

Digitális holográfia

1. Bevezetés

Mint az közismert, az ember térbeli látással rendelkezik. Ez részben abból adódik, hogy két szemmel sztereo látásra van módunk, azaz testünk vagy szemünk mozgatása nélkül is korábbi tapasztalataink alapján el tudjuk helyezni a térben az érzékelt tárgyakat, mivel két szemünk eltérő képet lát. Azonban még egy szemmel is lehetőségünk van bizonyos mértékben a térbeliség megítélésére, hiszen a különböző távolságban található tárgyakat csak akkor látjuk élesen, ha szemünk ún. akkomodációs, fókuszállítási képességét használjuk. Különböző távolságokra fókuszálva, és figyelve a tárgyak képének változását ezen a módon is térbeli képet alkothatunk környezetünkről. Tehetjük ezt annak ellenére, hogy érzékelőnk - a szem retinája - csak kétdimenziós.

Az általunk látottak rögzítésének egyik elterjedt módja a fényképezés. Ekkor a látáshoz hasonlóan a valóságos tárgyakat egy kétdimenziós felületre képezzük valamilyen optikai rendszer segítségével. Ha az elkészült fényképet nézzük, akkor a valóság szemléléséhez képest még két szemmel sem látunk ahhoz hasonló térbeli hatást. Ha különböző távolságokra fókuszálunk, legfeljebb a fényképet láthatjuk életlenül. A fénykép tehát kevesebb információt tartalmaz, mint amiről készítettük, a valóságban rendelkezésre álló információk egy része nem rögzült.

A hiányzó információ pedig nem más, mint a fény fázisa, ugyanis az érzékelők, detektorok csak a fény intenzitását észlelik. A holográfia újítása - amelyet Gábor Dénesnek köszönhetünk (1947), és amelyért Nobel-díjat kapott - éppen az, hogy közvetett módon mégis lehetővé teszi egy hullám fázisának rögzítését annak ellenére, hogy a holográfia is a fotónegatívokéhoz hasonló elvű képrögzítést alkalmaz. A holográfia „trükkje”, hogy a fázisváltozást intenzitásváltozássá változtatja/kódolja, azaz a detektorok számára is érzékelhetővé teszi. A kódolás megvalósítására az interferencia jelensége alkalmas, amelynél az eredő kép intenzitásának ingadozásai az interferáló fényhullámok *fáziskülönbségétől* függenek. A megvalósításhoz tehát a rögzítendő tárgyról kiinduló hullámon kívül egy másik hullámra is szükség van. A siker további feltételei, hogy a két hullám interferenciaképes legyen, ehhez nagy koherenciájú fényforrásokra (lézerekre) van szükség, valamint hogy az érzékelő felbontása elegendően nagy legyen ahhoz, hogy az interferenciaképet rögzíteni tudja. De mire jó egy ilyen interferenciamező? Amint azt alább látni fogjuk, a kidolgozott hologramlemez megfelelően megvilágítva a diffrakció révén úgymond rekonstruálja a kérdéses tárgyról szórt fény intenzitás és fáziseloszlását egyaránt, így a látvány teljesen háromdimenziós lesz. A hullámok fázisának rögzítése azonban nem csak érdekes látványt eredményezhet, hanem néhány optikai mérési eljárást is lehetővé tesz.

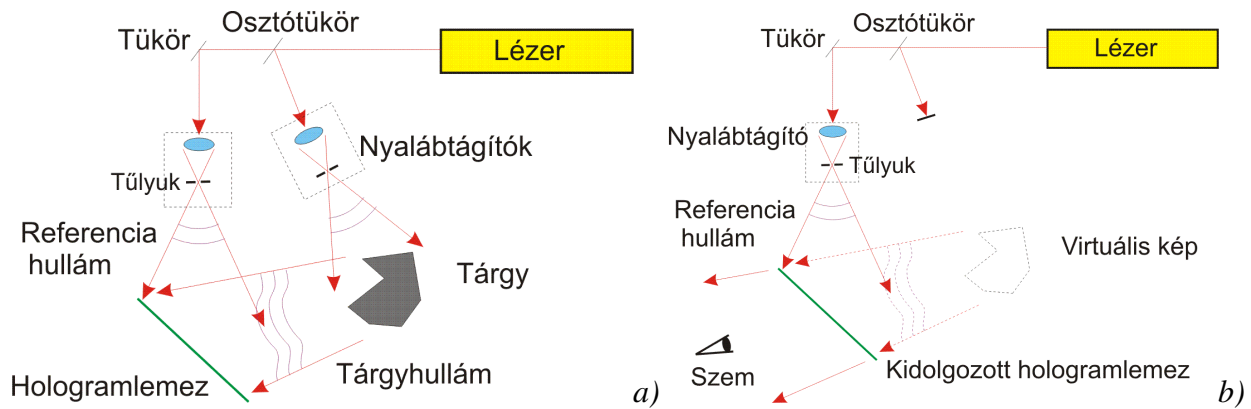
Jelen mérés célja két kisebb méretű és eltérő típusú hologram készítésén keresztül megismerkedni a hagyományos (analóg) holográfia alapjaival és gyakorlatával, valamint a digitális holografikus interferometrián keresztül megismerni egy konkrét alkalmazást (elmozdulásmező mérését), és jobban megérteni a holográfia lényegét.

2. Hagományos holográfia

Az ún. fehérfényű látványhologramok szemlélésnek elrendezése nagyjából mindenki előtt ismert kiállítások révén: a kidolgozott hologramlemezt erős pontszerű fényforrással világítják meg, pl. spotlámpával. Azonban történetileg nem ez a hologramtípus az első, és az alapjelenség illetve a készítés megértéséhez sem ez a legalkalmasabb típus.

Hologram készítésének egyik lehetséges elrendezését mutatja az 1/a. ábra. Ezzel az elrendezéssel ún. transzmissziós off-axis (nem tengelyen lévő a lemez normálisát nézve) hologram készíthető. Fényforrásnak lézert használunk, mely nagyfokú koherenciája révén biztosítja az interferenciaképességet. Ehhez továbbá ki kell zárni más természetes és hagyományos fényforrásokat, tehát a tárgyat külön meg kell világítani a lézerfényvel. A két hullám előállításához ezt a fényt először két részre bontjuk egy részben áteresztő nyalábosztó tükör segítségével. A

nyalábok terelésére más tükrökre is szükség lehet. A kiterjedt tárgy megvilágításához a keskeny, pár milliméter átmérőjű lézernyalábot egy nyalábtágító eszközzel – amely egy rövid fókuszú mikroszkóp objektív és annak fókuszpontjába helyezett tüllyuk - megfelelő méretűre kell állítani, és az interferenciához szükséges, ún. referencia nyalábot szintén ki kell tágítani, hogy a két hullám találkozásának helye, az interferencia „térfogata” is megfelelően nagy legyen.



1. ábra: Transzmissziós off-axis hologram rögzítése (a) és rekonstrukciója (b)

Ebbe a térrészbe helyezzük a fényérzékeny hologramlemezt, amely a negatív filmekről eltérően többnyire szilárd hordozóra (pl. üveglap) felvitt nagy felbontású fényérzékeny réteget jelent. A hologramlemezek térbeli felbontása egy-két nagyságrenddel nagyobb, mint a színes negatív filmeké! Az interferenciakép, az ún. *holografikus rács* akkor rögzíthető jó minőségben, ha a két találkozó hullám intenzitásának aránya, valamint együttes intenzitásuk, és az exponálás ideje is megfelelő. Mivel az expozíciós idők másodperc nagyságrendűek is lehetnek, arról is gondoskodni kell, hogy a rács és a hologramlemez egymáshoz képest ne mozogjon/rezegjen, ezért az egész elrendezést speciális optikai asztalra szokás helyezni, amely rezgésmentes, és kellő merevségű, valamint más zavaró hatásokat is ki kell zárni (pl. légáramlatok, háttérfény). Érdeemes megjegyezni, hogy az 1/a. ábrán látható elrendezésben nem található a fényképezésnél vagy a látásnál meglévő leképező lencse. Bár használata nem tilos, de nem is célszerű. Mivel ebben az elrendezésben a tárgy és a referencia hullám jelentős szögét zár be egymással, ezért hívjuk off-axis hologramnak.

Az így exponált hologramlemezt elő kell hívni, vegyileg kidolgozni, ezáltal tartósan rögzíteni a rajta tárolt képet. Ezen a képen azonban eltérően egy fényképtől önmagában nem látható semmi, ami az eredeti tárgyra hasonlítana, pl. egy negatív kicsinyített képmás, mint a fényképezésnél. Ez nem is csoda, hiszen a tárgy felől érkező hullámot a referenciával módosítottuk, és leképezést sem alkalmaztunk. A megfelelő kép előállításához egy másik lépésre, a hologram rekonstrukciójára van szükség, ami amolyan „dekódolás” is: ez látható az 1/b. ábrán. Az elrendezésből a tárgyat és annak megvilágító nyalábját elhagyva a referencia hullám *diffraktálódik* a már kidolgozott és visszahelyezett hologramlemezen létrejött rácsosaton, mivel azon a kidolgozás módjától függően vagy sötét és világos részek váltják egymást (amplitúdó hologram), vagy kisebb és nagyobb törésmutatójú részek (fázis hologram).

A tárgy virtuális térbeli képe (amely ernyőn nem fogható fel) annak eredeti helyén jelenik meg, ha a lemez másik oldaláról szemlélődünk, továbbá ideális esetben azonos méretben és irányításban látható. Különböző irányokból másként látszik, tehát két szemmel nézve sztereo képet ad. A különböző mélységben található részekre rá lehet fókuszálni szemmel, így a térbeli mélysége is megvan. Azonban van néhány korlátozó eltérés is: mivel mind a hologram rögzítéséhez, mind a rekonstrukcióhoz monokromatikus lézer fényforrást kell használni, a holografikus kép eredendően egyszínű, valamint a sík hologramlemez véges mérete miatt a virtuális tárgy többnyire nem járható körbe, a lemez mérete korlátozó ablakot jelent. Mivel a szemünkbe az ábra elrendezése szerint jutó fény áthaladt a lemezen (a referencia megvilágítás a lemez másik oldalán van, mint a szem), ezért ez a virtuális kép transzmissziós. A diffrakció révén azonban létrejön egy a rajzon fel nem tüntetett valós (ernyőn felfogható) kép is a lemez átellenes oldalán, amely így szintén transzmissziós. Mivel

a hologram off-axis, a valós kép és a szem helye nem esik egybe, azaz a kétféle kép különböző irányba terjed.

Az eredeti tárgyhullám másának visszanyerése matematikailag az alábbi egyszerű módon látható be. Tekintsük a fényhullám amplitúdóját a hologramlemez közvetlen környezetében. Felvételkor a lemezhez érkező két hullám komplex amplitúdója legyen az $\mathbf{r}=\mathbf{R}(x,y)\exp(i\varphi_r(x,y))$ referencia, és a $\mathbf{t}=\mathbf{T}(x,y)\exp(i\varphi_t(x,y))$ tárgyhullám, ahol R és T valós értékű amplitúdók. A referenciahullám R erőssége a lemeznél már csak lassan változik, gyakorlatilag állandónak tekinthető. A lemez által rögzített intenzitás, azaz interferenciakép

$$I(x,y)=|\mathbf{r}+\mathbf{t}|^2=\mathbf{R}^2+\mathbf{T}^2+\mathbf{r}\mathbf{t}^*+\mathbf{r}^*\mathbf{t} \quad (1)$$

formában írható le, ahol a * a komplex konjugálást jelöli. Ideálisnak tekintett, lineáris átvitelű hologramlemez esetén a feketedés ennek állandósorozosa lesz, így az előhívott lemez τ fényáteresztő képessége

$$\tau(x,y)=1-\alpha I(x,y) \quad (2)$$

alakú, ahol α egy anyagállandó. Rekonstrukciókor a hologramlemezt az eredeti referenciahullámmal átvilágítva a lemez mögött közvetlenül az amplitúdó

$$A(x,y)=\mathbf{r}(x,y)\tau(x,y)=\mathbf{r}(1-\alpha\mathbf{R}^2-\alpha\mathbf{T}^2)-\alpha\mathbf{r}^2\mathbf{t}^*-\alpha\mathbf{R}^2\mathbf{t} \quad (3)$$

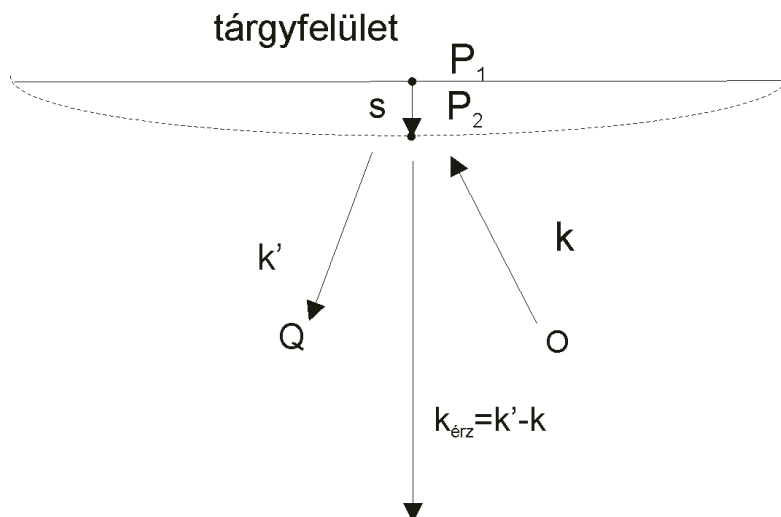
alakot ölt. Ennek első tagja a referenciahullám áthaladó hányada, második \mathbf{t}^* -al arányos tagja egy fókuszálódó konjugált kép, harmadik \mathbf{t} -vel arányos tagja pedig az eredeti tárgyhullám mása (vegyük észre, hogy az arányossági tényezők mind valós állandók!). Ez virtuális képet ad, mivel közvetlenül a hologramlemez mögötti síkdarabon így ugyanolyan hullámtér áll elő (fázisát is tekintve, hisz \mathbf{t} komplex), mint az eredeti tárgyról érkező fény esetén. A (3) összefüggést épp ezért a *holográfia alapegyenletének* is nevezik. Off-axis hologram esetén ez a három elhajlási rend (0 és ± 1) irányban szétválk, ellenkező esetben viszont nem. (Megjegyzés: ha a lemez viselkedése nem teljesen lineáris, megjelenhetnek magasabb diffrakciós rendek is)

A fejezet elején említett fehérfényű látványhologramok az eddig tárgyalt típustól abban térnek el, hogy in-line elrendezésűek, azaz a nyalábok a lemez normálisával nulla vagy kis szöget zárnak be, valamint reflexiók elrendezésűek: a referencia és a tárgynyaláb a lemez átellenes oldaláról érkezik, rekonstrukciókor pedig a megvilágítás és a megfigyelés van azonos oldalon. Ekkor tehát a valós és a virtuális kép egybeesik, így a valós kép érdemben nem figyelhető meg. Fehér fényben ezek a hologramok azért tekinthetők meg, mert kb. 8-10 μm vagy még vastagabb fényérzékeny réteget tartalmazó lemezre készülnek, így már ún. *vastag hologramnak* tekinthetők a hullámhosszhoz képest. A vastag diffrakciós rácsok ún. Bragg-effektust mutatnak: a kevert fényből csak a rögzítésnél használthoz közeli hullámhosszakon diffraktálnak jelentősen, így „szelektálnak” a színek között, továbbá érzékenyek a rekonstrukciónál alkalmazott megvilágítás irányára is, amelynek nagyjából azonosnak kell lennie a felvételkori referencia nyaláb irányával, ez pedig egy irány szelektivitást jelent. Ez utóbbi tulajdonságnak köszönhetően vastag hologramlemezbe többet is lehet exponálni úgy, hogy a rögzített képek közül lényegében mindig csak egy rekonstruálódik a megvilágítás irányától függően. (Minél vastagabb, „térfogatibb” egy hologram, annál szelektívebb, így szélsőséges esetben rengeteg hologram (vagyis kép, azaz akár bináris adat) rögzíthető a fényérzékeny anyag egyazon térfogatába. Ez az alapja a holografikus adattárolásnak.)

3. Holografikus interferometria

Mivel a rekonstruált tárgyhullám komplex amplitúdóját maga az eredeti tárgy határozza meg, pl. annak alakja, felületi minősége, a hologram ezekről is tárol valamennyi információt. Ha egyetlen tárgyról annak két különböző állapotában készítünk egy-egy hologramot ugyanarra a lemezre egymás után (azonos referenciával), majd ezt kidolgozzuk, az így kapott lemezt kétexpozíciós

hologramnak hívjuk. Rekonstrukciókor a két állapot *egyidejűleg* jelenik meg, azaz az $A(x,y)$ hullám-amplitúdóban egy t_1 -el és egy t_2 -vel arányos tag is szerepel (az indexek az állapotokat jelölik), ez pedig nem más jelent, mint hogy a két állapothoz tartozó tárgyhullám interferál egymással, így a tárgy holografikus képén jellemzően egy görbevonalú interferencia-csíkrendszert látunk, amely a tárgy megváltozását (vagy alakját) jellemzi. Például ha a tárgy egy deformálható befogott fémlap volt, és a két expozíció között mikrométeres nagyságrendben deformáltuk, akkor az elrendezés geometriájától függően pl. a síkra merőleges elmozdulás-komponenes ún. kontúrvonalai lesznek láthatók. (Erre példa a tanszék folyosóján lesz látható.)



2. ábra: Az érzékenységi vektor szemléltetése

Ennek a tárgyhullámok által alkotott interferenciamezőnek a fázisát (azaz a hullámok fáziskülönbségét) matematikailag az alábbi módon jellemezhetjük. A 2. ábra szerint legyen \mathbf{k} a tárgyat megvilágító nyaláb hullámvektora, \mathbf{k}' pedig a tárgyról szórt nyaláb hullámvektora ($|\mathbf{k}|=|\mathbf{k}'|=2\pi/\lambda$, és a vastag szedés itt nem komplex számot, hanem vektort jelöl). A felület egy adott pontjának helyét jelöljük P_1 illetve P_2 -vel a tárgy két állapotában, O és Q legyenek rögzített pontok a hullámterjedés során a tárgyról történő szóródás előtt illetve után. Tegyük fel azt is, hogy a megvilágítás síkhullám, a megfigyelést pedig egy adott irányból végezzük, így \mathbf{k}' is kb. állandó. A két expozíció során a tárgyhullám felvett fázisa O és Q között:

$$\varphi_1 = \underline{OP_1}\mathbf{k} + \underline{P_1Q}\mathbf{k}' \quad \text{illetve} \quad \varphi_2 = \underline{OP_2}\mathbf{k} + \underline{P_2Q}\mathbf{k}' \quad (4)$$

így a fáziskülönbség:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \underline{P_2P_1}\mathbf{k} + \underline{P_1P_2}\mathbf{k}' = \mathbf{s}(\mathbf{k}' - \mathbf{k}) = \mathbf{s}\mathbf{k}'_{\text{érz}} \quad (5)$$

azaz a felület egy adott pontján az interferenciacsíkok fázisát csak az $\mathbf{s} = \underline{P_1P_2}$ elmozdulásvektor és a $\mathbf{k}'_{\text{érz}}$ úgynevezett *érzékenységi vektor* határozzák meg. Mivel általános esetben az elmozdulásvektor a felület különböző részein nem állandó, a fáziskülönbség is helyfüggő lesz. A skaláris szorzásból látható, hogy az \mathbf{s} vektornak csak az érzékenységi vektor irányú komponense számít, azaz csak az mérhető. Az érzékenységi vektor iránya és hossza is változtatható, ha a megvilágítás illetve a megfigyelés (szemlélés) irányát változtatjuk, így pl. ha mozgunk egy kétexpozíciós hologram előtt, a csíkrendszer is mozog, változik. (Lásd a folyosón kiállított szélső hologramot!)

A fentiekhez hasonló, a tárgy megváltozását kontúrozó interferenciacsíkokat lehet látni akkor is, ha csak egyet exponálunk a tárgyról, a kidolgozott hologramlemezt tized-mikrométeres pontossággal (!) visszahelyezzük az erre alkalmas tartóba, majd a tárgyat továbbra is az eredeti nyalábokkal megvilágítva deformáljuk. Ekkor az eredeti állapot képe interferál a megváltozott állapot *élő* képével, így ahogy változik a deformáció, úgy változnak az interferenciacsíkok is. Ennek

az igen látványos módszereknek a neve *real-time holografikus interferometria*, és annak ékes bizonyítéka, hogy megfelelő technológia mellett a fázishelyes fényhullám rekonstrukciót mennyire komolyan lehet venni.

4. Digitális holográfia

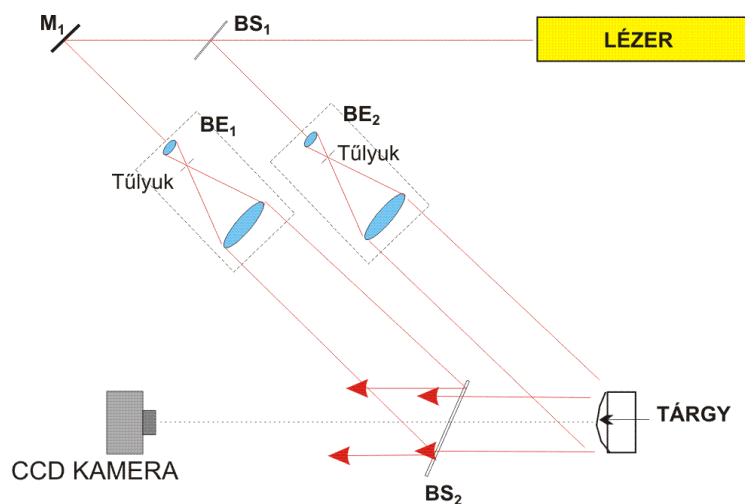
A lézeres hagyományos holográfiával szinte egyidős az a szándék (és az első kezdetleges megvalósítás is), hogy a referencia és a tárgyhullám interferenciájának eredőjét, a holografikus rácsot elektronikus vagy digitális jel formájában kezeljék. Ez egyrészt jelentheti a létező hullámfrontok által generált interferencia mező digitális megörökítését, másrészt jelentheti a digitálisan kiszámolt hologram valós rekonstrukcióját. Az elektronikus eszközök használatának további előnye még a körülményes kémiai eljárások mellőzhetősége is.

A digitális holográfia fejlődését sokáig hátráltatta három eszköz fejletlen volta:

- Megfelelő képbeviteli eszköz nélkül a tárgyhullám és a referenciahullám finom struktúráját nem lehet megörökíteni. Ez nem csak nagy (kb. 100 vonal/mm) felbontást jelent, hanem a szükséges jel/zaj viszonyt és stabil képbevitelt is.
- A hatalmas adatmennyiség kezelése nagy számítási kapacitást igényel.
- A hullámfrontok rekonstrukciója nagyfelbontású megjelenítő eszközt kívánna.

A hagyományos fotografiai eljárások fejlettsége (mint amelyeket a nyomtatott áramkörök készítésénél alkalmaznak) először a digitálisan kiszámolt hologramok valós rekonstrukciójának vizsgálatát tette lehetővé. Ezt a szűkebb kutatási területet manapság számítógépes holográfiának nevezik. A nagyteljesítményű számítógépek megjelenése, rohamos fejlődése, valamint a nagy felbontású CCD és CMOS kamerák kifejlesztése idővel lehetővé tette a létező hullámfrontok által generált interferencia mező digitális megörökítését is. Az elmúlt évtizedben megjelent új eszközcsalád - a térbeli fénymodulátorok (SLM) - pedig a digitális hologramok valós idejű megjelenítését teszik lehetővé. Mindezeknek köszönhetően a digitális holográfia teljesítőképessége elérte azt a szintet, hogy mérés-technikai alkalmazásai is léteznek.

Röviden érdemes megjegyezni, hogy az analóg, kémiai, kétdimenziós képérzékelő és fénymoduláló hologramlemez cseréje szintén kétdimenziós digitális eszközökre nem érinti a holográfia lényegét/elvét, a fázisinformáció intenzitásba kódolását, ezért is működhetnek a digitális változatok.



3. ábra: Digitális hologram rögzítésére szolgáló optikai elrendezés

Digitális hologram felvételére lényegében egy a hagyományos holográfiában is alkalmazott optikai elrendezést kell megépíteni, melynek vázlatja a 3. ábrán látható. Az elrendezés Mach-Zender típusú interferométer, melyben a BS_1 nyalábosztó tükrön áthaladó fény kitágítás és párhuzamosítás/kollimálás után (kollimátoros nyalábtágító, BE_1) alkotja a sík referenciahullámot. Az osztón tükröződő fény kitágítás és kollimálás után (BE_2) megvilágítja a tárgyat, a tárgyról szóródott fényhullám pedig a BS_2 nyalábosztón egyesül a referencia hullámmal, és együtt jutnak a

CCD kamerára. (Az analóg holográfiához hasonlóan az elrendezésben legtöbbször nem található lencse, bár létezik ilyen megvalósítás is.)

A legfontosabb eltérés a digitális holográfiában alkalmazható elrendezések kiválasztásánál a digitális kamerák és a hologramlemezek felbontása közötti különbségből adódik. Míg egy hologramlemez elemi érzékelőinek (anyagsemcsék) mérete/távolsága a látható fény hullámhosszával összemérhető, a digitális kamerák képpontjainak mérete jellemzően egy nagyságrenddel nagyobb, átlagosan 4-10 μm . A mintavételezési tétel csak akkor teljesül, ha a holografikus rács állandója nagyobb, mint két képpont (kamera pixel). Ez akkor valósul meg, ha a tárgy látószöge a kamera egy pontjából nézve elég kicsi, és ha a referenciahullám a tárgyhullámmal kis szöget zár be. (Megjegyezzük, hogy mivel a kamerák mintavételezése integráló jellegű, és nem pontszerű, a mintavételezési tétel megszegése csak folytonos kontrasztszökkenést okoz a rögzített képeken, tehát kis mértékben még megszeghető a feltétel.) E felbontásbeli különbség miatt a hagyományos holográfia megengedi a tárgy és a referencia nyaláb 1. ábrán látható nagyszögű találkozását, a digitális holográfia a technológia jelenlegi állása mellett azonban nem, így csak kvázi – de nem teljesen - in-line elrendezés használható. A digitális kamerák érzékenysége és dinamika tartománya (jelszintek, szűrkeségi szintek száma) szintén eltér a hologramlemezekétől, így az exponálás feltételei is mások lesznek.

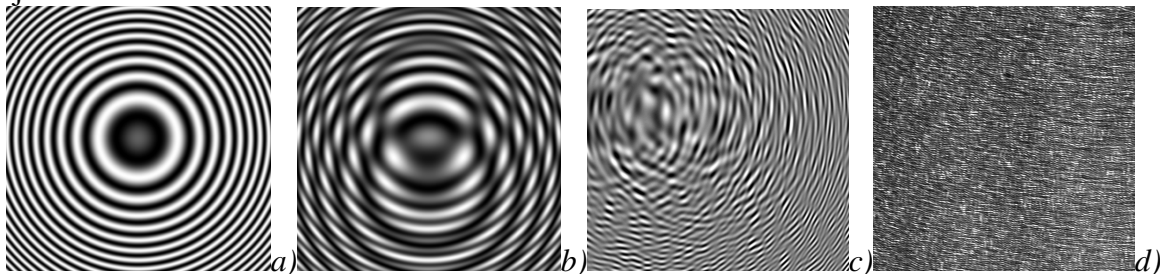
Mint ismeretes, két síkhullám interferenciája során a keletkezett interferencia csíkrendszer legkisebb térközöltsége: $d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\Theta}{2}}$, ahol Θ a terjedési irányok közötti szög. Ezt az összefüggést

felhasználva, és figyelembe véve a mintavételi tételt egy adott képpontméretű (Δx) kamerára megadható az a maximális szög, amelyet a tárgyhullám és a referenciahullám bezárhat:

$\Theta_{\max} \approx \frac{\lambda}{2\Delta x}$. Ez a szög a digitális kamerák pixelméretei mellett és látható fény esetén tipikusan 3°

körül van, ez indokolja a 3. ábrán látható elrendezés használatát.

Szemléltetésképp a 4. ábra digitális hologramokra mutat példát: az a)-c) ábrák szimulált hologramokat, a d) ábra egy a fenti elrendezésben rögzített valós tárgy digitális hologramját mutatja.



4. ábra: Digitális (amplitúdó) hologramok: a) egy pontforrás b) két pontforrás c) 1000 pontforrás d) valós tárgy digitális hologramja

A digitális hologramok numerikus rekonstrukciójához (digitális rekonstrukció) az analóg amplitúdó hologramok optikai rekonstrukcióját szimuláljuk a számítógépen. Ha a hologramlemezt mint amplitúdó moduláló eszközt (transzparenciát) a referenciahullámmal átvilágítjuk, akkor sík referenciahullám esetén ennek az az egyszerű modell felel meg, hogy tekintsük a digitális hologramot a hullámfront amplitúdójának, melynek fázisa egyébként állandó. Ez megfelel a valóságban a közvetlenül a hologramlemez mögött észlelhető hullámnak. Ha a referenciahullám gömbhullám volt, akkor a digitális hologramhoz állandó fázis helyett gömbhullám fázisát kell rendelni, így ekkor már komplex amplitúdójú hullámot kapunk.

Ismert tehát a hullám közvetlenül a virtuális hologramlemez mögött, a következő lépés a hullám terjedésének szimulációja. Mivel a valós tárgy és a CCD kamera távolsága véges volt, a terjedést is ebben a véges távolságban kell kiszámolni. Lencse nem szerepelt az optikai elrendezésben, tehát szabad hullámterjedéssel van dolgunk, azaz diffrakciós integrált kell numerikusan kiszámolni. A CCD kamera korlátozott felbontásából és a kis térszögű hullámok alkalmazásából rögtön következik, hogy alkalmazható a Fresnel-féle parabolikus/paraxiális

közelítés, ami nagy könnyebbséget jelent a számolás szempontjából, mivel így az visszavezethető egy Fourier-transzformációra. A diffrakció Fresnel-közelítésben esetünkben az alábbi módon írható fel:

$$A(u, v) = \frac{i}{\lambda D} e^{\left[-i \frac{\pi}{\lambda D} (u^2 + v^2)\right]} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) h(x, y) e^{\left[-i \frac{\pi}{\lambda D} (x^2 + y^2)\right]} e^{[i 2\pi (xu + yv)]} dx dy \quad (6)$$

ahol $A(u, v)$ az eredmény (rekonstruált kép) komplex amplitúdó eloszlása, tehát fázisinformáció is van (!), $h(x, y)$ a digitális hologram, $R(x, y)$ a referencia komplex amplitúdója, D a rekonstrukció/tárgy/kép sík távolsága a hologramtól (CCD kamerától), λ pedig a fény hullámhossza. A fenti összefüggést a Fourier-transzformáció segítségével tovább írhatjuk, valamint áttérve diszkrét numerikus koordinátákra:

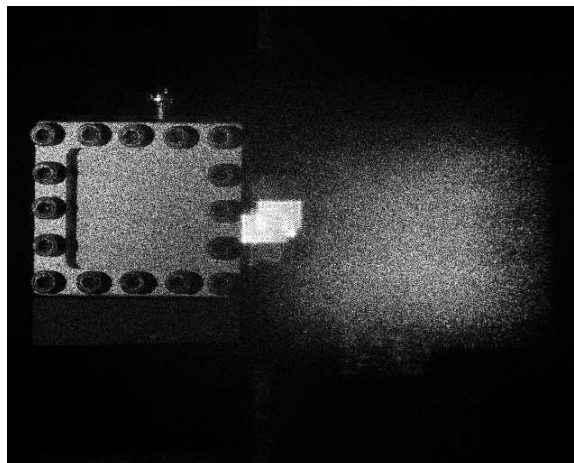
$$A(u', v') = \frac{i}{\lambda D} e^{\left[-i \frac{\pi}{\lambda D} ((u' \Delta x')^2 + (v' \Delta y')^2)\right]} \mathfrak{F}^{-1} \left\{ R(x, y) h(x, y) e^{\left[-i \frac{\pi}{\lambda D} ((k \Delta x)^2 + (l \Delta y)^2)\right]} \right\} \quad (7)$$

ahol $\Delta x, \Delta y$ a CCD képpontmérete, k, l illetve u', v' pedig képpont koordináták a hologram illetve a kép síkjában. A Fourier-transzformáció megjelenése azért előnyös, mert gyors-Fourier-algoritmus (FFT) alkalmazásával már rendkívül gyorsan kiszámolható az egész integrál. (Megj.: Sok esetben az integrál előtti tényezők figyelmen kívül hagyhatók)

Látható, hogy a numerikus rekonstrukció paraméterei a D rekonstrukciós távolság kivételével tulajdonképpen adottak, mivel mind a hologram képpontméretei, mind a fényhullámhossz már a hologram felvételekor meghatározottak. A D távolságot azonban viszonylag szabadon lehet - és mélységben tagolt tárgy esetén kell is - változtatni, még hozzá a valós tárgy-kamera távolság környékén, így az $A(u, v)$ -ből képzett intenzitás-eloszlásban a tárgy éles képe lesz látható. (Ez ahhoz hasonlít, mint mikor fókuszálunk a fényképezésnél, amikor is kell találnunk egy olyan tárgytávolságot, amelynél a tárgy minden része elfogadhatóan éles.) Az előző összefüggéssel kapcsolatban még meg kell jegyezni, hogy a Fourier-transzformáció megköti az (u, v) képsíkbeli $\Delta x', \Delta y'$ képpontméretet az alábbiak szerint:

$$\Delta x' = \frac{\lambda D}{\Delta x N} \quad (8)$$

ahol N a gyors-Fourier-algoritmusban alkalmazott (lineáris) mátrixméret. A fenti összefüggés szerint tehát a képsíkbeli képpontméret változik, még hozzá egyenesen arányos a D rekonstrukciós távolsággal. Ezt a rekonstruált képen látható méretek helyes értelmezéséhez figyelembe kell venni!



5. ábra: Digitális hologram rekonstrukciójának intenzitás eloszlása a virtuális tárgy-/képsíkban.

A 5. ábrán példaképp egy mérésben rögzített digitális hologram számítógépes rekonstrukciója látható. A tárgy egy 40 mm x 40 mm belső méretű, peremén befogott 0,2 mm vastagságú bronz lemez (membrán) volt. A lemez felületét fehérre festettük a jobb reflexió miatt, de a felület képen látható szemcsészettsége nem a festés hibája, hanem a matt felület lézeres megvilágítása miatt látható, és minden hasonló mérésben a képzaj egyik forrása. A mérésekben ilyen, vagy ehhez

hasonló tárgyakat használunk akár interferometrikus pontosságú mérésekre is. Az ábrán nem csak a tárgy éles képe, hanem középen egy igen fényes nyaláb, rá középpontosan tükrösen pedig egy szórt nyaláb is látható. Ez a három folt nem más, mint egy valódi hologram rekonstrukciójánál is látható három elhajlási rend. A középső folt a nem elhajló, áthaladó nulladrend, a két első rend közül az egyik vetített kép (itt ez látható éles képként), a másiknak pedig virtuális kép felel meg. (Mivel a rekonstruált hullám egy síkban van ábrázolva, ez a sík egy ernyőnek tekintendő, ezért lesz az ilyenkor látható éles kép valós.) Ha a rekonstrukciót az ellentétes irányban számoljuk ki $-D$ távolságban, akkor az éles kép helyén szórt folt, az eredetileg szórt folt helyén pedig éles kép jelenik meg, azaz a két első elhajlási vagy hologramrend egymás *konjugáltja*, hasonlóan az analóg holográfiához.

Mivel egy digitális hologramból a teljes komplex hullám kinyerhető, valamint a különböző *elhajlási rendek térben szétválnak* (azaz a rekonstruált kép különböző helyein jelennek meg), a tárgy éles képének területén a többi rend járuléka gyakorlatilag nulla: ezen a területen tisztán a tárgy hullám jelenik meg, amplitúdója és fázisa egyaránt ismert. Elvi akadályja tehát nincs, hogy interferometrikus elvű holografikus méréseket digitális változatban is megvalósítsunk. Ha rögzítünk egy digitális hologramot a tárgy alapállapotában, terheljük, majd rögzítünk egy másik hologramot ebben az állapotában is, a továbbiakban csak számítógépes feldolgozásra van szükség.

Az analóg holográfiában kétexpozíciós hologramnál a két állapothoz tartozó két hullám összege, azaz interferenciájuk jelenítené meg az elmozdulásmező kontúrvonalait, így most ezt kell szimulálni. Számoljuk ki a két digitális hologram numerikus rekonstrukcióját a megfelelő távolságban, mindkét hologramnál ugyanott, majd adjuk össze őket. Mivel a két tárgy hullámterét komplex mátrixok reprezentálják a számolásban, az összeadás is természetesen komplex, és mivel az összeadás pontművelet, nem keveri össze a már szétvált elhajlási rendeket. Az így kapott eredő komplex amplitúdóból képezzük pl. az intenzitást, amelyen interferenciacsíkok jelennek meg, vagy tekinthetjük közvetlenül a fázist is, hisz az egyaránt rendelkezésre áll. Ha összeadás helyett a két hullámot kivonjuk egymásból (összeadás ellenfázisban), akkor a fényes nulladrendű folt középen eltűnik. A csíkos interferenciaképet tulajdonképpen a hely szerint változó fáziseltérés (lásd 5-ös összefüggés) okozza a két hullám között, és a digitális holográfia lehetőségeinek köszönhetően ez meg is jeleníthető.

5. Mérési feladatok

5.1. Látványhologram készítése

A mérési gyakorlat első részében egy kb. 6 cm x 9 cm-es hologramlemezre egy hasonló méretű erősen reflektáló, lehetőleg csillogó tárgyról készítünk fehérfényű látványhologramot. Készítsen vázlatrajzot ennek tényleges elrendezéséről! Miért kell a tárgyat a lemez közelébe helyezni? Hol várható a virtuális kép megjelenése, és hogyan kell majd a lemezt megvilágítani? Becsülje meg a gömbi referencia nyaláb nyílásszögét távolságmérések alapján, valamint intenzitását a lemeznél!

A fényforrás egy Lexel 95L-K-2 típusú 1 W névleges teljesítményű vízhűtéses kripton-ion gázlézer, melynek 647,1 nm hullámhosszúságú nagy koherenciahosszú (több méter) vörös fényét használjuk. A lézer háromfázisú 110 V-os táplálással rendelkezik, és a mérés során 400 mW fényt teljesítményt alkalmazunk. A lézerfény először egy elektronikus vezérlésű, időzítő (0,1 s - 10 s között) mechanikus fényzáron halad át (shutter), majd nyalábtágítás után éri el a hologramlemezt és a tárgyat. A lemezt speciális tartóba lehet helyezni. A shutter és a tartó kezelésével még az exponálás előtt világosban ismerkedünk meg. A hologramlemezek fényzáro dobozban találhatóak, és többféle típus előfordulhat a félév során, azonban mind ezüst-halogenid emulziót tartalmaz fényérzékenyítő adalékokkal. Az alábbi táblázat a lemezek néhány jellemző paraméterét mutatja. A lemezek öregedése folytán némelyik paraméter idővel változhat, romolhat, különösképp az érzékenység.

Lemez típus	Hullámhossz nm	Érzékenység (630 nm) $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ (öregedve)	Felbontás lp/mm	Rétegvastagság μm
AGFA 8e75	< 750	10 (20 000?)	5000	7
AGFA 10e75	< 750	1 (2000?)	< 2800	7
AGFA 8e75 HD	< 750	10-20 (20 000?)	5000	7
AGFA 10e75 HD	< 750	1-2	< 2800	7
ORWO LP-2	< 630	200 (200 000)	2500	12
PF3-03M	600-660	1500-3500 (ill. 20 000)	> 5000	7

Hogyan viszonyul a tényleges exponálás ideje a konkrétan használt lemez adataiból és a nyaláb erősségéből számolható értékhez?

Az exponálást követően a lemezt kidolgozzuk. Ennek során rövid időt tölt el a lemez a következő folyadékokban:

- kétkomponensű hívó (A és B jelű üveg)
- átfolyatott csapvíz mosáshoz
- halványító (bleach) folyadék (C jelű üveg)
- átfolyatott csapvíz
- rögzítő folyadék (D jelű üveg)
- átfolyatott csapvíz.

Mivel a hívó a keverést követően bomlani kezd (kb. 20 percig használható), ezt közvetlenül az exponálás előtt vagy után állítjuk elő, a többi folyadékot menet közben töltjük a tálakba. A rögzítést követően a lemez már nem fényérzékeny. Az utolsó mosást követően szárítóba tesszük kb. 65 °C-on 20 percre. A hologram ezután tekinthető meg jó minőségben.

Milyen elrendezésben tekinthető meg a kész hologram? Milyen színben látható a tárgy virtuális képe? Mi látható, ha a lemezt az oldalán átfordítva nézzük? Mit látott a két ponton befogott tartó hologramjának szemlélésekor? Mi a halványítás szerepe?

5.2. Transzmissziós off-axis hologram készítése

Ebben a feladatban az 1. ábrán látott elrendezésben készítünk hologramot vékony lemezre. Mivel itt a referencia nyaláb ténylegesen külön ágban van, így külön állítható, többféle tárgyat lehet használni, mint az előző feladatban, és a lemeztől távolabb is el lehet helyezni őket. Ez nagyban segíti a perspektíva hatását jobban mutató hologram készítését. A két feladatban exponált lemezeket egyszerre dolgozzuk ki azonos vegyszerekkel. Legfeljebb mekkora szöveget zárhat be a referencia és a tárgnyyaláb a használt lemeztípusnál? Várható-e a kész hologram szelektivitása? Megnézhető-e a kész hologram fehér fényben?

Megjegyzés: Az előbbi feladatokhoz saját tárgyakat is lehet hozni, de rendelkezünk jól bevált tárgykészlettel. Az 5.1. feladathoz alkalmas tárgyak: érmék, kulcsok, fém dísz tárgyak (méretkorláttal), és arany vagy ezüst festékek csillogóra festett egyéb tárgyak, macskaszem prizma. Korlátozottan alkalmasak fehér sima felületű tárgyak, kis plüssfigurák (rövid szőrrel), fehér LEGO elemek, üvegtárgyak. Az 5.2. feladatban alkalmasak még akár fából készült tárgyak is, illetve optikai lencsék (van készleten), kristályok, üvegtárgyak, mozdulatlan ujj, köröm.

5.3. Elmozdulásmező vizsgálata digitális holográfiával

A mérési gyakorlat második részében megmérjük egy membrán közepén a síkra merőleges elmozdulás legnagyobb értékét. A méréshez a 2. ábrán látható elrendezést használjuk. A fényforrás egy 35 mW teljesítményű 632,8 nm-es vörös fényű léghütéses He-Ne gázlaser. A képeket egy Baumer Optronics MX13 típusú 1280x1024 képpont felbontású monokróm CCD kamerával rögzítjük, melynek képpontmérete 6,7 μm x 6,7 μm , és saját kezelőprogrammal rendelkezik. Ebben

a kamera élőképe is megtekinthető, valamint állíthatók az exponálás (záridő, erősítés) paramétereit. A rögzített 8 bites színmélységű kép hisztogramja (különböző szürkeségi szintű pixelek számának eloszlása) egy másik programmal tekinthető meg. Ennek ellenőrzésével állapítható meg pontosan, hogy a kép esetleg alul- vagy túlexponált. (Ez a funkció számos digitális fényképezőgépben is megtalálható már.) Az elrendezésben található BS_1 nyalábosztó forgatható, ezáltal az intenzitás osztásaránya változtatható a tárgy- és a referenciaág között. A digitális hologramokat egy HoloVision 2.2 nevű szabadon letölthető és felhasználható programmal rekonstruáljuk (lásd a linket a szöveg végén).

A tényleges mérés előtt ellenőrizzük az elrendezést és annak beállításait. Mérje meg a kamera és a tárgy távolságát. Az elrendezésben a megfigyelés merőleges a membrán felületére, a megvilágítás azonban nem. Mérje meg ennek szögét távolságokból, és az adatok alapján az 5. összefüggés alkalmazásával határozza meg azt a síkra merőleges elmozdulásértéket, amelynél az okozott fázisváltozás 2π . (Ehhez vegyen fel egy derékszögű koordinátarendszert a membránhoz igazodva.) Ez lesz a mérés ún. kontúrtávolsága, azaz lényegében alapvető nagyságrendje.

Ellenőrizze a rögzíthető képek exponáltságát kitarart referencia és tárgynyaláb esetén, valamint kitararás nélkül. Szükség esetén állítson az expozíció paraméterein és a forgatható nyalábosztón. Mi látható a kamera élőképén, ha a BS_2 osztótükröt finoman rezgetjük? Hogyan néz ki a kép szürkeség-eloszlása (hisztogramja) megfelelő beállítások esetén?

Ha az exponálás már megfelelő, vegyen fel egy képet, és rekonstruálja azt (*Image/Reconstruct* menüparancs). A digitális hologram hisztogramját és az expozíció paramétereit vegye bele a jegyzőkönyvbe. Értékelje a rekonstrukció intenzitásképeinek élességét a rögzítőkeret membránra vetett árnyéka alapján. Vizsgálja meg az élesség változását 5-10 centivel kisebb illetve nagyobb rekonstrukciós távolságok esetén. Hol a legélesebb a kép? Mekkora a képpontméret ebben a távolságban? Mennyire egyezik a képről leolvasható tárgyméret a valósággal?

Vegyen fel egy hologramot a membránról, majd deformálja azt 5 μm -nél kisebb mértékben. Vegyen fel még egy képet. Adja össze a két hologramot (*Image/Calculations* menüparancs), majd rekonstruálja az összeget. Mi látható az intenzitásképen? Mi látható a fázisképen? Az eredményt mellékelje a jegyzőkönyvbe is. Most az összeg helyett rekonstruálja a különbséget. Miben tér el az intenzitásképe az előzőtől? A csíkrendszer kvalitatíve mit árul el az elmozdulásmezőről? Értelmezze a látottakat. Számlálja le a csíkokat a membrán szélétől a közepéig $\frac{1}{4}$ csík pontossággal, majd a mérés kontúrtávolságával szorozva állapítsa meg a legnagyobb elmozdulást (megnyomást). Vesse össze a mikrométerről „névlegesen” leolvasható értékkel.

A jegyzőkönyvben térjen ki a mérés menetében megfogalmazott kérdésekre is!

6. Biztonsági tudnivalók

Mindkét mérési feladatban nagy teljesítményű lézerekkel dolgozunk, ezért fokozott óvatosság szükséges a laborban tartózkodás idején. A lézereket csak a mérésvezető kezelheti. A csillogó ékszereket vagy karórákat vegyük le, az optikai asztalok magasságába ne hajoljunk le. A nem kitaragított és szórt lézerefénnyel megvilágított pontokat lehetőleg ne nézzük hosszabb ideig. A hologramlemez kémiai kidolgozásánál használt vegyszerek nem maróak, de irritatívak, ezért gumikesztyű és fehér köpeny használata biztosított és javasolt az ezt végző hallgató részére.

Linkek:

<http://www.edge.no/projects/index.php?expn=2&target=hologivision/about.php>

<http://www.eskimo.com/~billb/amateur/holo1.html> Házilag karcolt egyszerű hologramok

http://www.szertar.com/webizodok/2d_hologram_hazilag/