

Holográfia

Összeállította:

Antal Ákos

antalakos@antalakos.hu

Belső használatra.

Kivonat

A hologram segítségével az eredeti, teljes hullámfront másolata állítható elő. Ezt érzékeltette a jelenség elnevezésével a felfedező Gábor Dénes (1900-1979), aki azt, az egész, teljes jelentésű görög *holos* szóból származtatta. Az általa 1947-ben felfedezett jelenség, mint képrögzítési eljárás publikálása után hosszú ideig kellett még várni, amíg a 3D-s tárgyakról készített első hologramok megjelentek. Ennek oka az volt, hogy megfelelő minőségű hologram készítéséhez koherens fényforrásra volt szükség, viszont az első lézert csak 1960-ban építették. Megjelenésük után a holográfia gyors fejlődésnek indult.

1. Bevezető

A holográfia mint háromdimenziós képrögzítési és -rekonstruálási eljárás alkalmazása során a hologramlemez segítségével a szemlélő egy ablakon keresztül látja a rögzített és rekonstruált tárgyat a felvételi körülmények által adott térrész határai között. A rögzítésen, vagy a hologram készítésén a holografikus lemez, mint rögzítőeszköz megvilágítását, exponálását értjük; a rekonstrukció pedig egy hullámfront átbocsátását jelenti a hologramlemezen át. Ha a hagyományos hologram készítését egy fotofizikai folyamatnak fogjuk fel, akkor az exponálás és a rekonstrukció között egy fotokémia folyamat során állítjuk elő, stabil formában a hologramot.

1.1. A holografikus rögzítés

A holografikus rögzítés során nem alkalmazunk lencsés vagy tükrös leképezést; a tárgyról érkező hullámfrontot egy másik, az úgynevezett referencia-hullámfronttal interferáltatjuk, kölcsönhatásukat így kódoljuk, rögzítjük [11]. Ennek feltétele, hogy mindkét hullámfront koherens legyen, erre a célra a gyakorlatban lézert alkalmazunk. A hologramlemez síkjában az interferenciakép kerül rögzítésre. Amikor a rekonstrukció során a hologramot a változatlan referencia-hullámfronttal világítjuk meg, ezen az interferenciás csíkrendszeren – mely információt tartalmaz a tárgyhullámról [4,8], tehát a tárgyról – hajlik el, azaz diffraktálódik a hullámfront. Gábor Dénes érdeme, hogy elméleti úton levezette és kísérleti módszerekkel

igazolta, hogy a rekonstrukció során diffrakcióval keletkező hullámfrontok egyike megegyezik azzal a hullámfronttal, amely felvételkor a hologramlemezre érkezett a tárgyról. Ezért a rekonstrukció során a megfigyelő érzékelőjére ugyanaz a hullámfront érkezik, mint amilyen a tárgyról érkezett volna. A hologramot szemlélve a rekonstruált kép tulajdonságai megegyeznek a valósággal úgy a perspektíva, mint a takarások tekintetében.

1.2. A vastag hologram

Ha feltételeztük, hogy a holografikus lemez emulziójának vastagsága elhanyagolható, azt síkhologramnak hívjuk. Ha a rögzítő közeg vastag az alkalmazott hullámhosszhoz képest, az interferenciacsíkok réteges csíkcsoportként jelennek meg, és a rekonstruáló nyaláb általában több ilyen csíkcsoporton halad át. Ez a Bragg-diffrakcióhoz [1,2] hasonlóan jelenséget eredményez, részlegesen tükröző síkok által. A vastag hologram egyik figyelemre méltó jellegzetessége az a képesség, hogy ugyanazon fotoemulzióból többszörös látványt állít elő. Ha tehát a csíkok közötti távolság kisebb, mint az emulzió vastagsága, a rekonstruáló fény minden egyes sugara – amely a referencianyaláb irányából érkezik –, több, részlegesen tükröző síkon halad át. Ezért lehetséges, hogy sok hologramot készíthetünk ugyanabban a fényérzékeny közegben, mindegyiket különböző szögű referencianyalábbal. Ha később szemléljük ezeket a képeket, akkor a referencianyaláb szögét változtatva mindegyikük külön-külön szemlélhető. Ez a módszer kiválóan alkalmas rekonstrukciós során holografikus mozgókép létrehozására egy többszörös hologram referencianyaláb szögének megfelelő időbeli változtatásával. Számos próbálkozásról tudunk, amelyekkel megpróbálták a holográfiát a mozgó filmhez hasonlóan alkalmazni. A dinamikus holográfia alapelve, hogy a tükör forgásával szinkronizált lézer egymás utáni impulzusai hologramok sorozatát állítják elő a filmen. Másképpen magyarázva ha a vastag hologramot vékony hologramok összességének tekintjük, érthetővé válik, hogy bármilyen eltérés a felvételkor használt iránytól, a kép eltűnéséhez vezet. Ez a tulajdonság az irány szelektivitás. Ez teszi lehetővé, hogy ugyanarra a holografikus lemezre több hologramot vegyünk fel. Minden felvételkor a referencianyaláb más irányból világítja meg a holografikus lemezt. A vastag hologramok egy másik sajátos tulajdonsága a színszelektivitás. Fehér fényel megvilágítva egy vastag hologramot, a tárgy képe azon a színen jelenik meg amelyen a felvétel készült. Vastag hologramot először Jurij Nyikolajevics Denisjuk (1927-2006) készített 1962-ben.

1.3. Digitális holográfia

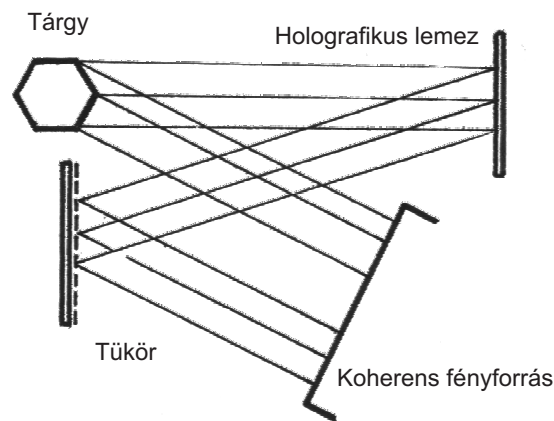
A hagyományos holografikus eljárások használatának egyik fő hátránya, hogy az exponált holografikus lemezt fotokémiai eljárással kell kidolgozni. Ehhez laboratóriumi körülmények szükségesek, és a felvételi nyersanyag is viszonylag drága. E problémákra kínál alternatívát a digitális holográfia, amely azt jelenti, hogy hologramlemez helyett általában CCD detektorral rögzítik a tárgyhullám és a referenciahullám által előállított interferenciaképet [12]. A rögzített hologramot számítógéppel tárolják és a rekonstrukció, azaz a kép megjelenítése numerikus feldolgozás segítségével történik [5–7]. Hátrány, hogy a jelenlegi, kereskedelmi forgalomban kapható digitális kamerák felbontása jóval kisebb, mint a holografikus lemezeké. Jellemzően a CCD mátrix pixelmérete legalább egy nagyságrenddel haladja meg a

hagyományos holografikus lemez felbontását. A CCD pixelek határozzák meg a maximális térfrekvenciát, ami olyan kicsi, hogy a tárgynyaláb és a referencianyaláb csaknem azonos irányból kell, hogy a kamera félvezető lapkájára essen. Ebből következik, hogy a rekonstruált kép felbontása jóval kisebb, mint egy hagyományos hologram által rekonstruált képé.

2. Hullámoptikai tárgyalásmód

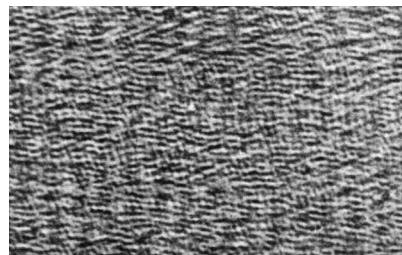
A hologram készítésének és megfigyelésének hullámoptikai tárgyalása szempontjából két jól elkülöníthető fázist különböztetünk meg; a holografikus felvétel készítését és a rekonstrukciót.

2.1. A holografikus felvétel



1. ábra. A holografikus felvétel

Az 1. számú ábrán látható elrendezésben a koherens fényforrásból kilépő hullámok egyrészt a vizsgálandó tárgyra, másrészt a síktükörrre vetülnek. A tárgyról visszaverődő – és arról információt hordozó – tárgyhullámok a holografikus lemez síkjában találkoznak a síktükörről visszaverődő, úgynevezett referenciahullámokkal, s ott egy sajátos, a 2. számú ábrán látható intenzitáseloszlást hoznak létre, mely fotofizikai, illetve fotokémia úton történő rögzítésével áll elő a hologram [9, 10]. A tárgy felületéről a holografikus lemez síkjába



2. ábra. Egy hologram erősen nagyított képe [1]

érkező hullám időfüggvénye:

$$\Psi_T(x, y) = A_T(x, y) e^{j[\omega t + \Phi_T(x, y)]}$$

ahol (x, y) a holografikus lemez egy pontjának koordinátája, $A_T(x, y)$ az amplitúdó, és $\Phi_T(x, y)$ pedig a fáziseloszlás. A holografikus lemezt azonban eléri a síktükörről visszaverődő referenciahullám is, mely időfüggvénye:

$$\Psi_R(x, y) = A_R(x, y) e^{j[\omega t + \Phi_R(x, y)]}$$

A Ψ_T és a Ψ_R egymással koherens hullámok, így a holografikus lemez síkjában az eredő hullám időfüggvénye a szuperpozíció elve alapján:

$$\Psi = \Psi_T + \Psi_R$$

A lemez fotokémia kidolgozása után a létrejövő feketedés arányos az expozíció során az azt érő fényenergia eloszlásával:

$$I(x, y) = |\Psi|^2$$

Behelyettesítve:

$$I(x, y) = |A_T e^{j[\omega t + \Phi_T]} + A_R e^{j[\omega t + \Phi_R]}|^2$$

Az egyszerűbb kezelhetőség kedvéért térjünk át a trigonometrikus alakra:

$$\Psi = A_T [\cos(\omega t + \Phi_T) + i \sin(\omega t + \Phi_T)] + A_R [\cos(\omega t + \Phi_R) + i \sin(\omega t + \Phi_R)]$$

Ezután

$$I = A_T^2 \cos^2(\omega t + \Phi_T) + 2A_T A_R \cos(\omega t + \Phi_T) \cos(\omega t + \Phi_R) + A_R^2 \cos^2(\omega t + \Phi_R) + \\ + A_T^2 \sin^2(\omega t + \Phi_T) + 2A_T A_R \sin(\omega t + \Phi_T) \sin(\omega t + \Phi_R) + A_R^2 \sin^2(\omega t + \Phi_R)$$

Átalakítva és rendezve

$$I = A_T^2 + A_R^2 + 2A_T A_R \cos(\Phi_T - \Phi_R)$$

Lineáris jellegű rögzítést feltételezve – ami kissé eltér a valóságos nyersanyag tulajdonságaitól, azonban ez a közelítés a jelenség leírását nem zavarja – a holografikus lemez transzmissziója a kidolgozás után:

$$\tau(x, y) = 1 - [A_T^2 + A_R^2 + 2A_T A_R \cos(\Phi_T - \Phi_R)]$$

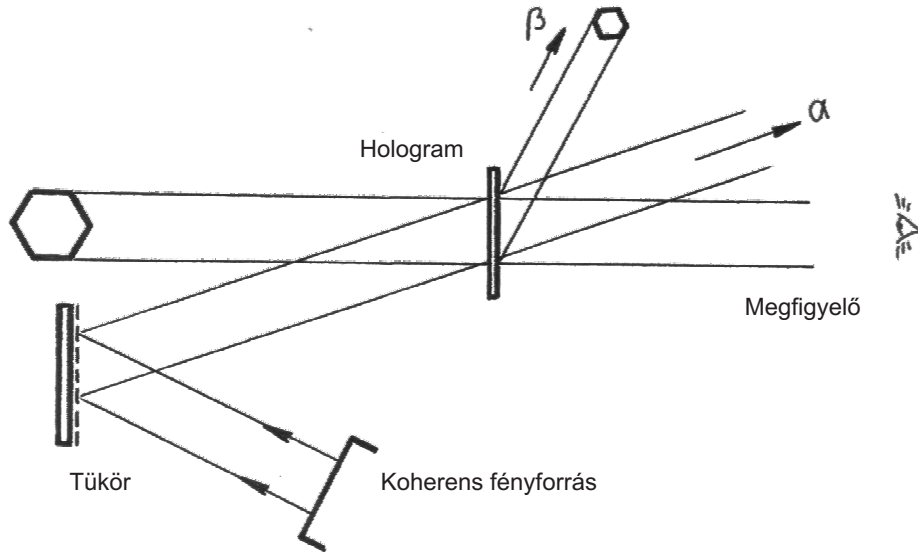
Vezessük be a következő jelölést:

$$\tau_0(x, y) = 1 - A_T^2 - A_R^2,$$

így

$$\tau(x, y) = \tau_0(x, y) - 2A_T A_R \cos(\Phi_T - \Phi_R)$$

Tehát ez az összefüggés írja le a hologram transzmisszió-eloszlását, tartalmazza a tárgy- és a referenciahullám amplitúdó- és fázisadatait.



3. ábra. A rekonstrukció

2.2. A rekonstrukció

A 3. számú ábra szerinti elrendezésben a már kidolgozott holografikus lemezen, azaz a hologramon bocsátjuk keresztül a felvétel készítésénél használt referenciahullámot. Az így létrejövő hullámfront időfüggvénye:

$$\Psi_V(x, y) = \tau(x, y) \Psi_R(x, y)$$

Behelyettesítve:

$$\Psi_V(x, y) = [\tau_0(x, y) - 2A_T A_R \cos(\Phi_T - \Phi_R)] A_R [\cos(\omega t + \Phi_R) + i \sin(\omega t + \Phi_R)]$$

Rendezve és átalakítva:

$$\begin{aligned} \Psi_V(x, y) = & A_R \tau_0(x, y) [\cos(\omega t + \Phi_R) + i \sin(\omega t + \Phi_R)] - \\ & - A_T A_R^2 [\cos(-\Phi_T + 2\Phi_R + \omega t) + i \sin(-\Phi_T + 2\Phi_R + \omega t)] - \\ & - A_T A_R^2 [\cos(\omega t + \Phi_T) + i \sin(\omega t + \Phi_T)] \end{aligned}$$

Exponenciális alakra hozva:

$$\Psi_V = A_R \tau_0(x, y) e^{j(\omega t + \Phi_R)} - A_T A_R^2 e^{j(\omega t + 2\Phi_R - \Phi_T)} - A_T A_R^2 e^{j(\omega t + \Phi_T)}$$

Ezen összefüggés első tagja az α irányban tovahaladó láthatatlan referenciahullámot, második tagja pedig egy amplitúdómodulált, és a referenciahullám fázisával megváltoztatott fáziseloszlású, β irányban továbbhaladó hullámot jelent, mely a tárgy elhajlási képének keletkezésére utal és a szemlélő számára láthatatlan marad. A harmadik tag az eredeti tárgy hullámmal arányos amplitúdójú hullámot jelent, mely a szemlélő számára a tárgy virtuális képét jeleníti meg. Ez egyben azt jelenti, hogy a hologram és a referenciahullám

segítségével sikerült rekonstruálni az eredeti tárgy hullámot. Ha a rekonstrukció során a keletkező hullámfrontok terjedési irány szerinti szétválasztása lehetővé válik, akkor egyben lehetséges azok független megfigyelése is. Ez azt is jelenti, hogy elő lehet állítani azt a hullámfrontot, amely eredetileg a felületről érkezett.

Hivatkozások

- [1] A. NUSSBAUM, R. A. PHILLIPS: *Modern optika mérnököknek és kutatóknak*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [2] BUDÓ Á., MÁTRAI T.: *Kísérleti fizika III*, Tankönyvkiadó, Budapest, 1980.
- [3] *Optika*, Panem–McGraw-Hill, Budapest, 1998.
- [4] J.-CH. VIENNOT, P. SMIGIELSKI, H. ROYER: *Holográfia optikai alkalmazásokkal*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [5] L. YAROSLAVSKY: *Methods of Digital Holography*, Springer, 1980.
- [6] L. YAROSLAVSKY: *Digital Holography and Digital Image Processing : Principles, Methods, Algorithms*, Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [7] U. SCHNARS, W. JUPTNER: *Digital Holography, Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*, Springer Verlag, 2005.
- [8] H. J. CAULFIELD, E. N. LEITH, AND I. N. DENISIUK: *The Art and Science of Holography*, Press Monograph Vol. PM124. SPIE, 2004.
- [9] P. HARIHARAN: *Basics of Holography*, Cambridge University Press, 2002.
- [10] P. HARIHARAN: *Optical Holography*, Cambridge University Press, 1996.
- [11] GYÍMESI F.: *Látványholográfia, holografikus mérés technika és digitális holográfia*, Magyar Tudomány 166:(12) pp. 1517-1520. (2005)
- [12] PAPP ZS., KORNIS J.: *A koherens optikai mérés technika legújabb eredményei és hasznosítási lehetőségük a közúti közlekedésben*, Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia, 2007.