

# Tézisfüzet

Gombkötő Balázs

## Összehasonlító elmozdulásmérés új lehetőségei a koherens optikai mérés technikában

Témavezető: Dr. Füzessy Zoltán  
professor emeritus

Konzulens: Kornis János  
egyetemi tanársegéd

BME

FizikaTanszék

2003

## Bevezetés

Koherens optikai módszereket elterjedten alkalmaznak diffúz felületű tárgyak alakjának vagy alakváltozásának, elmozdulásának mérésére. A hologramlemezeket használó hagyományos módszerek mellett megjelentek az elektronikus vagy digitális képrögzítésen alapuló eljárások is, melyek TV kamerát, CCD kamerát, vagy újabban CMOS kamerát alkalmaznak. A képi adatok számítógépes feldolgozása ma már rendkívül gyors és rugalmas, a fejlett adattárolóknak köszönhetően pedig rengeteg képi információ tárolható kis helyen, így a digitális módszerek már ma is sok területen felváltották a hagyományos hologramlemez használókat. Mind a szemcsekép interferometriának, mind a holográfiának létezik digitális megvalósítása, ezek az elektronikus/digitális szemcsekép interferometria (szokásos angol betűszóval ESPI vagy DSPI), vagy más néven TV-holográfia, illetve a számítógépes vagy digitális holográfia.

A TV-holográfia igen elterjedt mérési módszer, segítségével alak, elmozdulás, valamint rezgési móduskép is mérhető interferometrikus érzékenységgel. A mérésben rögzített szemcseképek eltérésének egyszerű kiszámításával azok fázis szerinti korrelációja határozható meg, ezért ezeket a módszereket szemcsekorrelációs mérés technikáknak is hívják. Az eredményül kapott, korrelációs csíkrendszert ábrázoló képek a mért mennyiséget (alak vagy mélységi profil, elmozdulásmező egyik komponense, stb.) szintvonal szerűen mutatják a vizsgált tárgyfelületen, hasonlóan a domborzati térképekhez, ezért ezeket a csíkokat szintvonalaknak, kontúr csíkoknak is nevezik.

A digitális holográfia szinte egyidős a lézerekkel és a hagyományos holográfiával, első megjelenése a hatvanas évek végére tehető. Fejlődését sokáig hátráltatta a számítástechnika és a digitális képrögzítési illetve képmegjelenítési technológiák kezdetlegessége vagy hiánya. A személyi számítógépek megjelenése, rohamos fejlődése, valamint nagy felbontású digitális kamerák kifejlesztése nagy lendületet adott a terület fejlődésének az elmúlt évtizedben, egy új eszközcsalád, a térbeli fénymodulátorok megjelenése pedig új távlatokat nyitott. Ma már a digitális holográfia teljesítőképessége elérte azt a szintet, hogy mérés technikai alkalmazásai is léteznek. Alakot és elmozdulásmezőt szintén interferometrikus érzékenységgel mérhetünk digitális holográfia alkalmazásával, amelyben a mérés elsődleges eredménye interferencia kontúrvonalakat ábrázoló kép.

Rejtett anyaghibák felderítésére igen alkalmasnak bizonyultak az interferometrikus mérési módszerek, hiszen nagy érzékenységüknek köszönhetően képesek megmutatni a hiba okozta eltérő viselkedést mechanikai vagy más behatás esetén. A hibamentes és a hibás tárgy eltérő mechanikai választ (alakváltozást, deformációt, elmozdulást) mutat ugyanolyan terhelés hatására, ám ez az eltérés sokszor annyira kicsi, hogy a nagy érzékenység ellenére kimutatásához jelentős terhelésre van szükség. A jelentős terhelés viszont akár a hibamentes, akár a hibás tárgyon már önmagában is nagy deformációt okoz, kontúrvonalakat eredményező mérési módszerek esetén ez viszont túl sűrű, felbonthatatlan, feldolgozhatatlan csíkrendszert eredményez. Digitális módszereknél a képek erősen korlátozott mérete (pl. 1000\*1000 képpont) különösen behatárolja a csíkok megengedett legnagyobb sűrűségét.

Ennek kiküszöbölésére fejlesztették ki az összehasonlító mérési módszereket. Ezek szokásos terminológiája szerint két hasonló tárgyat, egy hibamentesnek tekintett mestertárgyat és egy ténylegesen vizsgálandó tesztárgyat azonos körülmények között azonos terhelésnek tesznek ki, és az ennek hatására létrejövő deformációk eltérését mérik közvetlenül valamilyen módon. Ez az eltérés gyakorlatilag már az esetlegesen meglévő anyaghiba jellemzője, nem annyira a terhelésé, másrésztől mértékét tekintve kisebb, mint a két eredeti deformáció, így az azt jellemző kontúrvonalrendszer sűrűsége már nem nagy.

A szemcsekép interferometria illetve a holográfia területén számos összehasonlító mérési módszer létezik. Ezek az összehasonlító holografikus Moiré interferometria, az összehasonlító szemcsekép interferometria, és a tanszéken kifejlesztett különbségi holografikus interferometria. Néhány módszer ezek közül a két tárgy együttes jelenlétét igényli a mérési elrendezésben, míg mások hologramlemezre rögzítik a mestertárgy és/vagy tesztárgy állapotait, és a megfelelő tárgyállapotok már csak holografikusan vannak jelen a mérésnél. Utóbbi módszerek előnye, hogy a mestertárgyat elég egyszer kitenni a terhelésnek, így az egyszer rögzített terhelés előtti és utáni állapot tetszőlegesen sokszor felhasználható összehasonlító mérésben állandó etalonként, és nem kell tartani a mestertárgy anyagának kifáradásától. A tanszéken kifejlesztett csíkkompensációs holografikus interferometria és csíkkompensációs TV-holográfia valós tárgy elmozdulásának és egy szimulált elmozdulásnak a különbségét méri. Összehasonlító digitális holografikus interferometriás alakmérés végezhető térbeli fénymodulátor alkalmazásával. Ez utóbbi módszer lehetőséget teremt a távmérésre, melynél a mestertárgy és a tesztárgy nem csak eltérő időben, de eltérő helyen is jelen lehet a maga mérési elrendezésében. Az egyik helyen digitális hologramokban rögzítenek információt a mestertárgyról, illetve állapotairól, a másik helyen pedig az oda valamilyen adatátviteli csatornán (pl. internet) eljuttatott digitális hologramot összehasonlító mérésre használják fel a tesztárgy vizsgálatakor.

## **Célkitűzések**

Munkám egyik célja a csíkkompensációs TV-holográfiás elmozdulásmérési elv további vizsgálata, alkalmazása összehasonlító mérésekre, valamint az önkompensáció automatizálhatóságának kérdésköre volt. Céлом volt a módszer használhatósági határainak megállapítása.

Munkám másik célja összehasonlító elmozdulásmérési módszerek kifejlesztése volt a digitális holográfia területén. Arra törekedtem, hogy olyan módszereket találjak, amelyek egyszerű vagy változatlan mérési elrendezést igényelnek, más típusú (pl. alak) méréseknél is alkalmazhatóak, valamint az összehasonlítás vagy esetleg csíkkompensáció utólag is elvégezhető legyen, lehetőséget teremtve például távmérésre. További céлом volt az összehasonlító digitális holografikus interferometria alkalmazása, továbbfejlesztése és vizsgálata elmozdulásmérés céljaira, valamint az ott alkalmazott holografikus megvilágítás alkalmazása a TV-holográfiában összehasonlító elmozdulásmérés céljára.

## **A kutatás során alkalmazott eszközök**

A kísérleteket a BME Fizika Tanszékén az Optikai Méréstechnika Csoport laboratóriumában végeztem. A felhasznált fontosabb eszközök: 35 mW-os folytonos üzemű He-Ne lézer, 1280x1024 képpont felbontású CCD kamera 6,7 mikrométeres képpontmérettel, 800x600 képpontos folyadékkristályos térbeli fénymodulátor 32 mikrométeres képpontmérettel,  $f=55$  mm-es fókusztávolságú  $f/2.8$  fényerejű Micro Nikkor objektív, piezoelektromos fázistoló, mechanikus fázistoló. A felhasznált számítógépes programok: Corel Photo-Paint 9.xx+, a tanszéken Kornis János által kifejlesztett csíkkompensációt és fázisképet számoló programok, HoloVision 2.2, valamint egy saját fejlesztésű digitális holográfia program (MATLAB nyelven).

## Új tudományos eredmények

### 1. Összehasonlító és önkompensációs elmozdulásmérés a TV-holográfia alkalmazásával

A TV-holográfiában korábban bevezetett csíkkompensációs módszert alkalmaztam sikerrel olyan esetekben, amikor a kivonandó elmozdulásmező nem szimulált, hanem valós mérésekből származik<sup>1</sup>. Az általam vizsgált két esetben vizsgáltam a kivonandó elmozdulásmezőt reprezentáló fáziskép előállításának ideális módját, amely a csíkkompensációs eljárás egyik bemenete. Kimutattam, hogy a két tárgyat alkalmazó összehasonlító mérés esetén az elmozduláshoz tartozó intenzitás kontúrvonalak kismértékű Gauss-profilú frekvencia-átviteli függvényvel leírható aluláteresztő szűrése a célszerű, és hogy ha az elmozdulásmező szabadon skálázható, akkor célszerű egy kisebb mértékű elmozdulásból kiszámolt folytonos kiegyenesített fáziskép utólagos átskálázása. A csak egy tárgyat vizsgáló ún. önkompensáció során ezzel ellentétben az a célszerű, ha a kivonandó elmozdulásmezőt megtartjuk eredeti skáláján - különben parazita csíkozódás lép fel, amely zavarokat okoz a kiértékelésben -, a szemcsezajt nem szűrjük, valamint a fázisképet nem egyenesítjük ki. A  $[0, 2\pi]$  tartományban meghagyott töredezett fázisképek alkalmazhatósága a csíkkompensációs technikában érdekes és nem várt eredmény, különösen abban az esetben, amikor szemléletesen jól értelmezhető lépcsőzetes ugrások sem figyelhetők meg azokon. Ez utóbbi speciális eset további vizsgálatra érdemes, mivel elvezethet a csíkkompensációs módszer működésének mélyebb megértéséhez. A fent említett feltételek adták a legjobb láthatóságot, így a legjobban feldolgozható különbségi intenzitáscsíkokat mindkét esetben.

Merevtest-forgásokhoz tartozó egyszerű szerkezetű párhuzamos kontúrvonalak vizsgálatával megállapítottam továbbá, hogy a forgások különbségéhez tartozó csíkok láthatóságát a két kissé eltérő mértékű forgás közül alapvetően a nagyobbik szöge határozza meg. A láthatóság változását a növekvő forgási szöggel mindkét esetben mérési sorozattal is vizsgáltam. Helyfüggő elmozdulásmező esetén a különbségi csíkok láthatósága is változik, becslésére a merevtest-forgásoknál megállapított értékek alkalmasak, mivel az ilyen típusú elmozdulásmező kis felületdarabok lokális elfordulásaként is reprezentálható. Végezetül megállapítottam, hogy az önkompensációs mérés nem automatizálható, mivel nem létezik olyan matematikai módszer, amely zajos fáziskontúr-képeket megfelelő profilhűséggel tördelne ki.

### 2. Optimalizálási lehetőségek a digitális holografikus interferometriában

Digitális hologramok numerikus rekonstrukciójával kapcsolatban egyszerű módszert adtam a szürkeskálára normálás javítására a teljes rekonstruált kép megfelelő részének kiválasztásával. Bevezettem a mesterséges fázistolás<sup>2</sup> alkalmazását az interferometrikus kontúrvonalak kiértékelésére, és a módszert összehasonlítottam a direkt fáziseltérésen alapuló számolással. A bevezetett eljárás mellett a digitális képfeldolgozó algoritmusok szélesebb köre alkalmazható, így a zavaró szemcsék szűrése is hatékonyabban végezhető el. Vizsgáltam a rekonstruált képek nagyíthatóságának lehetőségeit<sup>3</sup>, és kimutattam, hogy elegendő számítási kapacitás esetén alkalmazható a digitális hologram méretének növelése, amely javít a képsíkbeli felbontáson. Az előbb felsorolt egymástól független módszerek együttesen is alkalmazhatók, és jelentősen javítják a digitális holografikus interferometria (és nem csak az elmozdulásmérés) alkalmazhatóságát mind egyszerű mind összehasonlító mérések esetén.

### **3. Összehasonlító elmozdulásmérés a digitális holográfiában numerikus számolással<sup>2</sup>**

Új, tisztán numerikus módszert vezettem be összehasonlító interferometrikus mérésre, mellyel két azonos mérési helyen lévő tárgy elmozdulásának összege és különbsége közvetlenül mérhető, de az eljárás elvileg alakmérésnél is felhasználható. Az eljárás nem igényel újfajta mérési elrendezést, az összehasonlítás a digitális hologramok rögzítése után a számítógépen végezhető el. Az összehasonlító intenzitás-kontúrvonalak a várakozásoknak megfelelően kisebb láthatóságúak, mint az egyszerű kontúrvonalak. Előbbiek láthatóságát merevtest-forgási csíkokon vizsgáltam, és mérési sorozat segítségével megmutattam, hogy a láthatóság a forgási szög növekedésével csökken, és ennek szemcse-korrelációs oka van. Tárgyaltam a módszer távmérésre való alkalmazhatóságának feltételeit is.

### **4. Csíkkompenzációs elmozdulás- és alakmérés a digitális holográfiában szimulált hullámok alkalmazásával<sup>3</sup>**

Új, szimulált hullámokat alkalmazó módszert adtam, mellyel valós tárgy elmozdulásmezőjének és egy szimulált elmozdulásmezőnek az összege és különbsége közvetlenül mérhető. A módszer nem igényel újfajta mérési elrendezést, matematikai háttére rokon a 3. pontban bemutatott eljárásával, és gyakorlati szempontból a TV-holográfiánál alkalmazott csíkkompenzáció megfelelője a digitális holográfiában. Ennél a módszernél az előzővel ellentétben az összehasonlító csíkok láthatósága azonos az egyszerűekével. Sikerral alkalmaztam a módszert egy ismert egyhullámhosszas alakmérési eljárásnál is. Az előző módszerhez hasonlóan ez is alkalmazható a gyakoribb kéthullámhosszas alakmérésnél vagy más interferometrikus méréseknél, azokat segítheti. A módszer sikeres alkalmazásának fontos feltétele a szimulált hullámter pontos illesztése a valós mérésből származóakra, valamint a kompenzálendő elmozdulásmező ill. alak megfelelő elvi ismerete vagy közelítése.

### **5. Az optikai rekonstrukció fejlesztése, és összehasonlító elmozdulásmérés különbségi digitális holográfiával és TV-holográfiával optikailag rekonstruált digitális hologramok alkalmazásával<sup>4</sup>**

Digitális hologramok optikai rekonstrukciójára javított optikai elrendezést készítettem. A távcsőszerű rendszerrel, amellyel kisebb távolságon rekonstruálhatóak nagyobb méretű vetített képek, könnyebben állítható be a kép helye is. Mérésben rögzített digitális hologramok átalakítása révén jobb hatásfokú rekonstrukciót értem el, és a hologramrendek is jobban szétváltak térben. Vizsgáltam tárgyak digitális holografikus kivilágításának tulajdonságait, és megállapítottam, hogy ennek komoly hátránya a létrejövő objektív szemcsék miatti egyenetlen megvilágítás, melyen hosszabb távon csak az eszközök fejlődése segíthet. Az új rekonstrukciós elrendezést sikerral alkalmaztam különbségi digitális holográfia és TV-holográfia esetén összehasonlító elmozdulásmérésre, de a komoly technikai korlátok miatt a módszerek részletes vizsgálata még korainak bizonyult. Ezek a kétlépéses módszerek lehetővé teszik a teljes távmérést, azaz a két vizsgált tárgy más-más helyen és időben lehet jelen a maga mérési elrendezésében. A mérések első lépése az egyik tárgy digitális hologramjainak rögzítése, a második lépés ezek felhasználása a holografikus megvilágítást megvalósító valamely elrendezésben, ahol a másik tárgy van jelen.

A nehézségek ellenére megállapítható volt, hogy a TV-holográfia esetében az interferométer nyalábjainak ideális intenzitásaránya meglepően nem 1:1, hanem kb. 1:5 (tárgy:referencia), ennek magyarázata pedig a holografikus megvilágítás durván szemcsés jellegéből adódik. Fontos eltérést találtam a különbségi digitális holográfiához képest abban

is, hogy teljes összehasonlító mérésnél a négy kiszámolható intenzitás-kontúrvonalképből csak az egyik kép láthatósága jobb a többinél (amelyik a tesztárgy elmozdulásmezőjét mutatja), amely megerősíti az ideális intenzitásarányra adott magyarázatot is.

### **Az értekezéshez kapcsolódó publikációk**

1. B. Gombkötő, J. Kornis, Z. Füzessy, Sz. Beleznai, "Displacement measurement using fringe compensation TV-holography: limitations and properties", *Optical Engineering* 43(03) (2004), 684-688
2. B. Gombkötő, J. Kornis, Z. Füzessy, "Difference displacement measurement using digital holography", *Opt. Comm.* 214 (2002), 115-121
3. B. Gombkötő, J. Kornis, Z. Füzessy, M. Kiss, P. Kovács, "Difference displacement measurement by digital holography using simulated wavefronts", *Appl. Opt.* 43 (2004) 1621-1624
4. B. Gombkötő, J. Kornis, Z. Füzessy, T. Rózsa, "Difference displacement measurement using digital holograms as coherent masks", *Proc. of SPIE Vol. 5144* (2003) 578-584
5. Gombkötő Balázs, Kornis János, Füzessy Zoltán, "Különbségi elmozdulásmérés digitális holografikus interferometriával", *Kvantumelektronika 2003 szimpózium, Budapest, 2003. okt. 21.*, BME

### **Az értekezéshez kapcsolódó egyéb írásos anyagok**

Zs. Papp, J. Kornis, B. Gombkötő, "New methods in recording and reconstruction of digital holograms", *Proc. of SPIE Vol. 5144* (2003) 170-174

A digitális holográfiával kapcsolatos kutatások egy nemzetközi együttműködés keretében is folytak, ezért félévenként kutatási jelentések is készültek a külföldi partnerek részére. A kutatási megállapodás címe: „Possibilities and limitations for the comparative control of the change of shape and shape itself using modern coherent-optical measurement techniques”, röviden “Distant Shape Control” vagy DISCO.

Z. Füzessy, J. Kornis, B. Gombkötő, “Implementing digital holography”, Report II., 2002.01.01-2002.06.30

ua. szerzők, “Implementing digital holography for deformation measurement”, Report III., 2002.07.01-2002.12.01

ua. szerzők, “Experimental demonstration of the quality reduction of the results as function of laser power at comparative measurement applying digital holography”, Report IV., 2003.01.01-2003.06.30

Z. Füzessy, J. Kornis, T. Rózsa, B. Gombkötő, “Investigation of the upper measuring limit of digital holographic methods”, Report V., 2003.06.01-2003.11.30