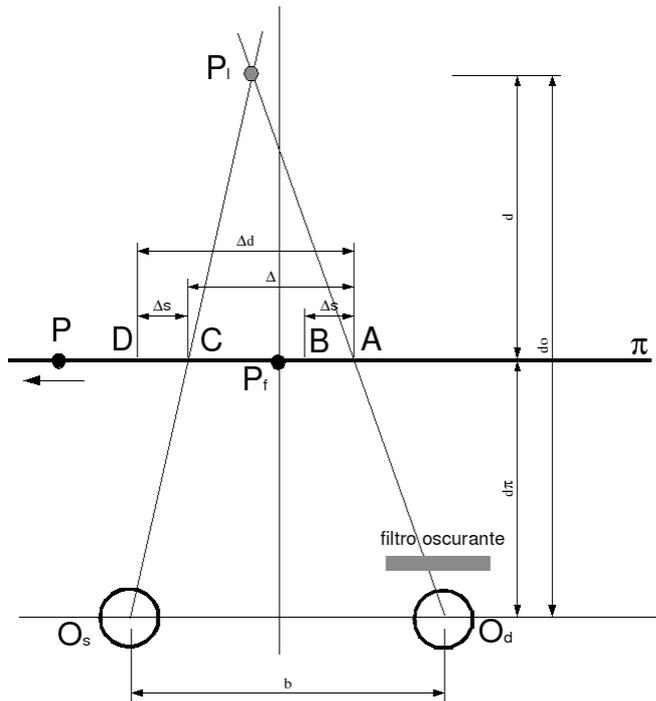


Fig. 2 – Schema geometrico per spiegazione effetto Pulfrich, punto di riferimento in spostamento verso sinistra

ni, si ottiene l'illusione che il riferimento mobile sia posizionato nel punto  $P_v$ , non facente parte del piano  $\pi$ , anzi, in particolare, percepito "al di qua", ossia più vicino, di tale piano.

Sfruttando la similitudine dei triangoli  $AP_vC$  e  $O_sP_vO_d$ , si ricava che lo scostamento  $d$  dal piano  $\pi$  è dato dalla relazione:

$$(1) \quad d = \Delta d_\pi / (b + \Delta)$$

dove:

- $v$  è la velocità del riferimento mobile;
- $\delta_\tau$  è la differenza del tempo di latenza;
- $\Delta = \delta_\tau v$  è la distanza percorsa dal riferimento mobile in un periodo di tempo pari alla differenza del tempo di latenza;
- $d_\pi$  è la distanza tra l'osservatore e il piano  $\pi$ ;
- $b$  è la distanza interpupillare, circa uguale alla distanza tra i centri di rotazione oculari.

Invertendo la direzione del moto del riferimento mobile  $P$ , avviene quanto illustrato in figura 2. Analogamente al caso precedente, all'istante  $t_3$  il cervello si trova ad elaborare un'immagine proveniente dall'occhio sinistro che percepisce il riferimento mobile  $P$  nel punto  $C$ , e un'immagine proveniente dall'occhio destro che percepisce il riferimento mobile  $P$  nel punto  $A$ . Componendo le due percezioni, si ottiene l'illusione che il riferimento mobile sia posizionato nel punto  $P_i$ , non facente parte del piano  $\pi$ , anzi, in particolare, percepito "al di là", ossia più distante, dello schermo.

Sfruttando la similitudine dei triangoli  $AP_iC$  e  $O_sP_iO_d$ , si ricava che lo scostamento  $d$  dal piano  $\pi$  è dato dalla relazione:

$$(2) \quad d = \Delta d_\pi / (b - \Delta)$$

dove i simboli sono quelli relativi alla formula (1).

Volendo ottenere un'unica formulazione matematica per i due casi si devono fare le seguenti posizioni aggiuntive:

- si introducono due assi cartesiani orientati. L'asse delle ascisse,  $X$ , passa per i due centri di rotazione oculare  $O_s$  e  $O_d$  e quindi giace nel piano  $o$ . L'origine degli assi,  $O$ , è il punto medio tra i centri di rotazione oculare. L'asse delle ordinate,  $Y$ , è perpendicolare all'asse delle ascisse ed interseca quest'ultimo nell'origine  $O$ .
- la velocità del punto di riferimento mobile è grandezza vettoriale con verso positivo nel verso delle  $X$  crescenti.
- lo spostamento  $d$  dei punti percepiti  $P_v$  e  $P_i$  rispetto al piano  $\pi$  è positivo nel verso delle  $Y$  crescenti.

La situazione è raffigurata nella figura 3.

Sfruttando la similitudine dei triangoli e considerando i segni, si ricava che lo scostamento  $d$  dal piano  $\pi$  è dato dalla relazione:

$$(3) \quad d = \frac{-v \delta_{\tau} d_{\pi}}{b + v \delta_{\tau}} = - \frac{\Delta d_{\pi}}{b + \Delta}$$

dove:

$v$  è la velocità del riferimento mobile, positiva nel verso le ascisse crescenti;

$\delta_{\tau}$  è la differenza del tempo di latenza;

$\Delta = \delta_{\tau} v$  è la distanza percorsa dal riferimento mobile in un periodo di tempo pari alla differenza del tempo di latenza, positiva nel verso le ascisse crescenti;

$d_{\pi}$  è la distanza tra l'osservatore e il piano  $\pi$ ;

$b$  è la distanza interpupillare, circa uguale alla distanza tra i centri di rotazione oculari.

Si noti che se il punto di riferimento mobile si sposta verso destra,  $d$  assume valori negativi, quindi il punto  $P$  viene percepito "al di qua" dello schermo. Viceversa, se il punto di riferimento mobile si sposta verso sinistra,  $d$  assume valori positivi, e il punto  $P$  viene percepito "al di là" dello schermo.

Si noti che la spiegazione fin qui riportata si fonda sull'assunzione che lo spostamento del punto di riferimento mobile sia di entità ridotta di modo che esso rimanga nell'Area di Panum; perciò, sebbene la sua immagine retinica si formi su punti

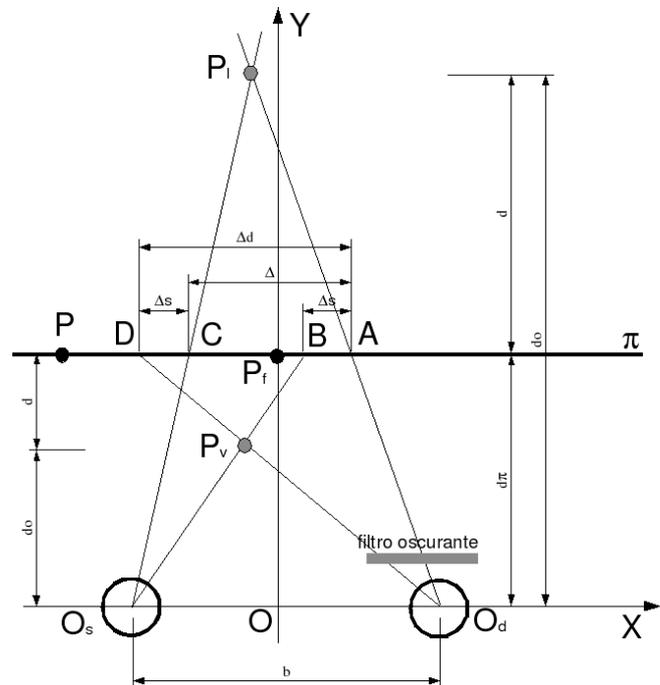


Fig. 3 – Schema geometrico per spiegazione effetto Pulfrich, assi e velocità orientati

retinici disparati, si verifica ugualmente il processo di fusione ([2]) e viene visto come singola entità (si vuole evitare che ci sia diplopia). Anche lo strumento usato da Pulfrich per dimostrare il fenomeno omonimo è caratterizzato da una distanza ridotta tra il cursore fisso e quello mobile, in modo tale da ricadere nell'assunzione fatta sopra.

La spiegazione "classica" basata sul pendolo e, soprattutto, le immagini visualizzate su uno schermo televisivo, in linea di massima non rispettano l'assunzione di movimento di limitata estensione, tuttavia l'effetto Pulfrich viene ugualmente percepito.

In [2] si sostiene che in questo caso il sistema visivo "si comporta come se" le immagini si formassero su punti retinici

all'interno dell'Area di Panum. Si può invece - forse più correttamente - notare che quando si osservano scene complesse, caratterizzate da movimenti relativamente ampi del soggetto che attrae l'attenzione, come ad esempio quelle visualizzate su uno schermo televisivo, il punto di fissazione si muove seguendo il soggetto.

In questo caso si può ipotizzare che per ogni punto della traiettoria del soggetto si possa applicare la derivazione sopra riportata, considerando l'intorno del punto considerato volta per volta. Al limite si ottiene un andamento tempo-continuo che è quello che l'osservatore percepisce visualizzando sequenze televisive prodotte opportunamente per evidenziare l'effetto Pulfrich.

Sembrirebbe quindi opportuno che il soggetto della probabile attenzione dell'osservatore compia movimenti il più possibile costanti, evitando bruschi cambiamenti di traiettoria e/o di velocità. All'occorrenza di tali cambiamenti potrebbe rendersi necessario effettuare dei tagli in sede di montaggio.

### 2.3 Parametri

Per rendersi conto dell'entità del fenomeno, in questo paragrafo si effettua un'applicazione delle relazioni sopra riportate. Si utilizzano alcuni valori tratti dall'articolo di Lit ([3]), in cui si riportano i risultati di un esperimento fotometrico concernente l'effetto Pulfrich.

Le condizioni sperimentali adottate prevedono un illuminamento retinico diverse decine di volte inferiore a quello che si verifica nell'osservazione di uno schermo televisivo. Perciò, in accordo con quanto asserito dallo stesso autore, si può ritene-

re che la differenza del tempo di latenza da considerare nel campo televisivo sia pari all'incirca al valore minimo riportato nei grafici, ossia  $\delta_{\tau} = 5$  ms.

Considerando uno schermo televisivo da 25" e una visione alla distanza standard di 4H, ossia quattro volte la dimensione verticale dello schermo, si ottengono i seguenti parametri:

Diagonale schermo pari a 25" = 635 mm

Altezza schermo: H = 381 mm

Larghezza schermo: L = 508 mm

Distanza tra l'osservatore e il piano su cui si verifica il movimento:  $d_{\pi} = 4H = 1524$  mm

Distanza interpupillare: b = 65 mm

Si assuma che l'oggetto che costituisce il riferimento mobile attraversi lo schermo in un secondo. Si avrà quindi una velocità  $v = \pm 508$  mm/s (il segno indica il verso del movimento).

Introducendo i parametri sopra riportati nella (3), supponendo che il filtro oscurante sia posto davanti all'occhio destro, si ottiene:

movimento da sinistra a destra:

$$(4) \quad d = \frac{-508 * 0.005 * 1524}{65 + 508 * 0.005} = -57 \text{ mm (circa)}$$

movimento da destra a sinistra:

$$(4) \quad d = \frac{508 * 0.005 * 1524}{65 - 508 * 0.005} = 62 \text{ mm (circa)}$$

Tali valori sembrano abbastanza in accordo con quanto percepito visualizzando del materiale video prodotto per sfruttare l'effetto Pulfrich.

Tenendo conto, però, della enorme variabilità delle condizioni di osservazione, dei parametri ottici, di ripresa, dei sistemi di visione, ecc., nonché del fatto che la distanza percepita degli oggetti in movimento è solo un'illusione e non è in relazione con un parametro fisico del mondo reale, sembrerebbe che valutare la distanza di scostamento dallo schermo sia un esercizio non particolarmente significativo, se non per rendersi conto delle limitazioni del metodo rispetto ad una vera stereoscopia.

### 3. Varianti e miglioramenti

Le componenti principali di un sistema basato sull'effetto Pulfrich sono il movimento degli oggetti ripresi e l'uso di occhiali particolari.

Varie sono le pubblicazioni ed i brevetti che riportano ottimizzazioni, essenzialmente a carico degli occhiali, per migliorarne l'efficienza limitandone gli effetti indesiderati.

#### 3.1 Movimento telecamera

Nei testi allegati ai brevetti [4] e [5], T. D. Beard descrive le tre tipologie di movimento camera illustrate nel seguito, da utilizzarsi per ottenere una buona illusione di profondità.

Si noti che le rivendicazioni brevettuali associano i movimenti camera all'uso di occhiali speciali che sono il vero oggetto del brevetto. Infatti, i movimenti camera

in oggetto sono, ed erano già al tempo della richiesta del brevetto, generalmente noti agli operatori del settore che li adottarono comunemente fin dall'inizio della cinematografia. Inoltre, le tre tipologie di movimento coprono quasi tutti i movimenti bidimensionali possibili con una telecamera.

#### *Spostamento della telecamera attorno ad un punto prefissato*

E' la soluzione indicata come preferita. Consiste nel muovere la telecamera lungo una traiettoria curva, idealmente ma non

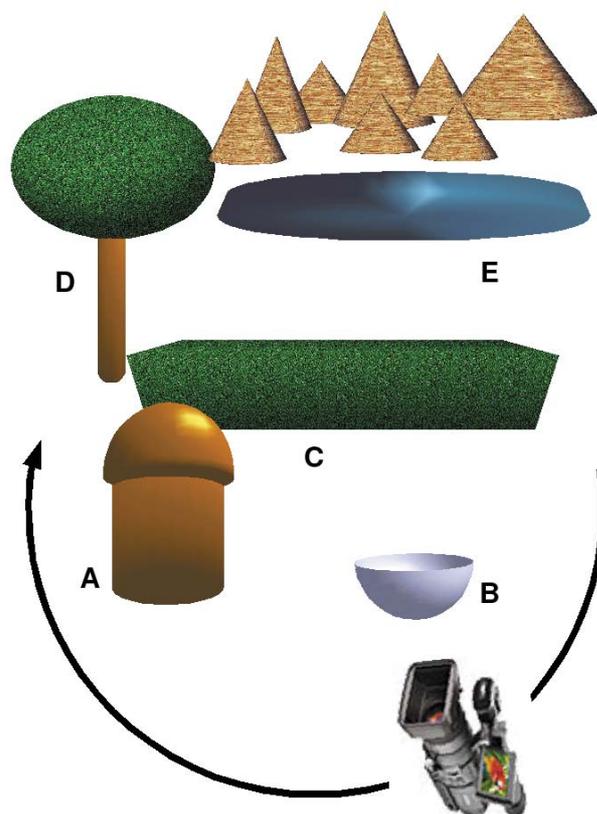


Fig. 4 – Rotazione della telecamera attorno ad un punto prefissato

necessariamente circolare, in modo tale che la telecamera rimanga puntata in un singolo punto.

Con riferimento alla figura 4, muovendo la telecamera in senso orario (visto da sopra) durante la ripresa, si ottiene una sequenza che, in fase di visualizzazione, mostra gli oggetti A e B in movimento da sinistra a destra, con velocità crescente tanto minore è la distanza dalla telecamera, il punto C fermo, mentre le immagini degli oggetti D ed E attraverseranno lo schermo da destra a sinistra, con velocità crescente all'aumentare della distanza dalla telecamera.

Osservando la scena con degli occhiali adatti a generare l'effetto Pulfrich, con la "lente scura" posta di fronte all'occhio

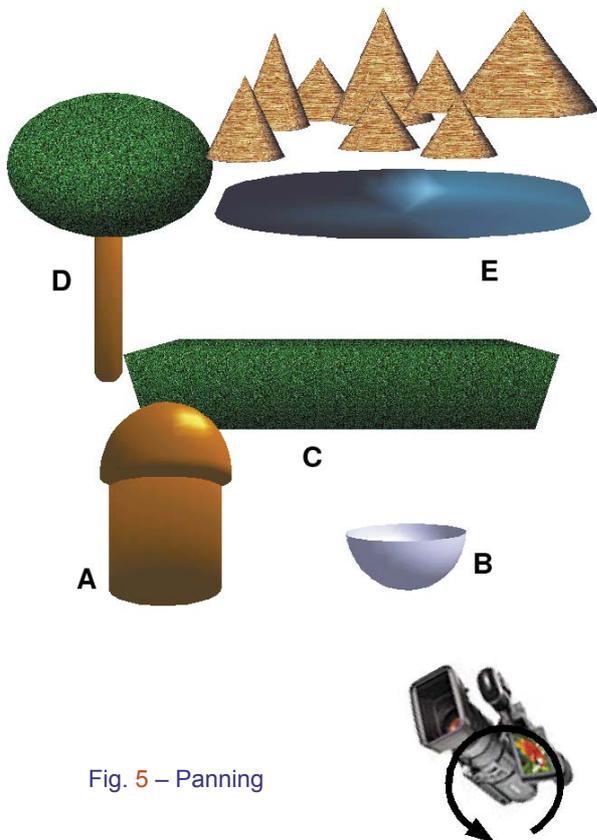


Fig. 5 – Panning

destro, gli oggetti A e B risulteranno “al di qua” dello schermo, tanto più vicini quanto minore era la distanza dalla telecamera, il punto C apparirà sullo schermo e i punti D ed E saranno percepiti “al di là” dello schermo, tanto più lontani quanto più distanti erano dalla telecamera.

Una ripresa di questo tipo è particolarmente adatta per riprese in ambienti aperti, con il soggetto vicino alla telecamera e lo sfondo lontano. In questo caso l'operatore percorrerà una traiettoria curva davanti al soggetto - meglio se esso stesso si muove da sinistra a destra, quindi in direzione contraria alla telecamera – ponendo il punto fisso di riferimento al di là del soggetto. Lo sfondo, meglio se con caratteristiche di panoramicità, in sede di visualizzazione apparirà situato “al di là” dello schermo.

Si noti che l'inversione della direzione del movimento della telecamera ha come conseguenza l'inversione del posizionamento apparente degli oggetti costituenti la scena. Nell'esempio precedente si otterrebbe che il soggetto principale sarebbe percepito “al di là” dello sfondo, con evidente incongruenza percettiva, affaticamento della vista e perdita dell'effetto tridimensionale. Analogo problema si ha se si inverte il posizionamento della lente “scura”: nell'esempio precedente se si posiziona la lente scura davanti all'occhio sinistro.

### Rotazione della telecamera

In gergo televisivo tale rotazione è chiamata *panning*. Nella sequenza che si ottiene, gli oggetti fissi si muovono tutti nella stessa direzione, con velocità crescenti in proporzione diretta alla distanza della telecamera, e vengono percepiti quindi dalla stessa parte dello schermo, con spostamento rispetto a quest'ultimo proporzionale alla distanza dalla telecamera.

Nell'esempio illustrato in figura 5, con la telecamera ruotante in senso antiorario (visto dall'alto) si ottiene una sequenza che mostra tutti gli oggetti in movimento da sinistra a destra, gli oggetti più lontani con velocità maggiore.

Dato che gli oggetti più lontani saranno percepiti con spostamento maggiore, conviene utilizzare tale metodo di ripresa per viste panoramiche, con rotazione della telecamera in senso orario (visto da sopra – l'opposto a quanto illustrato in figura 5), ottenendo un movimento apparente degli oggetti in direzione destra-sinistra e con spostamento apparente "al di là" dello schermo tanto maggiore quanto maggiore è la distanza degli oggetti ripresi dalla telecamera. Si suppone che l'osservatore indossi la lente scura davanti all'occhio destro.

L'effetto risulta più evidente in presenza di un oggetto/soggetto in movimento da sinistra a destra con velocità superiore a quella della telecamera a quella distanza.

#### Traslazione lineare della telecamera

Questo tipo di ripresa, illustrato in figura 6, è quello che, per esempio, si potrebbe ricavare con la telecamera posta su un carrello che trasla su rotaie diritte.

In sede di visualizzazione, il movimento apparente è per tutti gli oggetti nella stessa direzione ed è contrario a quello effettuato della telecamera in sede di ripresa. Pertanto, appaiono tutti dalla stessa parte dello schermo, ma, a differenza dell'esempio precedente, gli oggetti più vicini alla telecamera risultano più veloci e quindi appaiono discostarsi maggiormente dallo schermo.

Nell'esempio di figura 6, data la traslazione della telecamera da destra a sinistra, in sede di visualizzazione gli oggetti appariranno muoversi da sinistra a destra. Ad un osservatore equipaggiato di occhiali con la lente "scura" davanti all'occhio destro si presenteranno quindi "al di fuori" dello schermo, mentre lo sfondo – per la precisione, il punto all'infinito – viene percepito sullo schermo. Inoltre, gli oggetti più vicini al binario, cioè alla telecamera, saranno percepiti più vicini, ossia maggiormente distaccati dallo schermo. In altre parole, l'effetto rispecchia il posizionamento degli oggetti costituenti la scena reale.

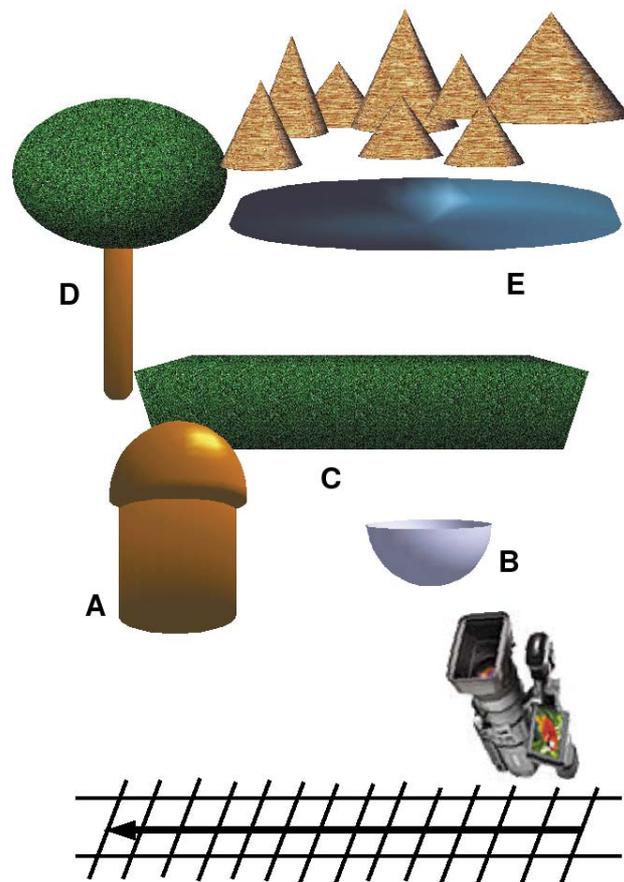


Fig. 6 – Traslazione lineare

Questo tipo di ripresa si adatta di più – probabilmente – a riprese in campo vicino, laddove debbano evidenziarsi i soggetti molto vicini e dove la scena non sia caratterizzata da una profondità molto elevata (gli scostamenti “al di qua” dello schermo non sono della stessa entità di quelli “al di là”, inoltre lo spazio fisico tra schermo e osservatore è minore di quello al di là dello schermo e non si presta ad effetti prospettici troppo spinti).

### 3.2 Occhiali

#### *Lenti ritardanti*

L'illusione che sta alla base dell'effetto Pulfrich è generata dal ritardo con cui l'immagine proveniente da un occhio raggiunge il cervello, rispetto all'immagine proveniente dall'altro occhio.

Il metodo più utilizzato per ottenere tale ritardo consiste nel diminuire l'intensità luminosa che raggiunge un occhio, sfruttando il conseguente aumento del tempo di latenza della retina.

Ponendo davanti ad un occhio una lente costruita con una sostanza caratterizzata da una velocità di propagazione della luce minore di quella in aria, in linea di principio si ottiene un risultato analogo, evitando la fastidiosa differenza di intensità luminosa tipica degli occhiali tradizionali basati sull'oscuramento di un occhio. Materiali di questo tipo si reperiscono, per esempio, nel campo delle plastiche ottiche [6].

Alternativamente, la “lente” ritardante potrebbe consistere in una trappola di luce, per esempio costituita da una cavità risonante, costruita in modo da obbligare la luce a percorrere un tragitto sensibilmente maggiore di quello che percorre per rag-

giungere l'occhio libero, provocandone quindi il ritardo relativo.

Le due alternative possono evidentemente coesistere ed essere associate a filtri di diverso tipo descritti in altri punti di questo lavoro.

Il pregio maggiore di tali soluzioni dovrebbe consistere nella minore differenza di luminosità incidente sui due occhi rispetto alla tecnica tradizionale (lente scura), diminuendo così l'effetto detto *blind eye*.

#### *Lenti distorcenti*

J.M. Dasso, nel suo brevetto [7] propone di utilizzare occhiali con lenti graduate che rimpiccioliscono l'immagine davanti all'occhio dominante e ingrandiscono l'immagine davanti all'altro occhio.

Il principio di funzionamento è di creare artificialmente delle differenze tra le immagini percepite dai due occhi di modo da imitare le discrepanze realmente presenti in una visione stereoscopica reale.

Nel corpo del brevetto tale tecnica è prevista come integrativa e migliorativa rispetto all'uso della semplice lente scura posta davanti ad un solo occhio.

#### *Lenti a diaframma*

Da millenni gli eschimesi costruiscono i loro tradizionali occhiali di zanna di tricheco facendo una sottile fessura nella direzione di vista al fine di limitare l'intensità luminosa incidente sugli occhi.

E', peraltro, il principio utilizzato nelle macchine fotografiche per regolare la luce incidente sulla pellicola tramite il diaframma, che consiste - appunto - in un'iride con apertura variabile.

L'effetto che si ottiene è analogo a quello di un filtro neutro (grigio) di opportuna gradazione.

L.P. Dudley, nel brevetto [8], propone una soluzione consistente in un paio di occhiali in cui la lente scura è sostituita da una membrana opaca caratterizzata da un numero adeguato di fori di piccolo diametro in modo che la superficie di tali fori corrisponda a circa il 10% della superficie della membrana. In tal modo si ottiene l'equivalente di un filtro neutro con trasmittanza pari al 10% circa, che è sperimentalmente il valore più indicato per massimizzare l'effetto Pulfrich.

Ritornando alle soluzioni tradizionali, costruendo un paio di occhiali in cui la lente scura è sostituita da una parete opaca con una feritoia o un foro di piccole dimensioni – deve lasciar passare circa il 10% della luce incidente – in corrispondenza della direzione di vista, si dovrebbe ottenere un effetto paragonabile alla soluzione brevettata.

Si noti che tale soluzione si presta all'autocostruzione e potrebbe quindi essere poposta nell'ambito di trasmissioni di tipo ludico-didattico quali, ad esempio "Art attack" o similari.

#### *Lenti non omogenee*

T.D. Beard in [4] propone di utilizzare delle lenti non omogenee per diminuire l'effetto detto del *dead eye* (vedi punto seguente).

La lente scura è tale solamente nella direzione di vista, diventando trasparente ai bordi. La lente chiara, al contrario, è chiara al centro e scura ai bordi.

Lo scopo di questa soluzione è di diminuire la differenza di intensità luminosa incidente sui due occhi nella visione "normale", mantenendo tale differenza nella direzione della vista, che si suppone maggiormente utilizzata in fase di osservazione delle sequenze televisive riprodotte su uno schermo.

La bassa efficacia della soluzione, unita alla difficoltà di realizzazione delle lenti, ha spinto l'autore a proporre altre soluzioni più efficaci alcune delle quali sono descritte nel seguito.

#### *Lenti con filtri colorati*

In diversi brevetti ([4], [9], [5], [10]), si propone l'uso di occhiali con lenti colorate.

Basicamente si tratta di occhiali con una lente scura e una chiara per generare l'effetto Pulfrich, ma presentati in diverse varianti colorate con lo scopo di diminuire l'effetto negativo detto del *dead eye*.

L'effetto del *dead eye* (letteralmente: dell'occhio morto) consiste nell'acceccamento dell'occhio oscurato in presenza di livelli di illuminamento ridotti e quando la differenza di intensità luminosa che raggiunge i due occhi supera una certa soglia. Finché si osserva una sorgente di luce quale, per esempio, uno schermo televisivo, tale differenza di oscuramento può essere fastidiosa ma generalmente è accettabile. Osservando invece un ambiente normalmente illuminato, la differenza di oscuramento causa l'acceccamento dell'occhio oscurato e quindi l'effetto *dead eye*.

Si tenga in conto che, per evidenziare l'effetto Pulfrich, l'occhio oscurato deve ricevere non più di circa il 10% della luce incidente, e tale differenza di intensità

luminosa supera la soglia per la quale si verifica l'effetto del *dead eye* in condizioni di illuminamento normale.

Per ovviare a questo inconveniente, considerando che la televisione emette luce nelle ristrette bande di emissione dei fosfori (negli LCD e plasma la situazione è analoga), mentre gli oggetti del mondo naturale emettono luce su tutte le frequenze visibili, T.D. Beard in [5] e [10], propone che la lente "scura" sia costituita da filtri a bassa trasmittanza nelle bande di emissione dei fosfori e alta trasmittanza altrove e che la lente "chiara" sia composta da filtri con caratteristiche duali: alta trasmittanza nelle bande di emissione dei fosfori e bassa trasmittanza altrove. Con occhiali muniti di lenti di questo tipo, si ottiene un'elevata differenza di intensità luminosa incidente sugli occhi quando si guarda un monitor, necessaria per ottenere un buon effetto Pulfrich, e una ridotta differenza di intensità luminosa quando si osserva il mondo naturale: l'effetto del *dead eye* risulta quindi fortemente ridotto.

### 3.3 Cromostereoscopia

Il sistema ottico umano, composto principalmente dal cristallino, non è acromatico. Ciò implica che le diverse lunghezze d'onda non possano essere focalizzate contemporaneamente sulla retina.

La focalizzazione sulla retina della luce colorata avviene grazie al potere di accomodazione del cristallino, analogamente a quanto avviene per la focalizzazione dell'immagine di oggetti posti a distanza differente. In genere, non è possibile ottenere contemporaneamente una perfetta

focalizzazione per la distanza e per il colore.

Siccome la deformazione del cristallino dovuta all'accomodazione causata dalla distanza è di maggiore entità rispetto a quella dovuta alla focalizzazione della luce colorata, inconsciamente si è portati ad interpretare ogni deformazione del cristallino come dovuta alla distanza degli oggetti osservati, a volte pervenendo a valutazioni errate.

Cosicché osservando oggetti di diverso colore posti alla stessa distanza dall'osservatore, si percepiscono più lontani gli oggetti colorati con colori ricadenti nella parte alta delle frequenze ottiche visibili (verde-blu), e più vicini gli oggetti colorati con colori ricadenti nella parte bassa delle frequenze ottiche visibili (giallo-rosso). Tale fenomeno è noto con il termine di *cromostereoscopia* e non dipende dal movimento degli oggetti osservati ma solamente dal loro colore.

L.P. Dudley in [8] propone di utilizzare la *cromostereoscopia* in aggiunta all'effetto Pulfrich, ottenendo così la percezione della profondità anche in scene statiche.

La sua soluzione consiste nell'adozione di occhiali muniti di lenti dispersive al fine di aumentare l'aberrazione cromatica in uno o ambedue gli occhi dell'osservatore, congiunta con una opportuna colorazione e/o illuminazione degli oggetti costituenti la scena, in particolare utilizzando colori giallo-rossi per gli oggetti che devono apparire vicini e colori verdi-blu per quelli che devono apparire distanti.

#### 4. Utilizzazioni e sperimentazioni passate

Ardito e Barbero in [11] analizzano l'effetto Pulfrich in quanto la Rai, nel 1989, mette in onda dei cartoni animati giapponesi prodotti in funzione dello sfruttamento di tale fenomeno. Non risulta che Rai abbia rinnovato l'esperimento in seguito.

In [12] si riporta che la prima diffusione commerciale di programmi televisivi caratterizzata da un'utilizzazione intenzionale dell'effetto Pulfrich negli Stati Uniti avvenne nel gennaio 1989 da parte della KTTV di Los Angeles. L'effetto tridimensionale fu minimo e passò quasi inosservato.

Alcune settimane dopo, nell'ambito del "Super Bowl half time program", furono presentati spettacoli musicali con effetto Pulfrich, associati a segmenti in computer grafica. Sembra che gli utenti fossero molto più interessati a quest'ultima che alla tridimensionalità.

Nel 1989, Theatric Support produsse l'evento "The Rose Parade in 3D 'Live'" per Fox Television, che a sua volta nel 1990 diffuse corte sequenze con effetto Pulfrich relative ad un concerto degli Rolling Stones.

La Kellogg Company, nel 1992, fece produrre 13 episodi di cartoni animati della serie "Yo Yogi" in onda sulla NBC, con effetto Pulfrich.

Nel 1994, la Fox Television distribuì sei milioni di occhiali speciali in abbinamento alla diffusione dei programmi "Married With Children" e "Revenge of the Nerds IV."

Successivamente un produttore Cileno produsse sedici video musicali diffusi durante un programma di varietà musicale (Martes 13) in un periodo di diverse settimane. Il successo fu notevole, con la vendita di tre milioni di occhiali speciali e molte richieste rimaste non soddisfatte.

Nel 1995 un produttore indonesiano diede la commessa alla "3d", azienda specialistica nel settore (vedi [12]), per la produzione di un programma televisivo composto da dodici puntate di mezz'ora ciascuna, che ebbe successo oltre alle aspettative.

Oltre a programmi di fatto sperimentali destinati alla diffusione, si trovano diverse produzioni stereotelevisive nel campo dell'*home video*.

Come esempio, si cita il video musicale "Love Can Build A Bridge", distribuito nel 1991, un programma di un'ora, con sequenze adatte per sfruttare l'effetto Pulfrich durante gli ultimi cinque minuti circa. L'effetto tridimensionale era a tratti rilevante, ma venne scarsamente notato dal pubblico ([12]).

In [13] si riporta di un episodio di "Third Rock From the Sun" risalente alla fine del 1997, e del video distribuito su cassetta intitolato "A Walk Through the Roses of Reynolda Gardens" di Dave Combs, in cui l'effetto Pulfrich mostra il suo potenziale senza rivelare le proprie limitazioni.

L'elenco esaustivo delle produzioni che hanno sfruttato l'effetto Pulfrich - sempre che sia possibile compilarlo - è troppo lungo per essere riportato, ed esula dagli scopi di questo lavoro.

Tuttavia, dall'analisi della documentazio-

ne, sembra che si possano derivare le seguenti considerazioni.

I programmi telediffusi devono essere gestiti come eventi, combinando soggetti che si prestano al particolare tipo di riprese necessario, alla distribuzione degli occhiali speciali e alla stimolazione della curiosità nel target di utenza.

Le realizzazioni di corta durata si prestano particolarmente bene all'utilizzazione dell'effetto Pulfrich in quanto si possono evitare con maggiore facilità situazioni indesiderate, in particolare quelle dovute alle limitazioni intrinseche nel metodo, quali il movimento del soggetto. Tuttavia, l'effetto Pulfrich può essere utilizzato anche in produzioni di largo respiro suscitando interesse, anche commerciale, purché il prodotto televisivo venga realizzato sotto certe condizioni [12].

Le produzioni destinate all'*home video* non hanno bisogno di particolari attenzioni di marketing in quanto gli occhiali speciali possono facilmente essere distribuiti assieme al supporto di registrazione (cassetta o DVD).

Non sembra che, sia da parte dei produttori che degli utenti, ci sia stato finora un notevole interesse se non in casi sporadici. Tuttavia è difficile determinare se la causa è da ricercarsi nelle limitazioni del metodo oppure nel disinteresse dell'utenza alla percezione della profondità. Sembra invece assodato che la migliore riuscita si ottenga tenendo conto delle caratteristiche e limitazioni del metodo fin dalle prime fasi della produzione, onde generare un prodotto avvincente e, soprattutto, esente da incongruenze percettive che possono facilmente distruggere l'illusione ottica generata dall'effetto Pulfrich.

## 5. Conclusioni

L'effetto Pulfrich è un'illusione ottica che, se prodotta in modo opportuno, può dare percezione della profondità e quindi una visione tridimensionale della scena osservata.

Tuttavia, è soggetto ad alcune limitazioni specifiche: gli oggetti visualizzati sullo schermo devono muoversi in senso orizzontale – le scene statiche non generano l'effetto Pulfrich – ed è impossibile realizzare inquadrature d'effetto, per esempio composte da oggetti che “escono” dallo schermo muovendosi verso lo spettatore – perché in tal caso non vi è movimento orizzontale omogeneo.

La posizione apparente degli oggetti visualizzati rispetto allo schermo dipende dalla direzione di movimento degli stessi: posto che la lente oscurante sia davanti all'occhio destro, gli oggetti che traslano da sinistra a destra sono percepiti “davanti” allo schermo, mentre gli oggetti che traslano in direzione contraria sono percepiti “dietro” allo schermo. Ponendo la lente oscurante davanti all'altro occhio la posizione apparente degli oggetti si inverte, con l'evidente possibilità che si creino incongruenze percettive.

Inoltre, il movimento richiesto agli oggetti perché venga generata l'illusione ottica alla base dell'effetto Pulfrich è piuttosto veloce. Ciò implica la necessità di generare scene in continuo movimento relativamente veloce, con la possibilità di suscitare sensazione di disagio nell'osservatore.

Oltre alle limitazioni suindicate, la visualizzazione dell'effetto Pulfrich richiede di indossare correttamente speciali occhiali, che, peraltro, possono essere leggeri,

poco costosi e, in alcune versioni, auto-costruibili.

Il lato positivo di questa tecnica è che non richiede attrezzature speciali per la generazione, la diffusione e la visualizzazione delle sequenze. Anzi, è l'unica tecnica "stereoscopica" che sia completamente compatibile con l'attuale sistema televisivo, grazie proprio al fatto che la percezione della profondità non è prodotta tramite una coppia stereoscopica - la cui generazione, elaborazione e visualizzazione richiede speciali attrezzature - ma è suscitata come illusione ottica in sede di visualizzazione.

Le sequenze utilizzabili sono vere e proprie sequenze televisive monoscopiche, cioè "normali", ancorché riprese con opportuni accorgimenti che devono essere pianificati già in sede di progetto del prodotto televisivo.

L'elaborazione, per esempio il montaggio, eventuali codifiche, la diffusione del segnale, sono quelle già utilizzate nella normale filiera produttiva.

La visualizzazione è effettuata sui normali terminali di utente, cioè i televisori. Gli utenti muniti degli speciali occhiali possono percepire la profondità grazie all'effetto Pulfrich, gli altri osservano le sequenze come d'abitudine, senza artefatti.

Dalla documentazione reperita, sembrerebbe che i tentativi di utilizzare commercialmente l'effetto Pulfrich nel campo della diffusione televisiva siano posteriori agli anni '80. Ciò potrebbe indicare che dopo un decennio di televisione a colori si sia sentita la necessità di offrire un elemento di interesse aggiuntivo alla normale pro-

grammazione televisiva. Se ciò rispondesse al vero, la televisione stereoscopica potrebbe trovare il proprio spazio in assenza, o ad integrazione, di altre soluzioni tecniche che periodicamente vengono immesse sul mercato (nel passato: televisione a colori, registrazione domestica, televisione satellitare, televisione digitale; nel presente: televisione ad alta definizione). Un'opportuna programmazione basata sull'effetto Pulfrich potrebbe perciò stimolare l'interesse degli utenti "normali" verso i sistemi stereoscopici - quando saranno reperibili sul mercato.

## Bibliografia

1. C. Pulfrich - "Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie" - Die Naturwissenschaften, 23 giugno 1922.
2. J. M. Williams - "The Pulfrich Effect: Text Explanations" - [www.siu.edu/~pulfrich/Pulfrich\\_Pages/explains/expl\\_txt/expl\\_jmw.htm](http://www.siu.edu/~pulfrich/Pulfrich_Pages/explains/expl_txt/expl_jmw.htm)
3. A. Lit - "The magnitudes of the Pulfrich stereophenomenon as a function of binocular differences of intensity at various levels of illumination" - The American Journal of Psychology - Vol. LXII, No. 2, Aprile 1949
4. T. D. Beard - Brevetto US4705371 "3-D method and apparatus" - 10 novembre 1987
5. T. D. Beard - Brevetto EP0325019 "Low differential 3-D viewer glasses and method" - 26 luglio 1989
6. J. M. Dasso - Brevetto US5434613 "Method and apparatus for generating a three-dimensional effect for two-dimensional images" - 18 luglio 1995
7. J.M. Dasso - Brevetto US6560815 "Method and apparatus for generating a three-dimensional effect for two dimensional images" - 22 luglio 1997

8. L.P. Dudley – Brevetto US4131342 “Stereoscopic optical viewing system” - 26 dicembre 1978[
9. T.D. Beard – Brevetto USA n. 4836647 - “Low differential 3-D viewer glasses and method with spectral transmission characteristics to control relative intensities” - 6 giugno 1989
10. T.D. Beard – Brevetto USA n. 4893898 - “Low differential 3-D viewer glasses and method with spectral transmission properties to control relative intensities” - 16 gennaio 1990
11. M. Ardito, M. Barbero - “Effetto stereoscopico con immagini in movimento” - Relazione tecnica RAI, ottobre 1989
12. “Spatial vision” - [www.3d.com/flash/sehist2.html](http://www.3d.com/flash/sehist2.html)
13. D. Starkman, J. Dennis - “Pulfrich Roses” - Stereo World, luglio/agosto 1998 – [www.combmusic.com/RosesReview.html](http://www.combmusic.com/RosesReview.html)
20. S. Christianson, H. W. Hofstetter - “Some Historical Notes on Carl Pulfrich” - American Journal of Optometry and Archives of the American Academy of Optometry, vol. 49, pages 944-947, 1972
21. A. Lit, R. H. Young, M. Shaffer - “Simple reaction time as a function of luminance for various wavelengths” - Perception & Psychophysics, 1971, vol. 10
22. A. Lit - “The Pulfrich Effect: Discussions & Text Explanations” - [www.siu.edu/~pulfrich/Pulfrich\\_Pages/explains/expl\\_txt/explaint.html](http://www.siu.edu/~pulfrich/Pulfrich_Pages/explains/expl_txt/explaint.html)
23. J. M. Williams - “The Pulfrich Effect: Text Explanations” - [www.siu.edu/~pulfrich/Pulfrich\\_Pages/explains/expl\\_txt/expl\\_jmw.htm](http://www.siu.edu/~pulfrich/Pulfrich_Pages/explains/expl_txt/expl_jmw.htm)
24. “Nickalls-Pulfrich curve”, [www.2dcurves.com/higher/highern.html](http://www.2dcurves.com/higher/highern.html)
25. T. D. Beard – Brevetto EP0325019 “Low differential 3-D viewer glasses and method” - 26 luglio 1989
25. A. Lit - “Depth-Discrimination Thresholds as a Function of Binocular Differences of Retinal Illuminance at Scotopic and Photopic Levels” - Journal of the Optical Society of America, Vol. 49, No. 8, Agosto 1959
26. M. Alpern - “A Note on Visual Latency” - Psychological Review, 1968, 75, pagg. 260-264
27. A. Lit - “The Pulfrich Effect: text Explanation by Alfred Lit” - [www.siu.edu/~pulfrich/Pulfrich\\_Pages/explains/expl\\_txt/expl\\_lit.htm](http://www.siu.edu/~pulfrich/Pulfrich_Pages/explains/expl_txt/expl_lit.htm)
28. “Take a deeper look” - Brochure pubblicitaria di Telcast Media Group – TELCAST International GmbH & Co. KG – [www.telcast-group.tv](http://www.telcast-group.tv)

**Nota della redazione di Elettronica e Telecomunicazioni:**

il numero precedente, agosto 2004, è dedicato quasi totalmente alla televisione stereoscopica.