

Olografia: quale realtà?

Mario **Muratori**

Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

1. INTRODUZIONE

Presso il **Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica (CRIT)** si svolge un'attività di ricerca relativa alla visione tridimensionale.

Fino al 2014 si è considerata la stereoscopia *tradizionale*, in inglese nota col nome di *plano-stereoscopy*, poiché più facilmente realizzabile. Nel corso degli anni si è sviluppata una catena produttiva completa, dalla ripresa multicamera controllata da una regia, all'editing e alla successiva masterizzazione di BD dimostrativi; alcuni prodotti 3D sono stati anche trasmessi sul canale RAI HD, ad esempio il documentario "Le non persone" di Roberto Olla, Rai TG1.

Alla data dell'articolo si nota un certo rilassamento dell'interesse del pubblico e degli operatori per la stereoscopia, apparentemente a causa della necessità di indossare occhiali specifici.

Tuttavia nei laboratori avanzati non cessa la ricerca né si arresta la proposizione sul mercato di tecnologie e apparati per la visione tridimensionale, spesso spacciandoli per *olografici* anche se basati su tecniche diverse.

In questo articolo, oltre a tentare di far chiarezza sull'olografia millantata si cerca di testimoniare lo stato dell'arte della tecnica olografica *vera* applicata alla visualizzazione tridimensionale.

In diversi laboratori di ricerca le tecniche di riproduzione di immagini in movimento tridimensionali continuano ad essere sviluppate, anche nell'ambito di progetti finanziati europei; per contro si dà per scontata una certa diminuzione dell'interesse per la stereoscopia, sia in campo cinematografico che televisivo.

Quest'ultima potrebbe anche solo essere dovuta alla fine fisiologica del periodo in cui prevale la novità; infatti, al giorno d'oggi le tecniche di produzione sono acquisite e la fetta di mercato e di utenza è ben identificata; essa, peraltro, pur rappresentando una nicchia, esiste ed è soddisfatta dalla tecnica stereoscopica.

Considerato che una grande azienda informatica ha recentemente presentato i suoi occhiali per la realtà aumentata il cui nome commerciale richiama esplicitamente l'olografia, sembrava opportuno effettuare una ricognizione, ancorché limitata, per aggiornarsi sulla situazione relativa alle tecniche di visione tridimensionale più avanzate della stereoscopia tradizionale e, in particolare, all'olografia.

Effettuando ricerche in rete si trovano molti riferimenti all'olografia, ma, approfondendo, si è scoperto che in pochi casi viene utilizzata la vera tecnica olografica.

Per contro, negli ultimi anni in alcuni laboratori avanzati si sono sviluppati metodi per limitarne considerevolmente i limiti applicativi, anche se non è ancora stata raggiunta una maturità tecnologica tale da ottenere risultati qualitativi comparabili alle comuni tecniche televisive e cinematografiche.

In questo articolo, oltre a tentare di far chiarezza sulla olografia millantata si cerca di testimoniare lo stato dell'arte della tecnica olografica "vera" applicata alla visualizzazione tridimensionale.

2. E' TUTTO OLOGRAFIA?

L'olografia è una tecnica di ripresa e visualizzazione basata sulla diffrazione di luce coerente, con cui l'immagine di un oggetto complesso tridimensionale può essere riprodotta utilizzando uno schermo bidimensionale dotato di trasparenza *complessa*, che rappresenti l'ampiezza e la fase del fronte dell'onda luminosa.

E' pensiero comune che l'olografia in tempo reale sia il massimo per la visualizzazione di oggetti tridimensionali in movimento ed è quindi logico che si tenda alla definizione di una tecnica opportuna per ottenerla.

Tuttavia, in un nostro precedente articolo [1] si descriveva la tecnica olografica messa a punto da Gabor^{Nota 1} (compresi i successivi miglioramenti) evidenziando alcune difficoltà ad applicarla alla televisione.

Come mai, allora, quando si parla di 3D escono come funghi tecniche e apparati *olografici* [2]?

Secondo noi perché con alcune tecniche si ottengono immagini traslucide e magari anche tridimensionali, caratteristiche tipiche delle immagini ottenute con l'olografia. Inoltre, la parola *olografia* ha un che di magico, similmente, ad esempio, alla parola *elettromagnetismo*, e perciò viene molto disinvoltamente utilizzata da un certo marketing non del tutto corretto per suscitare interesse verso il prodotto pubblicizzato.

Con ciò non si vuole nulla togliere a molte realizzazioni che sicuramente danno ottimi risultati e sono frutto di un grande lavoro di sviluppo tecnico e tecnologico, ma si dovrebbe accettare che, se non si basano sulla tecnica di Gabor o sue derivazioni, non si possono chiamare *olografiche*.

2.1 LENTI DI FRESNEL

Già da molto tempo si trovano sul mercato degli schermi *olografici* che in verità non sono altro che delle *lenti di Fresnel* utilizzate in retroproiezione per deflettere i raggi luminosi. In questo modo si può ubicare il proiettore in posizione defilata e nascosta. Un'accorta illuminazione dell'ambiente in cui si trova lo schermo permette di nascondere la sua presenza, col risultato di produrre delle immagini traslucide che sembrano fluttuare nel vuoto.

Un sistema più rozzo è quello basato su un semplice *schermo semitrasparente* per retroproiezione che funziona per diffusione nel flusso luminoso incidente. A questo tipo di visualizzatori appartengono anche gli schermi formati da una lama d'acqua nebulizzata.

In questo caso è più difficile nascondere sia il proiettore, che spesso si deve porre in asse, sia lo schermo, che non essendo completamente trasparente risulta più visibile. Tuttavia, con installazioni opportune si possono ottenere risultati molto interessanti (figura 1).

Ma non è olografia.



Fig. 1 – Uso artistico di schermi *olografico* (a sinistra) e *semitrasparente* (a destra) [3]

Nota 1 Lo scienziato ungherese **Dennis Gabor** (Gábor Dénes) (Budapest, 1900 - Londra 1979) sviluppò la tecnica, da lui chiamata "olografia", nel 1947 come metodo per aumentare la risoluzione dei microscopi elettronici. Per questa invenzione Gabor ottenne il premio Nobel nel 1971.

2.2 PEPPER'S GHOST

Il *Fantasma di Pepper* (meglio conosciuto come *Pepper's Ghost*) è una tecnica illusoria usata in teatro e in vari trucchi magici.

Utilizza una lastra trasparente di vetro, plexiglass o altri film plastici unita a particolari tecniche di illuminazione, per dare l'illusione che gli oggetti appaiano e scompaiano, diventino trasparenti o si inseriscano all'interno di ambienti o tra altri oggetti o personaggi.

La tecnica prende il nome da John Henry Pepper, che riprese l'effetto inventato nel XVI Secolo dal filosofo e alchimista italiano Giovanni Battista Della Porta e lo rese famoso.

Lo spettatore vede il palcoscenico o comunque l'area in cui verrà riflessa l'immagine fantasma, ma non una stanza nascosta, anche detta *stanza blu*, adiacente al palcoscenico e perfettamente speculare ad esso anche negli oggetti contenuti.

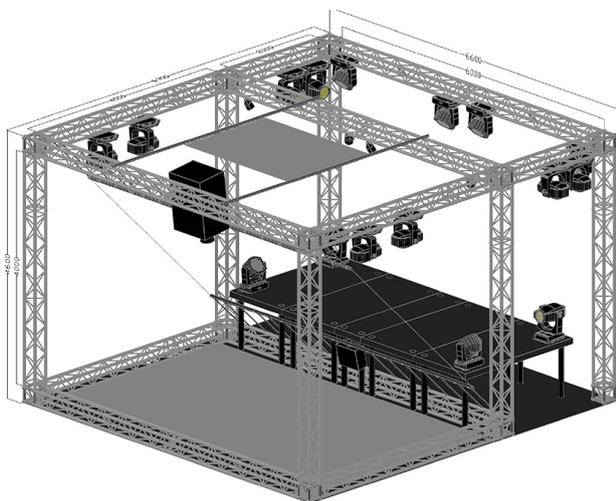


Fig. 2 – Sistema di proiezione EyeLiner™ di Musion [5]



Fig. 3 – Esempio di piramide olografica illuminata da un tablet [6]

La stanza ha pareti completamente nere e contiene esclusivamente oggetti ben illuminati. Questi ultimi vengono riflessi dalla lastra trasparente e quindi appaiono come se fossero sul palcoscenico come immagini fantasma traslucide. Le apparizioni appaiono e scompaiono ogniqualvolta le luci puntate sugli oggetti vengono accese o spente. Illuminando alternativamente gli oggetti sul palcoscenico e nella stanza si possono realizzare effetti di morphing [4].

Aziende come *Musion*, *Eon Reality*, *360 Brand Vision*, *emmegi* e altre che emergono tra i primi risultati quando si effettua la ricerca della parola chiave *olografia* in rete, realizzano apparati e spettacoli molto avvincenti – a giudicare dai video messi a disposizione sui relativi siti – ma basati, e non sempre esplicitamente, sulla tecnica del *Pepper's Ghost* (figura 2).

Analogamente, le varie *piramidi olografiche* non sono altro che un insieme di quattro *Pepper's Ghost* illuminati opportunamente da uno schermo, magari di un tablet (figura 3).

Anche in questo caso si deve riconoscere che, oltre a gadget tecnologici, si trovano sistemi professionali con i quali si ottengono risultati di qualità.

Ma non è *olografia*.

2.3 HOLOLENS E HMD

Recentemente **Microsoft** ha presentato gli **HoloLens**[7], occhiali per la realtà aumentata.

Dal punto di vista della mera visione, essi sono degli **Head Mount Display (HMD)** sulle cui lenti viene proiettata una coppia di immagini stereoscopiche che pertanto si vedono traslucide, tridimensionali e *intarsiate* nel modo reale che si intravede attraverso le lenti trasparenti degli occhiali. Siamo quindi nel campo della stereoscopia tradizionale.

Tutto quanto sta attorno a questo e che è indispensabile per ottenere il risultato voluto, in particolare il riconoscimento e la modellizzazione 3D in tempo reale dell'ambiente in cui ci si trova, l'integrazione con dati provenienti dall'esterno via collegamento wireless, eccetera, sono senz'altro elementi tecnologici che fanno degli **HoloLens** il terminale di un apparato molto complesso e sicuramente all'avanguardia.

Ma non è olografia.

3. LA VERA OLOGRAFIA

Per incontrare l'olografia vera bisogna guardare a laboratori di ricerca molto avanzati quali, per esempio, il mitico **Massachusetts Institute of Technology (MIT)**^{Nota 2}[2].

L'olografia è una tecnica per memorizzare su un supporto bidimensionale l'intensità e la fase del fronte d'onda emesso da una scena tridimensionale.

Fino ad alcuni anni fa l'unico modo per realizzare tale processo consisteva nel creare delle frange di interferenza su una lastra fotografica utilizzando un sistema ottico. Sostanzialmente si tratta della tecnica di Gabor migliorata e modificata da Emmett Leith e Juris Upatnieks [8][9] (figura 4).

La visualizzazione si ottiene proiettando un fascio laser con le stesse caratteristiche di quello usato in ripresa, attraverso la lastra fotografica contenente l'ologramma (figura 5). Il video reperibile in [12] mostra chiaramente il funzionamento delle tecnica tradizionale.

Fig. 4 – Schema di funzionamento della tecnica olografica tradizionale [10]

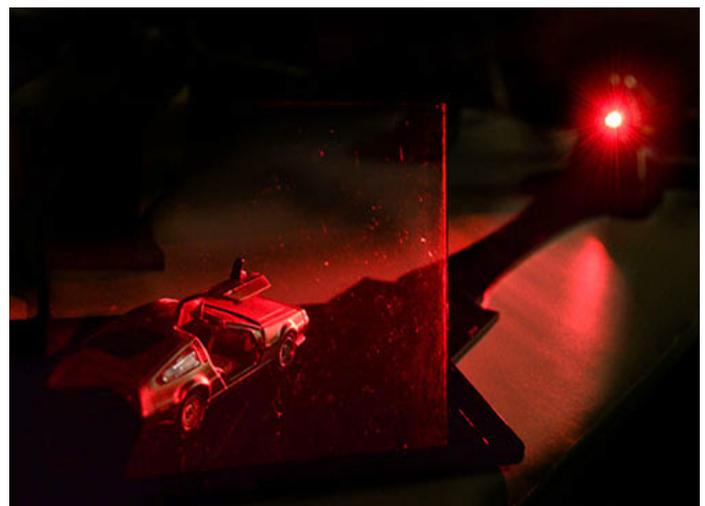
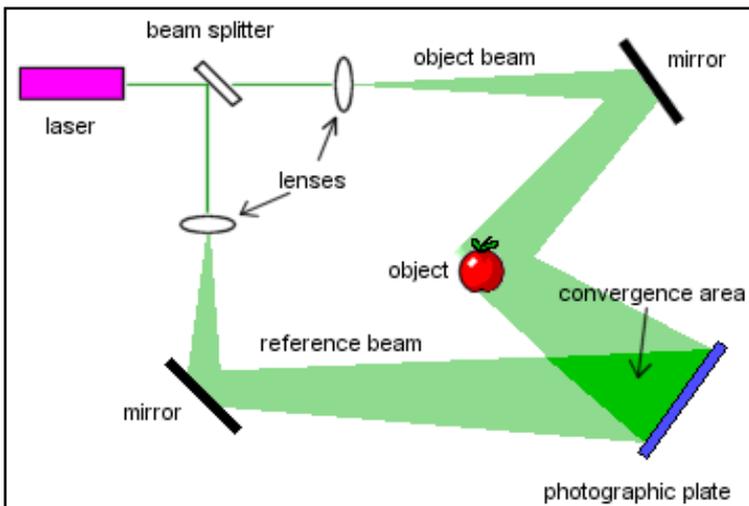


Fig. 5 – Riproduzione olografica (NB: il modellino di auto non è presente, quello che si vede è la sua riproduzione olografica) [11]

Nota 2 Ovviamente il MIT non è il solo centro di ricerca avanzato in tema di olografia: negli USA è molto attivo anche il **College of Optical Science** dell'**Università dell'Arizona (UA)** (<https://radio.azpm.org/s/14229-ua-researchers-pursuing-holographic-display/>); in Europa si segnala l'attività del **Fraunhofer-Gesellschaft** (<http://www.fraunhofer.de>); in Italia si può citare l'**Istituto Nazionale di Ottica (INO)** - <http://www.ino.it/> del **Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)**.

Fig. 6 – Riprese olografiche con MS Kinect camera (immagine tratta da[13])



Tale tecnica è difficilmente applicabile in esterno e non è adatta a riprendere oggetti di grandi dimensioni. In più la memorizzazione dell'ologramma su una lastra fotografica non è evidentemente adatta per immagini in movimento, mentre gli odierni sensori elettro-ottici non hanno la risoluzione necessaria. Complessivamente si tratta di un metodo poco pratico per riprese di tipo televisivo.

Al giorno d'oggi, però, le potenze di calcolo rese disponibili dai moderni computer offrono la possibilità di generare gli ologrammi anche con procedimenti numerici (**DH, Digital Holography; CGH, Computer Generated Holography**), consistenti nel calcolare le frange di interferenza tramite algoritmi matematici a partire da un modello rappresentativo in qualche modo dell'oggetto ripreso.

In alcuni casi si tratta di immagini particolari, per esempio *mappe di profondità* (usate al **MIT**), oppure un *insieme di immagini convenzionali* (metodo preferito all'**UA**).

In particolare ([14], [15], [16] - figura 6), al **MIT** utilizzano una **TOF (Time Of Flight)** camera (nello specifico una **Kinect** di Microsoft) per produrre in tempo reale una mappa di profondità della scena ripresa e da essa un algoritmo di simulazione ricava le frange di interferenza che vanno a comporre l'ologramma digitale; la problematica della capacità di calcolo richiesta è stata superata economicamente adottando delle comuni **GPU (Graphic Processor Unit)**.

Presso l'**Università dell'Arizona** ([17], [18]) usano, invece, un altro metodo, ricavando un modello tridimensionale dell'oggetto ripreso tramite una schiera di telecamere ubicate tutt'attorno all'oggetto stesso ([19]).

In ambedue i casi, in linea di principio, si possono utilizzare i canali trasmissivi convenzionali per trasferire le informazioni necessarie a generare l'ologramma da parte di un ricevitore equipaggiato con una potenza di calcolo sufficiente.

Si noti che in questo caso si potrebbe, sempre in linea di principio, ottenere anche una forma di compatibilità con altri tipi di visualizzatori volumetrici, per esempio autostereoscopici, o addirittura con display convenzionali 2D.

Anche nel campo dei display **MIT** e **UA** adottano tecnologie differenti che mostrano caratteristiche diverse: maggiore economicità e frame rate quasi televisivi per la tecnologia del **MIT**, maggiore definizione quella dell'**UA**.

Nella tecnica del **MIT** le figure di interferenza calcolate sono "caricate" su modulatori spaziali di luce (**SLM, Spatial Light Modulator**) per la successiva ricostruzione olografica, mentre nella tecnica sviluppata all'**UA** l'ologramma è memorizzato su una lastra di materiale polimerico riscrivibile appositamente sviluppato ([20], [21], [22]).



Fig. 7 – Modulatore spaziale di luce sviluppato presso il MIT (immagine tratta da [26])

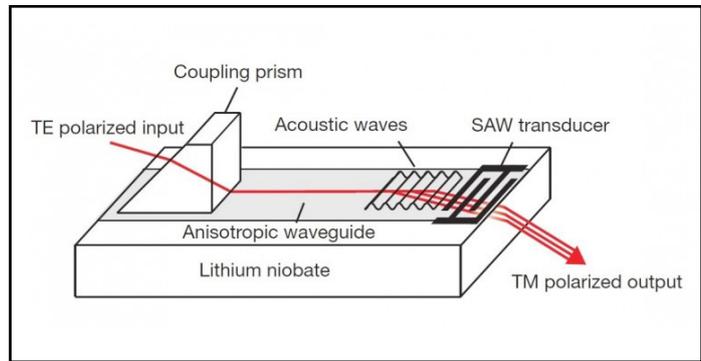


Fig. 8 – Schema del modulatore spaziale di luce sviluppato presso il MIT (immagine tratta da [25])

Lo schermo olografico adottato al MIT è il frutto di un lavoro di sviluppo decennale iniziato da S. Benton e proseguito sotto la guida di V. M. Bove ([23], [24], [25], [26]).

L'ultima versione del display, denominata "Mark III", adotta un modulatore composto da un piccolo cristallo di niobato di litio (figure 7 e 8).

Opportuni elettrodi generano, sfruttando la piezoelettricità del materiale, delle onde acustiche, cioè delle vibrazioni meccaniche, le quali modificano la disposizione spaziale degli atomi del cristallo, variando così l'indice di diffrazione delle guide d'onda ottiche in cui è incanalato il flusso luminoso.

Proiettando la luce in uscita dal modulatore su una lastra di vetro diffondente si ottiene l'immagine olografica.

I *pixel* così realizzati hanno dimensioni paragonabili a quelle della luce, come richiesto dalla tecnica olografica per ottenere le figure di diffrazione desiderate e l'immagine è modificabile nel tempo ad una frequenza relativamente elevata (15 Hz).

Si possono utilizzare luci di illuminazione di colori diversi, in particolare i tre primari colorimetrici, ottenendo olografie a colori. Non ultimo, sia il modulatore, sia il sistema complessivo sono relativamente economici e di piccole dimensioni.

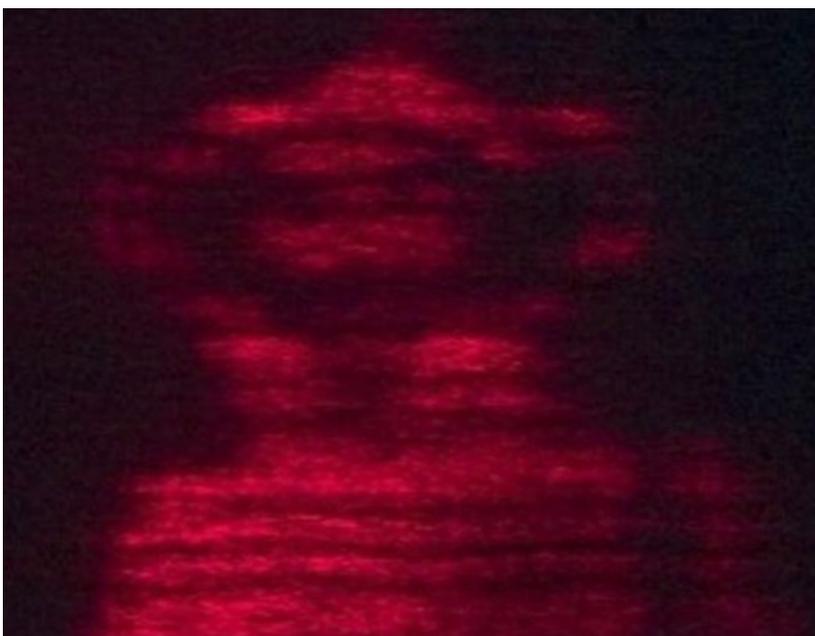


Fig. 9 – Esempio di ologramma prodotto al MIT (immagine tratta da [15])

L'Università dell'Arizona ha invece sviluppato un display costituito da materiale polimerico (figura 10) capace di registrare l'ologramma digitale alla frequenza di 0.5 Hz, notevolmente inferiore a quello del MIT, ma mostrando una qualità decisamente superiore (si paragoni la figura 9 con la figura 11).

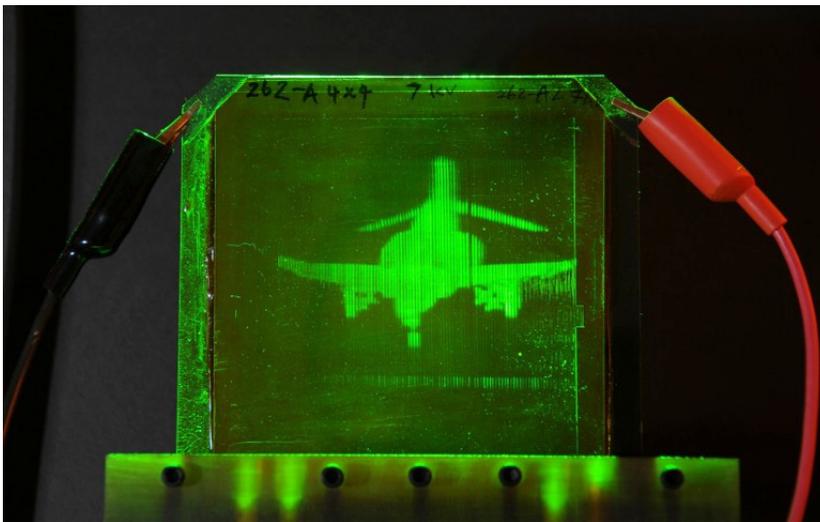


Fig. 10 – Display sviluppato presso la UA (immagine tratta da [19])

Fig. 11 – Esempio di ologramma prodotto presso l'UA (immagine tratta da [2])



I sistemi sviluppati al MIT e all'UA sono relativamente economici e di piccole dimensioni, tuttavia le immagini olografiche create con metodi numerici, in particolare quelle proiettate dinamicamente, in genere mostrano ancora alcuni limiti, come risulta evidente dalle figure 9, 10 e 11:

- **Scarsa qualità dell'immagine**, in particolare: presenza di macchie, elevato rumore, scarso contrasto e scarsa risoluzione;
- **Immagini monocromatiche**, con i procedimenti numerici diventa maggiormente difficile, a livello di sistema, ottenere ologrammi a colori;
- **Angolo di visione ridotto**, in linea di massima i modulatori hanno pixel di dimensioni molto maggiori delle lunghezze d'onda e questo implica che la visione tridimensionale possa avvenire solo in un angolo di visione estremamente limitato, inferiore a quello necessario per illuminare i due occhi;
- **Ridotte dimensioni dell'immagine**, la dimensione dell'immagine va determinata come compromesso con l'angolo di visione;
- **Immagini poco dinamiche**, a causa dell'elevata potenza di calcolo richiesta per calcolare gli ologrammi e per trasferire la mole di dati al modulatore ottico;
- **Mancanza di interattività**, siccome l'immagine tridimensionale ricostruita appare tra l'utente e il modulatore, la sua posizione relativa al mondo circostante varia a seconda della posizione dell'utente. Ciò rende impossibile ogni interazione immersiva nell'immagine olografica.

La tecnologia olografica è ancora immatura e la qualità complessiva delle immagini olografiche è ancora molto lontana da quella cinematografica o anche solo televisiva, ma le apparecchiature e il procedimento per la realizzazione di ologrammi stanno diventando più economici e applicabili nel mondo reale (vedi anche [27], [28]).

4. CONCLUSIONI

Spesso si usa a sproposito la parola *olografia* per indicare sistemi di proiezione commerciali, magari capaci di produrre spettacoli visivi molto coinvolgenti e di elevata qualità, ma basati su tecniche diverse dall'*olografia* vera e propria sviluppata da Gabor nel 1947.

Alcuni centri di ricerca molto avanzati continuano a lavorare migliorando la tecnica olografica con lo scopo di ridurre la complessità sistemistica ed il costo.

In fase di ripresa la tendenza attuale sembra quella di evitare la tradizionale tecnica ottica per la generazione delle frange di interferenza che compongono l'ologramma, ottenendolo, invece, tramite simulazione al calcolatore (**DH, Digital Holography**); in letteratura si è trovata indicazione di due metodi: uno basato su *mappa di profondità* (MIT), un altro su *riprese multivista* dell'oggetto ripreso (UA).

In fase di riproduzione la ricerca è incentrata sullo sviluppo di modulatori di luce caratterizzati da *pixel* di dimensioni molto ridotte – dell'ordine della lunghezza d'onda - capaci di supportare ologrammi variabili nel tempo a frame rate televisivi e ovviamente a colori, con una buona risoluzione e qualità visiva. Il tutto a costi ridotti.

Come riportato nel paragrafo precedente, i risultati finora ottenuti non mostrano ancora una qualità paragonabile a quella ottenibile con tecniche cinematografiche o televisive. Tuttavia, le tecniche di generazione digitale dell'ologramma permettono di eliminare molti dei problemi legati all'applicazione pratica della tecnica di ripresa tradizionale. Inoltre i modulatori ottici di più recente realizzazione risultano essere relativamente economici, anche se non sono ancora in grado di competere con le tecniche di visualizzazione tradizionali per quanto riguarda la qualità dell'immagine.

Complessivamente quindi le ricerche sulla tecnica olografica stanno avvicinando la tecnica olografica alle condizioni di pratica realizzabilità, anche se la strada per ottenere apparati *di consumo* sembra

ancora lunga.

Vi sono poi delle considerazioni, valide per ogni visualizzatore tridimensionale, relative al linguaggio per immagini [?].

In una visualizzazione stereoscopica ogni spettatore vede la stessa immagine anche perché essa è ripresa dallo stesso punto di vista. Al contrario, spettatori che assistono ad una visualizzazione tridimensionale, in particolare olografica, vedono l'oggetto riprodotto da punti di vista differenti a seconda della loro posizione rispetto all'immagine - d'altronde è esattamente ciò che ci si ripropone di ottenere con i visualizzatori volumetrici a partire dai display autostereoscopici, a quelli basati *sull'integral imaging*, ai display volumetrici veri e propri e in ultimo a quelli olografici.

Tuttavia, nel campo fotografico e cinematografico l'inquadratura supporta il messaggio: riprendendo un primo piano di una persona, per esempio un interlocutore in un dialogo, una cosa è vederlo frontalmente, altra è osservarlo da una posizione laterale rispetto alla testa (p.es. 90°) o addirittura da dietro (180°).

Ci pare di poter sostenere che in questo caso il linguaggio per immagini derivi direttamente dalla nostra fisiologia e dalle abitudini comportamentali: non per nulla da piccoli ci viene insegnato come rapportarci ai nostri interlocutori e il nostro atteggiamento verso essi fa parte di quella comunicazione non verbale che a volte è molto più significativa di quella verbale.

Quindi, davanti ad un display volumetrico è possibile che due utenti, magari seduti sullo stesso "divano del soggiorno", vedano due inquadrature diverse della stessa scena e conseguentemente ne ricavino messaggi differenti. Come si deve regolare il regista del film per veicolare lo stesso messaggio ai due utenti? Oppure possono nascere nuove modalità e nuove opportunità di espressione multimediale? In teoria potrebbe essere, ma si ha l'impressione che gestire tale possibilità sia piuttosto arduo. Senza contare che, come prima accennato, qualora si

considerino riprese soggettive o pseudo-soggettive, l'orientamento relativo dei soggetti ripresi supporta un significato che si rifà a consuetudini oseremmo dire derivate dalla nostra fisiologia piuttosto che ad un linguaggio convenzionale e che pertanto non deve essere stravolto dalle modalità di visualizzazione.

Pertanto, si ritiene che l'opportunità di utilizzare i display volumetrici in campo cinematografico e televisivo sia tutta da valutare. Tuttavia essi sono gli unici sistemi di visualizzazione tridimensionale multiutente che non necessitano di occhiali specifici e quindi la loro evoluzione è senz'altro da considerare con attenzione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mario Muratori, *Olografia – principi ed esempi di applicazioni*, in "Elettronica e Telecomunicazioni", Anno LV, Numero 3, Dicembre 2006, pp. 7-30
- [2] V. M. Bove Jr., *Live Holographic TV: From Misconceptions to Engineering*, SMPTE International Conference on Stereoscopic 3D for Media and Entertainment, 2011
- [3] Immagine tratta da <http://www.camillotrevisan.it/labmm05/materiali.htm> (ultimo accesso 13 febbraio 2015)
- [4] Fantasma di Pepper, [http://it.wikipedia.org/wiki/Fantasma di Pepper](http://it.wikipedia.org/wiki/Fantasma_di_Pepper) (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [5] Immagine tratta da <http://musion.com/eyeliner/> (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [6] Immagine tratta da <http://www.dday.it/redazione/10185/holho-cos-lo-smartphone-proietta-ologrammi.html> (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [7] Microsoft HoloLens Official Site, <http://www.microsoft.com/microsoft-hololens/en-us> (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [8] The University of Michigan, Emmett Leith & Juris

- Upatnieks Co-Inventors of Holography, http://um2017.org/2017_Website/Emmett_Leith_and_Juris_Upatnieks.html (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [9] P. C. Mehta, V. V. Rampal, *Lasers and Holography*, ed. World Scientific, pp. 258-263
- [10] Immagine tratta da <http://3d-stereogram.blogspot.it/> (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [11] Immagine tratta da <http://www.litiholo.com/gallery.html> (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [12] Litiholo Homepage, <http://www.litiholo.com/> (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [13] C. Dillow, *Mit's Kinect-powered real-time hologram system could bring holographic video chat home*, in "Popular Science", 24 gennaio 2011 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [14] D. Pescovitz, *Princess Leia demo with Kinect and holographic projector*, in "BoingBoing" (blog), 25 gennaio 2011 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [15] L. Hardesty, *3-D TV? How about holographic TV?*, in "MIT News on campus and around the world", 24 gennaio 2011 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [16] N. Eaton, *MIT creates Princess Leia hologram with Kinect (Wired)*, in "Seattle P-I The Microsoft blog" (blog), 28 gennaio 2011 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [17] D. Stolte, *Moving Holograms: From Science Fiction to Reality*, in "UANews", 3 novembre 2010 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [18] *Moving holograms: From science fiction to reality*, in "Science Daily", 3 novembre 2010 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [19] A. Rust, *University of Arizona takes 3D hologram route*, in "TechEye", 4 novembre 2010 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [20] N. Peyghambarian, S. Tay, P. Blanche, R. Norwood, e M. Yamamoto, *Rewritable Holographic 3D Displays*, in "Optics and Photonics News - July/August 2008", pp. 23-27
- [21] C. Dillow, *New Holographic Device Can Record and Display 3-D Holograms in Near Real Time*, in "Popular Science", 3 novembre 2010 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [22] K. Bourzac, *A Step toward Holographic Videoconferencing*, in "MIT Technology Review", 3 novembre 2010 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [23] L. Hardesty, *Cheap, color, holographic video*, in "MIT News on campus and around the world", 19 giugno 2013 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [24] J. D. Sutter, *Viewer-Plane Experiments with Computed Holography with the MIT Holographic Video System*, Tesi per Master of Science in Media Arts & Sciences, MIT 1994
- [25] B. Dodson, *New technology from MIT may enable cheap, color, holographic video displays*, in "Gizmag", 24 giugno 2013 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [26] K. Greene, *Practical Holographic Video*, in "MIT Technology Review", 24 aprile 2007 (ultimo accesso 3 maggio 2015)
- [27] S. Reichelt, R. Häussler, N. Leister, G. Fütterer, H. Stolle e A. Schwerdtner, *Holographic 3-D Displays - Electro-holography within the Grasp of Commercialization*, in "Advances in Lasers and Electro Optics", a cura di N. Costa e A. Cartaxo, ed. InTech, aprile 2010, capitolo 29
- [28] M. Kujawińska, T. Kozacki, *Digital holographic video*, presentazione al "3D Stereo media, Liège, 8-10 December 2010"