



# **SÚRÚ CSÍKRENDSZEREK KEZELÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI A HOLOGRAFIKUS INTERFEROMETRIÁBAN**

**PhD tézisfüzet**

**BORBÉLY VENCZEL**

Témavezető: **Dr. GYÍMESI FERENC**

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
FIZIKAI INTÉZET, FIZIKA TANSZÉK**

**Budapest**

**2011**

## A kutatások előzménye

A holografikus interferometriai (HI-i) mérések során kapott interferogramok kiértékelésénél követelmény, hogy a teljes csíkrendszert egyben és mindenütt felbonthatóan kell rögzíteni, illetve látni. Napjainkban az interferogramokat általában elektronikusan, CCD-, vagy CMOS-kamerák segítségével olvassuk be a számítógépbe és annak segítségével értékeljük ki. A kamera korlátozott méretű és felbontású érzékelőjére kell tehát a teljes képet leképezni megfelelő optika segítségével (vagy anélkül). A képfeldolgozó számítógépes programnak képesnek kell lennie a csíkok azonosítására a kiértékeléshez. A CCD-érzékelő, illetve az adatfeldolgozó szoftver szempontjából tehát értelmezhető az a legnagyobb csíksűrűség, illetve csíkdarabszám, amelyet a kiértékelő rendszer még fel tud bontani. A továbbiakban ezt a csíksűrűséget a HI gyakorlati felső méréshatárának nevezzük, és ezt a fentiekkel összhangban a CCD-érzékelő mérete, felbontása, valamint a kiértékelő program teljesítőképessége határozza meg.

Így a HI – nagy érzékenységének köszönhetően – csak viszonylag kicsi, a gyakorlati alkalmazási igényekhez viszonyítva különösen nem túl nagy mérési tartomány vizsgálatát teszi lehetővé. Ráadásul egy egyébként még kezelhető csíkrendszer egyes helyeken túlzottan besűrűsödhet egy gyorsabban változó deformációt okozó hibahely, vagy jelentős felületi gradienssel rendelkező tárgyrészlet miatt. Mindehhez jöhetnek még a terheléskor fellépő nem kívánt járulékos elmozdulások, amelyek által létrehozott csíkrendszerek tovább sűrűsíthetők a lényegi csíkrendszert. Tehát a sűrű csíkrendszerek kezelése, valamilyen formában feldolgozhatóvá ritkítása egyet jelent a HI mérés technika gyakorlati felső méréshatárának a kitolásával. Ezért ez általános és folyamatos törekvés a holografikus interferometriai alkalmazások kezdete óta.

Ennek érdekében ez idáig két különböző megközelítés alakult ki. Az egyik lehetőség eleve megakadályozza a sűrű csíkrendszerek létrejöttét azáltal, hogy a tárgy változásait kis lépésekben rögzítik növekvő terheléssel interferogram-sorozaton. Ez nem mindig megoldható az aktuális terhelés-típusnál és a gyakorlatban nehézkesen valósítható meg. A másik megközelítés viszont megengedi a felbonthatatlanul sűrű csíkrendszerek kialakulását, és ezen csíkrendszerek olyan módosítását tűzi ki célul, hogy valamilyen ritkítás, részleteltávolítás után végül már kezelhető sűrűségű csíkrendszer maradjon vissza, amely még természetesen a lényegi információt is őrzi. Ezek a módosítási eljárások az ún. csíkkompenzálási eljárások.

A korábban kifejlesztett csíkkompenzálási eljárások azonban többnyire csak nagyon egyszerű (egyenes vagy koncentrikus csíkokból álló, egyenközű) csíkrendszereket tudnak kivonni a teljes csíkrendszerből. A Fizika Tanszék Holográfia Csoportjában a sűrű csíkrendszerek kezelésére kifejlesztettek két új, a csíkrendszer szerkezetétől függetlenül, általánosan is használható csíkkompenzálási eljárást.

Az egyik eljárás az ún. különbségi holografikus interferometria (KHI), amelyben a két tárgy közvetlen interferometriai összehasonlítása révén valósul meg csíkkompenzáció. A KHI-ban a mestertárgy holografikusan rögzített hullámfrontjait

használják a teszttárgy megvilágításra (holografikus megvilágítás). A mestertárgy két állapotához tartozó hullámfrontok fáziskülönbségét vonják ki a teszttárgy fáziskülönbségeiből. Az eredmény a két tárgy különbségének közvetlen megjelenítése akkor is, ha önmagukban láthatatlanul sűrű is a csíkrendszerük.

A másik eljárás az ún. interferogram-kirakó módszer, ahol a sűrű csíkrendszert részenként, letapogatással rögzítik, és a számítógép memóriájában a rész-interferogramok összerakásával állítják elő a nagyméretű, egész interferogramot. Ehhez nem szükséges a pontos letapogatás-vezérlés sem, mert az átfedéssel beolvasott rész-interferogramok korrelációs illesztése ezt teljes mértékben szükségtelenné teszi.

Az interferogram-kirakó eljárást sikeresen alkalmazták a digitális holográfia területén is, ahol szintén alapkérdés a tárgy- és a referenciahullám átlapolásakor keletkezett nagy térfrekvenciájú hologram interferencia-csíkok kezelése.

## **Célkitűzések**

Tevékenységem során a Fizika Tanszék Holográfia Csoportjának fenti három kutatási irányába kapcsolódtam be. Ezekben belül az alábbi öt célt tűztem ki továbbfejlesztésükhöz, amelyeket aztán sikeresen el is értem:

1. interferogram-kirakó eljárás kiterjesztése nagyméretű tárgyak esetére;
2. kompenzációbarát két-hullámhosszas alakmérési eljárás kifejlesztése a KHI két-hullámhosszas alakmérésének megvalósíthatóságához;
3. beállító-felület optimalizálása a kompenzációbarát két-hullámhosszas alakmérési eljárásnál;
4. holografikus megvilágítás intenzitásának maximalizálása a KHI két-hullámhosszas alakmérésénél;
5. nagyobb detektormátrix-felület alkalmazhatóságának megteremtése a nagy nagyítású pásztázásos digitális holográfiai beolvasásban.

## **Vizsgálati módszerek**

PhD munkám méréseit a BME Fizika Tanszék Holográfia Csoportjának laboratóriumában végeztem, ahol ehhez megfelelő eszközök álltak a rendelkezésemre: sötétszoba, rezgésmentes asztal, nagy teljesítményű és nagy koherenciahosszú argon-ion lézer, optikai minőségű tükrök, osztók, nyalábtágítók, mikroszkóp objektívek, kis és nagy átmérőjű fotó-objektívek, CCD-kamerák. Ezekből az elemekből állítottam össze a célkitűzéseimnek megfelelő mérési elrendezéseket. A számítógépes munkálatokat a rendelkezésre álló, illetve részben munkám alatt kifejlesztett két programmal végeztem (ImPro2, DigHoloPro).

Méréseimben, természetesen, folyamatosan felhasználtam a Fizika Tanszék Holográfia Csoportjának addigi és párhuzamosan kifejlesztett mérési módszereit.

## Új tudományos eredmények.

### *1. Interferogram-kirakó eljárás kiterjesztése nagyméretű tárgyak esetére*

A csíkrendszerek beolvasásához használt interferogram-kirakó eljárásnak kifejlesztettem egy új változatát, amely lehetővé tette az eljárás alkalmazását nagyméretű tárgyak vizsgálatánál is. A rész-interferogramok rögzítésénél fontos kiértékelési követelmény hogy a megfigyelési irány ne változzon számottevően. Kisméretű tárgyak esetén ez még jó közelítéssel biztosítható. Nagy tárgyak esetében viszont ez csak az általam javasolt, kamerával együtt mozgó Fourier-szűrési optikával, és a tárggyal azonos méretű nagy holografikus lemez használatával együttesen érhető el<sup>1,2</sup>. Ezt sikeresen alkalmaztam olyan gyakorlati esetben is, ahol nagyméretű tárgynál a rejtett anyaghibát csak kifejezetten nagy deformációt, azaz kifejezetten sűrű csíkrendszert okozó terheléssel lehetett kimutatni<sup>2</sup>.

### *2.a. Kompenzációbarát két-hullámhosszas alakmérési eljárás kifejlesztése a különbségi holografikus interferometria részére*

A KHI két-hullámhosszas alakmérési változata olyan módszert igényelt, ahol utólag is külön állíthatók a rekonstruált képek jellemzői (képhelyzet, intenzitás, stb.). Ehhez új, ún. kompenzációbarát két-hullámhosszas holografikus interferometriai alakmérési eljárást fejlesztettem ki, amely a szokásos korábbi módszerekkel ellentétben a hullámhossz-váltás miatt igényel utólagos beállítást ellenőrizhető és folyamatosan követhető módon. Ez a két-referenciás és beállító-felületes változat nem csak lehetővé teszi az utólagos fényintenzitás-állítást képenként – hanem lehetőséget nyújt arra is, hogy a különbségi holográfiánál a pontatlan tárgycsere hatása is mérsékelhető legyen általa<sup>3</sup>.

### *2.b. Beállító-felület optimalizálása a kompenzációbarát két-hullámhosszas alakmérési eljárásnál*

A kompenzációbarát két-hullámhosszas alakmérés alkalmazásai során felismertem, hogy a korábban a különbségi holográfiában is alkalmazott, a tárgy mellett elhelyezett kisméretű beállító tükör nem elégséges a rekonstruált beállító-hullámfrontok teljes egybeesésének interferometrikus pontosságú megfigyelésére. Kimutattam, hogy a beállító-felület teljesen csíktalan állapotában is előfordulhat, hogy a képeltolódás megszüntetése nem pontos: a szintvonalkép tartalmaz nemkívánatos, a pontatlan beállítás következményeként megjelenő csíkokat. Megmutattam, hogy a legjobb megoldás a tárggyal egyező méretű, a tárgynyalázból fényosztó segítségével kicsatolt beállító felület használata lenne. Ez azonban körülményesen használható és elnyomja a tárgynyaláb intenzitását. Ezért javasoltam helyette a tárgyat körülvevő gyűrű alakú beállító-felület használatát – amely éppoly tökéletes megoldásnak bizonyult, és a szintvonalkép megfigyelését sem zavarja<sup>4</sup>.

### *3. A holografikus megvilágítás intenzitásának maximalizálása a két-hullámhosszas különbségi holografikus interferometriai alakmérésnél*

A különbségi holografikus interferometriánál mindig lényegi kérdés a holografikus megvilágítások erőssége, mivel azok természetesen mindig gyengébbek, mint a közvetlen megvilágítások. A KHI két-hullámhosszas alakmérési változatánál pedig ez még kritikusabb, tekintve hogy a megvilágításokat még külön szűrni is kell ahhoz, hogy szétválaszthatók legyenek. Felismertem, hogy a holografikus megvilágítás intenzitása növelhető, ha a megvilágításokat rész-apertúrával választjuk szét, sőt több rész-apertúrából alkotott rács-apertúra révén a megvilágítás intenzitása maximalizálható. Ezen túlmenően meghatároztam azt az ideálisan kompromisszumos referencianyaláb- és tárgynyaláb-irányt, amelynél a képfolt közepének eltolódása a fókusz síkban, így a megengedhető körapertúra átmérője, a lehető legnagyobb. Mindkét esetben sikerült a holografikus megvilágítások fényintenzitását az alaphelyzethez képest egy nagyságrenddel növelnem<sup>5</sup>.

### *4. Nagyobb detektormátrix-felület alkalmazhatóságának megteremtése nagy nagyítású hologram beolvasásoknál a beolvasási idő csökkentéséhez*

Felismertem, hogy nagyításos (másképp pixel-kicsinyítéses) hologram-beolvasásnál fizikailag nagyobb detektormátrix-felület használata ugyan csökkenti a pásztázás időtartamát, de közben a rekonstruált kép minősége romlik. Feltételeztem, hogy ez a nagyobb nagyítású (10×) mikroszkóp objektív széli torzításainak következménye. Kimutattam, hogy a leképezett rész-hologramok korrelációs illesztésekor a képszéleken lévő területek hatása már egyértelműen korrelációcsökkenést eredményez. Egyre nagyobb rész eltávolításakor a korrelációs illesztések minőségét, illetve az így kapott nagyméretű hologramok rekonstruált képének felbontását vizsgálva megállapítottam, hogy a 10×-es mikroszkóp objektív használatakor 1024×1024 pixeles detektormátrix-felület a legnagyobb használható felület, és ezzel 10-szeres látótér-növelés mellett a beolvasási időt negyedére csökkentettem az 512×512 pixeles alapesethez képest változatlan rekonstruált képminőség mellett<sup>6</sup>.

## A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

1. F. Gyímesi, V. Borbély, B. Ráczkevi, Z. Füzessy, „Speckle based photo-stitching in holographic interferometry – for measuring range extension”, *Journal of Holography and Speckle*, **1**(1), 39-45 (2004).
2. F. Gyímesi, V. Borbély, B. Ráczkevi, Z. Füzessy: „Speckles for photo-stitching of interferograms at digital camera detection”, *New Directions in Holography and Speckle*, Ed: H. J. Caufield, C. S. Vikram, American Scientific Publishers, 335-350, (2008).
3. V. Borbély, Z. Füzessy, F. Gyímesi, B. Ráczkevi, „Compensation-friendly two-wavelength contouring method for holographic interferometry”, *Optical Engineering*, **44**(2) 023601-1-6 (2005).
4. Borbély V., Gyímesi F., Füzessy Z., Ráczkevi B., „Optimális referenciatfelület két-hullámhosszas holografikus interferometriai alakméréshez”, *Kvantumelektronika* 2008, Budapest, 2008. október 17., Szerk.: Ádám P., Kiss T., Varró S., P-2.
5. V. Borbély, Z. Füzessy, F. Gyímesi, B. Ráczkevi, „Light intensity versus small aperture in two-wavelength contouring by analogue difference holographic interferometry”, *Optical Engineering*, **48**(4), 045801-1-7 (2009).
6. F. Gyímesi, Z. Füzessy, **V. Borbély**, B. Ráczkevi, Gy. Molnár, A. Czitrovsky, A. T. Nagy, Gy. Molnárka, A. Lotfi, A. Nagy, I. Harmati, D. Szigethy: ”Half-magnitude extensions of resolution and field of view in digital holography by scanning and magnification”, *Applied Optics* **48**(31), 6026-6034. (2009).

## További tudományos közlemények

### Referált folyóiratokban

7. Z. Füzessy, F. Gyímesi, J. Kornis, B. Ráczkevi, V. Borbély, B. Gombkötő: „Analogue and digital holography: absolute and comparative measurements and measuring range extension”, *Technisches Messen* **73**(3), 132-141 (2006).
8. F. Gyímesi, Z. Füzessy, V. Borbély, B. Ráczkevi: „Analogue difference holographic interferometry for two-wavelength contouring”, *Optics Communications*, **282**(2), 276-283 (2009).

### Konferencia kiadványokban

9. F. Gyímesi, V. Borbély, Sz. Mike, B. Ráczkevi, Z. Füzessy: „Beyond the upper limit of holographic interferometry by scanning”, *Dennis Gabor Commemorative Conference, Symposium on Holography and High Resolution Measurement Techniques*, Budapest, 5-6 June, 2000, Conference CD, Eds. Z. Füzessy, Gy. Ákos (2000)

10. Gyímes F., Borbély V., Ráczkevi B., Füzessy Z.: „Csíkok százai elérhetők a holografikus interferometriában”, *Kvantumelektronika* 2000, Budapest, 2000. november 3., Szerk.: Varró S., P-49, (ISBN: 963-372-624-7)
11. Z. Füzessy, B. Ráczkevi, F. Gyímes, V. Borbély: „Error factors of comparison in difference holographic interferometry”, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III*, München 2003, Proceedings of the SPIE, Eds. W. Osten, K. Creath, M. Kujawinska, **5144**, 115-123 (2003)
12. Borbély V., Ráczkevi B., Gyímes F., Füzessy Z.: „Kéthullámhosszas holografikus interferometriai alakméréshez utólagos virtuális tárgypozicionálás – a méréshatár háromszoros kiterjesztéséig“, *Kvantumelektronika* 2003, Budapest, 2003. október 21., Szerk.: Varró S., P-15, (ISBN 963-372-629-8).
13. Ráczkevi B., Borbély V., Gyímes F., Füzessy Z.: „Optikai szűrő holografikus különbségi alakméréshez“, *Kvantumelektronika* 2003, Budapest, 2003. október 21., P-16, (ISBN 963-372-629-8).
14. Z. Füzessy, F. Gyímes, J. Kornis, B. Ráczkevi, V. Borbély, B. Gombkötő: „Analogue and digital developments for project DISCO at Budapest University of Technology and Economics“, *Optical Metrology in Production Engineering*, Strasbourg, France, April 2004, Proceedings of the SPIE, Eds. W. Osten, M. Takeda, **5457**, 610-620 (2004).
15. F. Gyímes, Z. Füzessy, B. Ráczkevi, V. Borbély: „Two-wavelength contouring in difference holographic interferometry and DISCO”, *Optical Metrology in Production Engineering*, Strasbourg, France, April 2004, Proceedings of the SPIE, Eds. W. Osten, M. Takeda, **5457**, 538-545 (2004).
16. F. Gyímes, V. Borbély, Z. Füzessy, B. Ráczkevi: „Digital holography catching up with analogue holography both in resolution and in field of view with bottom-line camera”, *Fringe 2009 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology*, Stuttgart, Németország, 2009.09.14-16., Springer-Verlag, 298-303, (2009).
17. Z. Füzessy, F. Gyímes, V. Borbély: Upgrade holographic interferometry for industrial application by digital holography, *HoloMet, Perspectives of Optical Imaging and Metrology*, Balatonfüred, June 13-16, 2010, (A konferencia anyagát könyvként a Wiley-VCH Verlag GmbH jelenteti meg 2011 tavaszán)

## **Szabadalom**

18. Gyímes F., Füzessy Z., Ráczkevi B., Borbély V., Czitrovszky A., Nagy A. T., Lotfi A., Molnárka Gy., Harmati I., Nagy A., Szigethy D.: „Elrendezés és eljárás hologramok digitális feldolgozására”, Szolgálati találmány, Budapesti Műszaki Egyetem 40%, MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet 22,5%, Széchenyi István Egyetem 22,5 %, Technoorg Linda Tudományos Műszaki Fejlesztő Kft. 15 % , (Magyar szabadalmi igény bejelentve 2006. december 20., közzétéve: 2008. március 8., ikt.sz. 0631463)