

Új színes, illetve önreferenciás holografikus képalkotó módszerek

PhD disszertáció



Kiss Márton Zsolt

Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai Kar
Roska Tamás Műszaki és Természettudományi Doktori Iskola

Témavezető:

Dr. Zarándy Ákos

Budapest, 2020

„Jól csak a szívével lát az ember”

/ Antoine de Saint-Exupéry /

Abstract

Holographic imaging is based on the interference of monochrome and coherent waves, thus making colour or fluorescent holographic imaging is a challenge. Here, in my PhD dissertation I introduce new ways to make colour and fluorescent – self-referenced- holographic imaging.

The motivation of my research is to identify the indicator organisms (algae and worms) of the freely flowing water samples. To identify algae, their colour and fluorescent properties are also necessary beside their morphology. These requirements pointed out the ways of my research.

Colour holographic systems are based on the multiplication of different coloured monochrome holographic systems. So, the colour image is created from different coloured monochrome holographic reconstructions. When the target object is moving, the holograms should be captured in the same time, and the hologram reconstructions should carry the image information from the same perspective of the object with the same magnification, position, and field distortion. Although the nowadays setups gives good solutions they are not as robust as to form the basis of an industrial holographic instrument. In my research work I have given new hardware and software solutions to our colour digital holographic microscope (DHM). I have created a new kind of illumination at holography to make a robust device with higher efficiency that was supported by a compact optical system. Also, I have made a new numerical technique to eliminate the diffraction fringes that were appearing on the edges during the numerical wave propagation process.

Self-referenced digital holographic setups give the chance to holographically image fluorescent, self-luminescent, distant or huge objects. These setups are complex or based on a high prized optical element. During my research I realized that a straightforward ring-shaped bifocal lens (RBL) can be applied for self-referenced holography. I have determined the required parameters and their connections (like optical path difference) of the ring-shaped bifocal lens to make self-interference pattern with it. Based on my theoretical model, I designed a useful RBL and made it manufactured. Then I built it into a chosen conventional microscope to make measurements confirming that the theoretical model is correct and using a ring-shaped bifocal lens self-referenced holography is implementable.

K i v o n a t

A holografikus képalkotás adott hullámhosszú és koherens hullámok interferenciáján alapuló eljárás, így a többszínű, illetve fluoreszcens képek létrehozásához nem egyértelmű az alkalmazhatósága. Disszertációmban új megoldást adok színes, illetve fluoreszcens holografikus képalkotásokra egyaránt.

Szűkebb tématerületem a látható hullámhosszon működő digitális holografikus mikroszkópia (DHM), melyet szabadon úszó indikátor szervezetek (algák és férgek) felismerése céljából kutattam. Ezen lények felismerését nagyban segítik a képalkotás színes, illetve fluoreszcens változatai. Így lett kutatásomnak két fő területe.

A színes digitális holografikus mikroszkópia alapja egy összetett holografikus rendszer, melyben kettő vagy több különböző színű hologram-rekonstrukciókból illesztik össze a vizsgált objektum színes képét. A mozgó objektum magában foglalja azt az igényt, hogy a különböző színű hologramok egy időben keletkezzenek, és azonos perspektívából ábrázolják az adott objektumot azonos nagyítással, torzításokkal és pozícióval. A meglévő rendszerek - bár jó megoldásokat adtak - kiterjedt szerkezetük miatt nem eléggé biztosították a stabilitást. Munkám során egyforma súllyal kerestem a hardveres és a szoftveres megújulás lehetőségeit. Hardveres újításom volt a színes DHM-hez illesztett új megvilágítás mely nagyobb stabilitást és kisebb expozíciós időt biztosított az átfolyós mintát néző rendszernek. Szoftver oldalon, a holografikus képalkotás során gyakran jelentkező képszéli diffrakciót kezeltem le.

Az önreferenciás digitális holográfia -névéhez híven- az interferencia jelenségen alapul, amit a fény koherens természete tesz lehetővé. Amikor a fényforrás nem tipikusan koherens, például mikor a fluoreszcens tárgy maga a fényforrás, akkor nagyságrendekkel kisebb koherenciájú fény áll rendelkezésre az interferencia megvalósításához, ami a szokványostól eltérő geometriai elrendezést kíván. Kutatásomban eljutottam arra a felismerésre, hogy gyűrűs bifokális lencse (GyBL) segítségével is lehet az önreferenciás holográfiát a fluoreszcens mikroszkópia szolgálatába állítani, nem csak kiterjedt interferométerekkel, és drága fénymodulátorokkal. Kidolgoztam a gyűrűs bifokális lencse holografikus képalkotásának elvi hátterét, mely a leképzés mellett az öninterferenciához szükséges optikai úthossz különbségekkel is számol. Megterveztem és legyártattam a gyűrűs bifokális lencsét, mely hatékonyságát hagyományos mikroszkópba szerelve mérésekkel is bizonyítottam.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőimnek és főnökeimnek, Dr. Zarándy Ákosnak és Dr. Tőkés Szabolcsnak, hogy tudományos terepet biztosítottak kutatásaimnak, és nemzetközi konferenciákon való részvételek támogatásával is élő visszajelzéseket kaphattam munkámra.

Köszönöm kollégáimnak is, Dr. Orzó Lászlónak, Dr. Gergelyi Domonkosnak, Dr. Göröcs Zoltánnak, Lakatos Péternek, Tóth Veronikának, Wittner Balázsnak, Nagy Benedeknek és Vágvölgyi Anikónak szakmai észrevételeiket és a baráti beszélgetéseket.

Köszönöm Dr. Erdei Gábornak fizikus szemmel történő szakmai észrevételeit.

Köszönöm a Roska Tamás Műszaki és Természettudományi Doktori Iskola Tanácsának és vezetőjének Dr. Szolgay Péternek, hogy a doktori iskola családi hangulatú és értékteremtő szárnyai alatt lehettem doktorandusz.

Köszönöm Katinka néninek fáradhatatlan alázatos munkáját és szívből jövő drukkolását.

Köszönöm Dr. Zsedrovits Tamásnak, Péri Mártonnak és Dr. Jáki Zsuzsannának észrevételeit.

Köszönöm Bátor Botond atyának, hogy a hargitafürdői kolostor két hét csöndjében elkezdhettem disszertációm írását.

Je voudrais remercier Isabelle et Philippe qui m'ont logé pendant six semaines chez eux pour que je puisse apprendre efficacement la langue française et passer l'examen.

Köszönöm a Medicontur Kft-nek a lencse legyártásában nyújtott segítségét, mely nélkül nem sikerülhetett volna az új elrendezés megalkotása és tesztelése.

Köszönöm az Unicam Kft-nek az optikai rendszerek teszteléséhez nyújtott próbaoptikák biztosítását.

Köszönöm Szüleimnek, Testvéreimnek és Nagymamáimnak támogató szeretetüket és imáikat.

Végül, de nem utolsó sorban, köszönöm a Jóistennek, hogy dolgozatom végére érhettem.

Tartalomjegyzék

Jelölések és rövidítések	8
Képalírások gyűjteménye	12
1. Bevezetés	16
1.1 A dolgozat szerkezete	18
2. Holografikus képalkotás	20
2.1 Holográfia koncepciója	20
2.2 Holográfia területei	21
2.3 Hagyományos és önreferenciás holografikus képalkotó elrendezések	23
2.4 Digitális holográfia – 2D-s hologram	24
2.5 Digitális holografikus képalkotást befolyásoló tényezők	24
2.6 Hologram rekonstrukció	25
3. Optikai modellek	26
3.1 Geometriai optika	26
3.1.1 Geometriai optika elvi megközelítése	26
3.1.2 Mátrix optika	28
3.2 Hullámoptikai modellek	30
3.2.1 Számítógépes hullámterjesztési szimuláció	32
3.3 Az USAF tesztárgy	33
4. DHM megvilágítása	34
4.1 Színes DHM alkalmazási területe	34
4.2 Színes DHM optikai rendszere	35
4.3 Elvárások a megvilágítással szemben	36
4.4 Megvilágítások színes holográfiában	37
4.5 Új megvilágítás	38
4.6 Összefoglaló	40
1. Tézis	41

5. Numerikus rekonstrukció	42
5.1 Színes DHM rekonstrukciója.....	42
5.1.1. A megépült színes DHM képei.....	44
5.2 Színes rekonstrukció numerikus problémája.....	45
5.3 Képszéli diffrakció elkerülése a DHM-ben	46
5.4 Összefoglaló	49
2. Tézis	50
6. Önreferenciás holográfia	51
6.1 Önreferenciás holográfia elvi háttere	51
6.2 Tudomány állása.....	53
6.3 Gyűrűs bifokális lencse	56
6.3.1 GyBL, mint új optikai elem, az önreferenciás holográfiában.....	56
6.3.1.1 Gyűrűs bifokális lencsével felvett hologram képe	58
6.3.2 Optikai úthosszak számítása	59
6.3.2.1 A gyűrűs bifokális lencse optikai úthossz-kompenzációja.....	60
6.3.2.2 Általam alkotott modell alapja	65
6.3.3 Kép-ikerkép szétválasztása a képtérben GyBL segítségével	66
6.4 Gyűrűs bifokális lencse alkalmazhatósága	69
6.5 Mérések és rekonstrukciók	70
6.5.1 Tárgyméret vizsgálata.....	71
6.5.2 Mélységi látás vizsgálata	71
6.5.3 Élő alga autofluoreszcens mérése	74
6.6 Összefoglaló	74
3. Tézis	75
7 Irodalom	76
7.1 A szerző szabadalmának gyűjteménye	76
7.2 A szerző folyóirat publikációinak gyűjteménye.....	76
7.3 A szerző konferencia publikációinak gyűjteménye	76
7.4 Kapcsolódó publikációk	77

Jelölések és rövidítések

A	Amplitúdó
A_c	A gyűrűs bifokális lencse tengely menti területének apertúrája
A_{gy}	A gyűrűs bifokális lencse gyűrűs területének apertúrája
c	A fény vákuumbeli sebessége [m/s]
D_c	Bifokális képalkotás során a centrál nyaláb <i>átmérője</i> a detektoron
d_{det}	Bifokális képalkotás során a centrál képsík és a detektor távolsága
d_{lencse}	Lencse vastagsága
$E(x, y, z)$	Elektromágneses mező komplex amplitúdója az adott (x, y, z) helyen
$\mathcal{F}\{ \}$	Fourier-transzformáció
f	Adott optikai elemhez vagy felülethez tartozó fókusztávolság
f_c	A gyűrűs bifokális lencse <i>tengely</i> menti lencsénének fókusztávolsága
f_{gy}	A gyűrűs bifokális lencse <i>gyűrűs</i> lencsénének fókusztávolsága
h	Hologram területének magassága [μm]
$H_{\text{átv}}$	Szabadtéri terjedés átviteli függvénye térfrekvencia térben
$I(x, y, z)$	Hologram <i>intenzitása</i> az adott (x, y, z) helyen
$I_{\text{holo},z}$	A „z” síkban fölvetett digitális hologram intenzitás-eloszlása
k	Hullámszám (adott irányú komponense), $k = 2\pi/\lambda$
L_c	A gyűrűs bifokális lencse tengely menti fázistolása az adott sugár mentén
L_{gy}	A gyűrűs bifokális lencse gyűrűs lencsénének fázistolása az adott sugár mentén
l_{ob}	Az új megvilágításnál a vörös és a kék szálvégek távolsága [μm]
l_{og}	Az új megvilágításnál a vörös és a zöld szálvégek távolsága [μm]

M, N	Egész számok
NA_{be}	Az optikai rendszernek a belépő numerikus apertúrája
NA_{ki}	Az optikai rendszernek a kilépő numerikus apertúrája
n	A közeg törésmutatója [-]
OPD	Bifokális képalkotás során a centrál és a gyűrűs nyaláb optikai úthosszkülönbsége
O_z	Tárgnyaláb komplex amplitúdója a „z” síkban
P_i	i-edik pont a térben
R	Felülethez tartozó görbületi sugár
R_c	Bifokális képalkotás során a centrál nyaláb hullámfrontjának görbületi sugara
R_{gy}	Bifokális képalkotás során a gyűrűs nyaláb hullámfrontjának görbületi sugara
r	Optikai tengelytől való távolság
$r_{félgy}$	Bifokális képalkotás során a hologram gyűrű középméretjének a fele
r_o	A gyűrűs bifokális lencse osztókörének sugara, az apertúrák határa
r_{Hk}	A gyűrűs nyaláb, illetve hologram középméretjének sugara
r_{GyBL}	A gyűrűs bifokális lencse külső kerületének sugara
$RBL1, RBL2$	Közös „x” hely, de az ideális gyűrűs bifokális vékony lencse előtti és utáni síkokban.
Ref_z	Referencianyaláb komplex amplitúdója a „z” síkban
$Rek(x, y, z)$	Rekonstruálónyaláb komplex amplitúdója az adott helyen
s, s'	Kép és tárgyoldali metszéki távolságok [mm]
$sign()$	Szignum függvény
w	Hologram területének szélessége [μm]
x, y, z	A teret jellemző descartes-i koordináták, ahol alapvetően a „z” a terjedési irány, és „x”, illetve „y” pedig a rá merőleges síkot feszítő koordináták
z_c	Bifokális képalkotás során a centrál képsík helye

z_{gy}	Bifokális képalkotás során a gyűrűs képsík helye
z_{det}	Bifokális képalkotás során a detektor helye
α, α'	Fénysugár beesési, illetve törési szögei [rad]
β	Mátrix optikában a fényugár és az optikai tengely által bezárt szög
Δcg	Bifokális képalkotás során keletkezett képsíkok távolsága
Δk	Hullámszám változás
ζ, η	Az „ x, y ” -hoz hasonlóan a teret jellemző descartes-i koordináták.
λ	Hullámhossz [μm]
θ	Sík hullámfrontú referencia vagy rekonstruálónyalábok által bezárt szög [rad]
Φ	Fázis
φ	Közeghatár vagy lencse törőereje
\vec{a}	Vektorjelölés
CF	Colour Filter
DHM	Digitális Holografikus Mikroszkóp
EM	Hagyományos fénymikroszkóp
FFT	Fast Fourier Transform
FINCH	Fresnel Incoherent Correlation Holography
GyBL	Gyűrűs Bifokális Lencse – (RBL) Ringshaped Bifocal Lens
IP	Interference Pattern
KTH	Korrigált Térfogati Hologram
LED	Light-emitting Diode

OPD	Optical Path Difference [μm], [λ]
ÖHM	Önreferenciás Holografikus Mikroszkóp
PSF	Point Spread Function
RBL	Ringshaped Bifocal Lens – (GyBL) Gyűrűs Bifokális Lencse
SIP	Self-referenced Interference Pattern – önreferenciás interferencia mintázat
SLM	Spatial Light Modulator - térbeli fénymodulátor
TH	Térfogati Hologram
USAF	United States Air Force

Képalírások gyűjteménye

1. ábra A hologram egy ismert referencianyaláb és a mérendő tárgynyaláb interferenciáját rögzíti. Az interferencia révén válik láthatóvá és így rögzíthetővé a fény fázisa. Ezen (transzmissziós) hologram rekonstrukciója a referencianyalábbal azonos rekonstruálónyaláb általi hologram átvilágítással valósul meg.....	21
2. ábra a) Gábor-féle in-line elrendezés, ahol a megvilágítás tárgyon nem szóródó fénye alkotja a referencianyalábot, a tárgyon szóródó pedig a tárgynyalábot. b) Off-axis elrendezés: annyiban különbözik az in-line elrendezéstől, hogy a referencianyalábból ki van egy rész csatolva, és azt szög alatt keverik újra a többi nyalábhoz. c) Önreferenciás holografikus elrendezéseknél a tárgyról jövő fényből állítják elő a tárgy és a referencianyalábokat egyaránt.	23
3. ábra Fénysugár fénytörése gömbfelületű közeg határán a Snellius-Descartes törvénye alapján.	27
4. ábra Vékonylencsén való sugárátvezetés, melyből a Newton-formula is levezethető.	28
5. ábra Mátrix optikában a sugárátvezetéshez szükséges paraméterek és jelölései.	29
6. ábra a) Fresnel-Kirchoff diffrakciós integrálformula kísérő ábrája. Pontforrás által megvilágított sík ernyő. [42] b) Rayleigh-Sommerfield diffrakciós integrálformula kísérő ábrája. Pontforrás által megvilágított sík ernyő. [42] c) Fraunhofer és Fresnel diffrakciók alkalmazása kiterjedt objektumokra.	30
7. ábra „USAF Resolving Power Test Target 1951” nevű, optikai rendszerek feloldóképesség vizsgálatára alkotott teszttárgy részletei normál (a) és inverz (b) kivitelben. A különböző elemekhez tartozó vonalvastagság értékeket a (c)táblázat mutatja be [μm]-ben.....	33
8. ábra A színes digitális holografikus mikroszkóp optikai elrendezése.	35
9. ábra Az új megvilágítás a megépített színes digitális holografikus mikroszkóp optikai rendszere által leképezve.	38
10. ábra a) Új színes megvilágítás holografikus képalkotó berendezések számára. A különböző színre tervezett single-módusú optikai szálak egy szálcsatlakozóban vannak szorosan egymás mellé kötegelve. Kis fényvesztésű és jó minőségű stabil hullámfrontú Gauss-nyalábokat biztosít. b) A megvilágítás beépítve.	39
11. ábra A színes digitális holografikus mikroszkóp megvilágításának végződése. A fényképen látható az optikai szálvégek elhelyezkedése, és így azok távolságai mérhetőek. A köpenyek átmérője $125 \mu\text{m}$	40
12. ábra a) Az új színes megvilágítás szerkezete. A különböző hullámhosszra tervezett single-módusú optikai szálak egy szálvégcsatlakozóban helyezkednek el szorosan egymás mellett. b)	

Ezt több, különböző hullámhosszra tervezett optikai szállal is össze lehet rakni. c) Vannak holografikus elrendezések (mint például szuperrezolúciót megvalósítóak), amelyeknél előnyös azonos, de egymás mellett elhelyezkedő optikai szálakból megalkotni a megvilágítást. d) Egy vegyes kivitelű elrendezés.....	40
13. ábra A pontforrások fénye a detektortól való nagy távolságuk miatt sík referenciahullámként közelíthetőek. A pontforrások egymástól való távolsága miatt a sík referenciahullámok szöveget zárnak be egymással.....	43
14. ábra Tilt-kompenzáció nélküli (a, c) és a kompenzációs (b, d) hologram-rekonstrukciók. Ahol (a, b) Pediastrum algatelep, és (c, d) pedig fonalas Melosira. (A méretvonalak hossza 20 μm .)	44
15. ábra A DHM-el készített színes képek algákról. USAF tesztárgy holografikus képe (a) és színes rekonstrukciók algákról. Scenedesmus (b, c, h, j), Asterionella (d, e), Melosira (f, i), Pediastrum (g, k), Ankistrodesmus (l), Thalassiosirales (m, n), és Bacillariophyceae (o). (A méretvonalak hossza 20 μm .)	45
16. ábra Rekonstruálónyaláb általános ferdeségének (tilt) a hatása a széleken megjelenő diffrakciós csík, mely a tilt pontos beállításával korrigálható. a) Egy hagyományos in-line hologram. b) A rekonstruálónyaláb fázisa, mely általános tilt-et tartalmaz. c) Oldalhossz alapján kerekített tilt, hogy a rekonstruálónyaláb a gyors Fourier-transzformáció során ne szenvedjen fázisugrást a széleken. d) és e) pedig rendre a „b”, illetve a „c” fázisú rekonstruálónyalábbal történt rekonstrukciók.....	49
17. ábra Két gömbhullám által írt vékony hologramból (a) síkhullámmal történő rekonstrukció (b) során keletkező gömbhullámok és azok görbületes sugarai. „H” a hologram.	52
18. ábra Inkoherensen összeadódó önreferenciás hologramok (a,b) moiré jelenséget idéznek elő.	53
19. ábra Hariharan-Sen típusú önreferenciás holografikus mikroszkóp képalkotási elve. Látható, hogy egy az optikai tengelyen levő tárgypontról kiinduló fény kettéválasztott részei ellenkező irányban járnak körbe az interferométer aszimmetrikus háromszögét, azonos úthosszakat bejárva az optikai tengelyen. Az ábra egy pont (a piros) önreferenciás holografikus leképzését mutatja, ahol a tárgypontról jövő fénynyaláb két ága a sárga és a türkiz, melyek aztán a detektoron interferálnak.....	54
20. ábra Színes digitális önreferenciás holografikus Michelson interferométer alapú képalkotó rendszer [55].	54
21. ábra Térbeli fénymodulátor (SLM) alapú FINCH önreferenciás holografikus mikroszkóp elvi ábrája. Látható az interferométer mellőzéséből fakadó kompaktsága a rendszernek. [64]	55
22. ábra A gyűrűs bifokális lencse elől és oldal nézetei. Látható a homogén anyagú lencse bifokálisitását előidéző geometriai kialakítás.....	56

23. ábra A gyűrűs bifokális lencse (GyBL), amint párhuzamos nyalábból önreferenciás interferencia csíkrendszer (IP) alkot. a) A megtervezett GyBL-en történő sugárátvezetés. b) Egyéb tetszőleges GyBL-en történő nyalábátvezetések. 57
24. ábra GyBL által alkotott gyűrűs hologram képe. A d_c átmérőjű piros kör a centrál nyalábot jelöli ki, míg a zöld körök a gyűrűs nyaláb helyét mutatják. $2rHk$ a gyűrűs nyaláb (és így közel a gyűrűs hologram) középpátmértőjét jelöli. A zöld területen, a két nyaláb metszetében láthatóak az interferencia csíkok. 58
25. ábra Az GyBL optikai úthosszainak számításához alkalmazott szemlélet. a) Optikai tengellyel azonos tengelyű nyalábok úthosszkülönbségei a detektor síkjában Hariharan-Sen interferométer alapú rendszer esetén. a) Optikai tengellyel azonos tengelyű nyalábok úthosszkülönbségei a detektor síkjában gyűrűs bifokális lencse alapú rendszer esetén. 60
26. ábra A gyűrűs bifokális lencse gyűrűs és centrál részének tengely menti optikai úthosszkülönbségének (OPD) beállításához használt modell ábrája. R_{gy} , R_c a gyűrűs és centrál nyaláb képeinek távolsága a gyűrű középvonalától. Z_{gy} és Z_c a gyűrűs és a centrál nyaláb képeinek helyei, d_{ettav} a detektor távolsága a centrál képsíktól, Δcg a centrál és a gyűrűs képsíkok távolsága, és rHk a gyűrű középvonal, ahol az optikai úthosszkülönbség alap esetben nulla. 61
27. ábra A görbe a tárgy távolság függvényében mutatja meg, hogy milyen tengely menti optikai úthosszkülönbséggel kellene a gyűrűs bifokális lencsének rendelkeznie, hogy a tárgy és a referencianyaláb nulla optikai úthosszkülönbsége a gyűrű középvonalon legyen biztosítva. Látható, hogy 8 mm tárgymozgás során 2,5 hullámhosszon belül kéne csak változtatni a GyBL úthossz kompenzációját ahhoz, hogy a nulla úthosszkülönbség helye mindig a gyűrű középvonalra essen. Az objektív fókusz síkjában (0-ban) a görbe vízszintes, azaz a hozzá tartozó OPD érték esetén, annak környékén a nulla úthosszkülönbség a gyűrű középvonalra esik. Egy 630 nm hullámhosszú fény átlagos 14 μm -es koherenciahossza 22,2 λ -val egyenlő. 63
28. ábra Az előző diagramon a fókusz síkhoz tartozó OPD-t alapul és fixnek véve az itt látható görbe megmutatja, hogy a tárgy távolság függvényében mennyivel hagyja el a gyűrű középvonalat a centrál és gyűrűs nyalábok nulla úthosszkülönbségének a helye. Az 1 érték a gyűrűs nyaláb külső szélét jelentené, míg -1 pedig a belsőét. 64
29. ábra A gyűrűs bifokális lencsével (GyBL) történő holografikus képalkotás. Látható, hogy a rekonstrukciós síkban a kép és az ikerkép a térben szétválik. 66
30. ábra Gyűrűs bifokális lencse segítségével fölvetett gyűrűs hologram rekonstrukciója. A) Teljes rekonstrukció. B) Rekonstrukció kiemelt részlete, ahol jól látható, hogy az eredeti hologram helyéről (a fényes gyűrűből) kidiffraktálódtak az interferencia csíkok, így az ikerkép a piros körön kívülre került, a kép a „4”-es minta pedig a gyűrű közepére. C) Az eredeti fluoreszcens testtárgy fényképe. Megfigyelhető, hogy az intenzitáseloszlás a rekonstrukción és a fényképen korrelál, azaz a „4”-esnek nem csak az alakja, hanem a szerkezete is visszakapható.

Ugyanakkor a képek alapvető „stílus” különbségei is megfigyelhetők, mint a háttér és a diffrakciós csíkok jelenléte.....	67
31. ábra Ahol a) a fókuszmélység (y_1 , [μm]) és a Strehl arány (y_2 , [-]) alakulását mutatja be a hologram közepéből hiányzó gyűrűk darabszámának (x) függvényében; b) a hologramokból 3000 μm távolságba rekonstruált pontok és környezetüknek nagyított képei. c) Az intenzitás hologramok.....	68
32. ábra A megépített önreferenciásholografikus mikroszkóp elvi vázlata. A pontforrás képét egy objektív bontja fel. A fénynyalábot a bifokális lencse (GyBL) választja ketté térben. A színszűrő (CF) a gerjesztő fényt szűri ki, és a fluoreszcens fény sávszélességét típustól függően csökkenti. A Tubuslencse a nyalábok divergenciáját állítja be, és a detektor a hologramot rögzíti. A két nyaláb metszete az interferencia csíkrendszer (IP) megjelenési helye.....	69
33. ábra a) A tengely menti nyaláb képe és a gyűrűs nyaláb defokuszált képe, míg b)-nél fordítva. c) intenzitáseloszlás a piros csík mentén d) Hologram.....	70
34. ábra Különböző méretű fluoreszcens „2”-es minta holografikusan rekonstruált képei figyelhetők meg. A narancssárga méretvonalak 200 μm -t jelölnek. A több pontforrásból álló kép kontrasztja kisebb, mert több pontforrás hologramjai inkoherenesen összeadódva kiátlagolják egymást.....	71
35. ábra Mélységvizsgálat Az a) ábra a Tértfogati Hologram és az abból numerikus eljárás során javított Korrigált Tértfogati Hologram felezett képeit mutatja. A három különböző méretű gyűrű a különböző mélységekbe helyezett ugyan azon objektum hologramjai. b) A különböző z távolságokba történő rekonstrukciói a korrigált és a mért hologramoknak.....	72
36. ábra A hagyományos (EM) és az önreferenciás holografikus mikroszkóp (ÖHM) különböző mélységekhez tartozó pontszórás függvénye. Amíg a hagyományos mikroszkóp PSF-je a fókuszról kimozdítva a tárgyat teljesen ellaposodik, addig a holografikus mikroszkóp PSF-je megtartja alakját 1 mm-es kimozdítás esetén is.	73
37. ábra Alga rekonstrukció. a) Hagományos fluoreszcens kép. A narancssárga méretvonal hossza 200 μm . b) Fölvett hologram. c) Rekonstrukció, melyen nem csak a fonalas alga látható, hanem apróbb fluoreszcens algák is.....	74

1. Bevezetés

A gépi látás az automatizálás fontos eszköze a valós idejű és a napi 24 órás üzemű folyamatok megvalósításához. A gépi látás első két mozzanata az adatgyűjtés és a kiértékelés. Ezekkel foglalkozom. A terület pedig vízminőség ellenőrzés. Az ivóvizet kézi mintavételezéssel laborokban vizsgálják világszerte – ha vizsgálják. Ha a víz a mintavétel után szennyeződik, az már csak a kórházlátogatásokból derül ki. A víz kémiai szennyezettségére a biológiai mérések utalhatnak, hiszen a szennyeződések alapvetően együtt járnak. Szerencsére a víz biológiai összetétele már egy eszközzel, a képalkotással meghatározható, s a gépi látással automatizálható is.

Célom mikrobiológiai lények beazonosítását szolgáló képalkotó berendezések működési elvén módosítani a jobb képminőség és a stabilabb üzemi működés érdekében.

Mikrobiológiában az automatizálhatóságot növeli, ha nem kell a mintát preparálni vizsgálat céljából, azaz, ha a minta tárgyai szabad lebegés vagy áramlás közben is megfigyelhetők. Ehhez szkennelés nélküli térfogati látás előnyös. A holográfia alkalmas erre. Általa lehetőség nyílik térfogati, illetve optika nélküli képleképzésre egyaránt. Szemben a hagyományos képalkotással, ahol az expozíció során a tárgy síkbeli képe kerül rögzítésre, a holográfia lényege abban áll, hogy a tárgyról jövő fény hullámfrontját rögzíti annak intenzitás és fázis információjával együtt a hologramban. Digitális holográfiában ez egy kétdimenziós intenzitáseloszlás, melyből a tárgytérfogat tetszőleges és összes síkjának képét meg lehet határozni a fény numerikus terjesztése útján. Ezért van, hogy egy expozícióval maga a térfogat képi információja rögzíthető, nem csak a térfogatának egy síkja. Ezen leírásból már látható volt, hogy a holografikus képalkotás egy kétlépcsős eljárás, ahol az első a hologram rögzítése megfelelő optikai rendszer segítségével, a második pedig a hologramból való numerikus rekonstrukció.

A mikrobiológia vízvizsgálati területére fókuszáltam, ahol az elsődleges nehézség az élőlények és az élettelen törmelékek biztonságos megkülönböztetése. Ehhez hagyományosan a biológiai laborokban két módszer alakult ki. Az egyik a *jó felbontású színes képalkotás*on és alakfelismerésen alapul, másik a *fluoreszcens képalkotás*on. Mind a kettő holografikus megvalósítása kihívást jelent, még ha vannak is meglévő megoldások. Kutatásaimat a *színes holografikus* illetve a *fluoreszcens holografikus* képalkotások területein végeztem, és téziseim is e témákban fogalmazznak meg új tudományos eredményeket.

Laboromban kollégáimmal megépítettünk egy színes digitális holografikus mikroszkópot vízvizsgálat céljára. Színes képének színcsatornáit különböző egy vonalas spektrumú hologram rekonstrukciók adják. Színes holográfiában a hologramok rögzítésekor (ami az első lépcsőfok) mozgó objektumok esetén jó ha az alábbi szempontokat figyelembe veszünk: a különböző színű hologramokat egyszerre rögzítsük, és a különböző színű hologramok ugyanabból a nézetből és nagyítással tartalmazzák a képi információt (ez hagyományos színeskép rögzítésekor is fennáll).

Színes holográfiában minden egyes színcsatorna önálló fényforrással bír. Ezek megvilágításait kell összevezetni úgy, hogy többek között ugyanazt a nézetű képalkotást biztosítsák. A fények összevezetésére sok megoldás van, de munkámban bemutatok egy újat, ami azoknál olcsóbb, egyszerűbb és ami a legfontosabb, hogy stabilabb jó megoldást ad. Ezzel kapcsolatos tudományos eredményeimet az első tézis fogalmazza meg, mely így szól:

1. Tézis *Új megvilágítást dolgoztam ki színes digitális holografikus képalkotás számára. Bebizonyítottam, hogy különböző hullámhosszokra tervezett single-módusú optikai szálak kimeneti végeiknek egy optikai szálcsatlakozóba való egymással párhuzamos és szoros illesztésével színes holográfia számára robusztus, könnyen kezelhető és pozícionálható, tisztántartható és különböző hullámhosszú single-módusú Gauss-nyalábokat biztosító megvilágítás építhető egynézetű képalkotáshoz. Az optikai szálak önálló szabad végeikre kívánt fényforrások illeszthetők. A megvilágítás szabadalmaztatásra került, és alkalmazást nyert egy forgalomba állított színes digitális holografikus mikroszkópban.*

Digitális holográfiában a második lépcsőfok, a rekonstrukció numerikusan történik. A különböző színcsatornák rekonstrukcióinak pontos fedésbe hozását ferde síkhullám terjesztéssel valósítjuk meg. A ferde síkhullám terjesztés és a numerikus rekonstrukció együtt egy numerikus hibát, a képszéli diffrakciót eredményezi. Bebizonyítottam, hogy a síkhullámok ferdeségének megfelelő kerekítésével a diffrakciós hiba -zaj- megszüntethető, és színcsatorna pozícionálási artefaktum se keletkezik tőle. Ezen új eredményt a második tézisem mondja ki:

2. Tézis *Új, a jelenlegieknél hatékonyabb algoritmikus megoldást dolgoztam ki, amely a ferde síkhullámmal történő numerikus rekonstrukciók során, a képtér szélén az FFT numerikus artefaktjaként keletkező diffrakciókat küszöböli ki azzal, hogy a ferde síkhullám ferdeségét úgy korrigálja, hogy a kép oldalainak hosszai megegyezzenek a velük párhuzamos hullámszámvektor-komponensekből származtatható hullámhosszak egész számú szorzataival. Az új eljárás megtartja a hologramok és a rekonstrukciók eredeti méreteit, és kellő paraméterezés mellett nincs hatással a képalkotásra, ugyanakkor számítás és műveletigénye is elenyésző a rekonstrukcióéhoz képest.*

Biológiai minták vizsgálata során a fluoreszcens képalkotás plusz információt eredményez. A színes holografikus mikroszkóp nem alkalmazható fluoreszcens mérésekre. Fluoreszcens képalkotásnál a képalkotó fény a gerjesztés hatására az élőlény szintestje vagy az élőlényhez kötődő festék által kibocsátott fluoreszcens fény. Ez igen kicsi koherenciahosszal rendelkezik, ezért inkoherens fénynek is nevezik. Inkoherens fényvel, a fáziskülönbség időbeli állandóságának rövidege miatt, nehéz rögzíthető interferencia csíkrendszert, így hologramot is létrehozni. Hagyományos és önreferenciás holográfiában az interferenciát létrehívó referencia és tárgynyaláb fényeinek a forrása egyaránt ugyanaz, csak az előbbi esetben ez egy a tárgytól különböző fényforrás, míg az utóbbiban az optikai elrendezés szempontjából a tárgy maga tekinthető annak. A fluoreszcens holográfia önreferenciás holográfia. Itt a megoldandó feladat, és a célom volt egy olyan holografikus optikai rendszer létrehívása, mely a tárgyról jövő kis koherenciájú fényt kettébontja, és közel nulla úthosszkülönbség mellett modulálja referencia és tárgynyalábbá úgy, hogy azok egymással koherensek maradvan interferálhassanak a hologram megalkotásához, melyből aztán az objektum képe rekonstruálható. Önreferenciás holografikus elrendezésekből is többet lehet találni. Az általam először megfogalmazott, és megvalósított elrendezés a jelenleg legegyszerűbb, kompaktabb és stabilabb. Ezen állításomat a 3. tézis mondja ki:

3. Tézis *Önreferenciás holografikus képalkotásra elsőként javasoltam gyűrűs bifokális lencse (GyBL) használatát. A GyBL-t megterveztem, és a gyártmányt beépítettem egy hagyományos mikroszkópba. A GyBL által rajzolt hologram gyűrű alakú. Mérésekkel igazoltam, hogy a GyBL alkalmas kis koherenciahosszú fényvel, mint például fluoreszcens fényvel is az önreferenciás holografikus képalkotásra, illetve, hogy a GyBL-vel megépített optikai rendszer a vele hasonló hagyományos leképezésű optikánál nagyságrenddel nagyobb mélységet is képes egy expozícióval átlátni. A gyűrűs hologramból való rekonstrukció síkjában a kép és az ikerkép térben szétválik, így azok nem fedik át egymást. Bebizonyítottam, hogy a GyBL alkalmazásával lehetőség nyílik egy egyszerű, kompakt, robusztus és olcsó önreferenciás holografikus mikroszkóp megépítésére.*

1.1 A dolgozat szerkezete

2. fejezet – Tudományos eredményeim a holográfiához köthetőek. Ezért elsőként a holográfia elvét és lényegét foglalom össze. Továbbá itt teszek kísérletet a holográfia szerteágazó világának felvillantására, melyből látható lesz, hogy mennyire megmozgatta a tudomány művelőit Gábor Dénes felfedezése.

A holográfia kétlépcsős eljárás. Az első lépcső a hologram létrehozását valósítja meg, a második a hologramban levő információ kiolvasását.

A holográfiának a képalkotó területére fókuszálva bemutatom az alapvető holografikus elrendezéseket, az in-line, off-axis és önreferenciás koncepciókat, melyek a hologramot hivatottak létrehozni. Pár példával szemléltetem azoknak az iparban vagy a kutatásban jelen lévő felhasználási területeit is.

Az optikai elrendezések bemutatása után a holográfia második lépcsőjét, a rekonstrukciót és annak optikai rendszerhez köthető alap eljárásait mutatom be, és kitérek a kép-ikerkép problémájára is.

Ezen fejezet segíti a kedves olvasót a téziseim elhelyezésében a holográfia szerteágazó területén. De, aki a holográfiában járatos, bátran lépje át e fejezetet.

3. fejezet - Kutatásaimban optikai modellezéseket hajtottam végre a holografikus képalkotás megismerése, alkalmazása és újítása céljából. Ebben a fejezetben a felhasznált elméleti modelleket mutatom be, mely tartalmazza a holográfiában nélkülözhetetlen geometriai optika és a hullámoptika eszközeit egyaránt.

4. fejezet - A színes digitális holografikus mikroszkóp (DHM) egyik kulcseleme a megvilágítás. Bemutatom a színes DHM optikai rendszerét és működését (amelynek új megvilágítást adtam), illetve mások által térfogati holográfiában alkalmazott megvilágításait. Majd ismertetem az új megvilágítást, mely eredményét az 1. tézis foglalja magába.

5. fejezet – Hologram rekonstrukció során, a kép szélén gyakran keletkezik diffrakciós zaj. Ennek okait és elkerülésének létező megoldásait tárom fel, illetve új megoldást adok ennek kezelésére. Ez a 2. tézisem.

6. fejezet - Az önreferenciás holografikus mikroszkópia területét mutatom be. Elsőként mások eredményeit és a tudomány állását ismertetem, majd a 3. tézisemet teszem közzé, mely egy olyan új struktúrájú, egyszerű, stabil és nagyságrendekkel elérhetőbb önreferenciás holografikus optikai rendszert ismertet, aminek lényegi eleme a gyűrűs bifokális lencse. Ez a gyűrűs bifokális lencse nem csak technikailag jó megoldás, de a holográfiában jelenlevő kép-ikerkép problémájára is ad egy sajátos választ.

2. Holografikus képalkotás

Ezen fejezet segítséget nyújt a különböző téziseimet elhelyezni a holográfia világában azzal, hogy bemutassa a holográfia lényegét és területeit. Ez a fejezet a téziseim a holográfiában történő madártávlatú elhelyezését szolgálja. A különböző tézisek fókuszált bevezetői a tézisekhez tartozó fejezetek elején olvashatóak.

2.1 Holográfia koncepciója

A holográfia lehetősége a fényképezéssel szemben abban rejlik, hogy nem tárgyak képét – azaz annak 2D-s intenzitás vetületét- rögzíti, hanem a tárgyról jövő elektromágneses vagy egyéb hullám hullámfrontját, annak intenzitás és fázis információjával egyaránt. Az elektromágneses hullám fázisinformációját direktben nem lehet rögzíteni, viszont például hullámfrontszennozorral, vagy az interferencia jelenség révén, ami két egymással koherens hullámmal adott pontbeli fáziskülönbségét – azok időbeli állandósága esetén – intenzitás erősítésekben és kioltásokban mutat meg, igen. A holográfia ezt használja ki. Az általa rögzített interferogram a hologram ilyen módon tárolja a tárgyról jövő hullám intenzitás és fázis-eloszlását a rögzítés síkjában.

A holográfia általában – nem csak mint képalkotó módszer – olyan kétlépcsős eljárás, ahol az első lépcső a hologram megalkotásáról szól, a második pedig annak rekonstrukciójáról függetlenül attól, hogy mi alkalmazásának célja (1. ábra).

A z síkban fölvetett hologramhoz szükséges interferenciát a referencia és a tárgynyaláb szuperpozíciója adja:

$$E_{intf,z} = E_{R,z} + E_{O,z} , \quad (1)$$

ahol $E_{intf,z}$ az interferencia csíkrendszer komplex amplitudója, míg $E_{R,z}$ a referencia és $E_{O,z}$ pedig a tárgynyaláb komplex amplitudója szintén a z síkban.

Intenzitás-hologramnak, mint amilyen egy digitális hologram is, az intenzitása az alábbi módon írható fel:

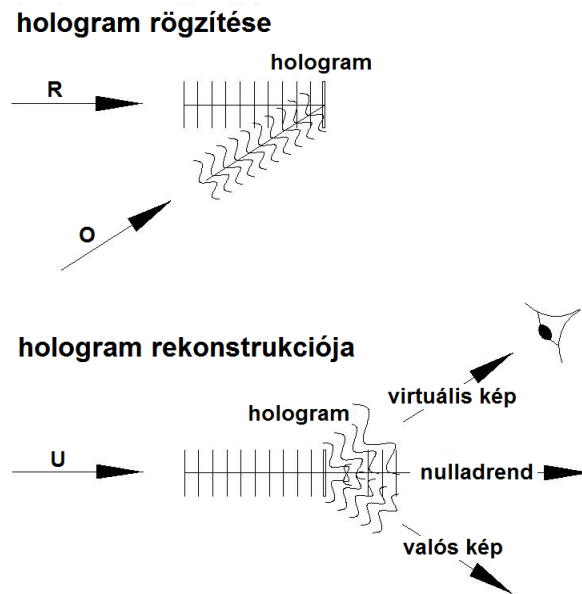
$$I_{holo,z} = (E_{R,z} + E_{O,z})(E_{R,z} + E_{O,z})^* = |E_{R,z}|^2 + |E_{O,z}|^2 + E_{R,z}^* E_{O,z} + E_{R,z} E_{O,z}^* , \quad (2)$$

ahol $I_{holo,z}$ a digitális hologram intenzitáseloszlása, * pedig komplex konjugáltat jelöl.

Torzításmentes hologram rekonstrukcióhoz egy, a referenciányalábbal megegyező rekonstruálónyalábot használnak, mellyel átvilágítják vagy megvilágítják a hologramot. A sík intenzitás-hologramon diffraktálódó rekonstruálónyalábból létrejön a nulladrend, a (valós) kép, és az ikerkép, ami virtuális kép. A rekonstrukció az alábbi módon írható fel:

$$E_{rek} I_{holo} = [E_{rek}|E_R|^2 + E_{rek}|E_O|^2]_{nulladr} + [E_{rek}E_R^*E_O]_{virtkép} + [E_{rek}E_RE_O^*]_{valkép}, \quad (3)$$

ahol E_{rek} a rekonstruálónyaláb hullámfrontja. Az összeg négyzetes zárójellezett tagjai rendre a nulladrendet, a virtuális képet, és a valós képet írják le.



1. ábra A hologram egy ismert referenciányaláb és a mérendő tárgynyaláb interferenciáját rögzíti. Az interferencia révén válik láthatóvá és így rögzíthetővé a fény fázisa. Ezen (transzmissziós) hologram rekonstrukciója a referenciányalábbal azonos rekonstruálónyaláb általi hologram átvilágítással valósul meg.

2.2 Holográfia területei

Mikor Gábor Dénes feltalálta a holográfiát, a lézert még nem ismerték. Így szűrt fényű higanygőz lámpával [1,2] kísérletezett. Tárgyak képalkotására, az elektronmikroszkóp felbontásának javítására szánta találmányát. A lézer feltalálásával a stabil és nagy koherencia-hosszú nyaláb elérhetővé vált, ami kedvezett a holográfia elterjedésének.

A holográfiát szerteágazó volta miatt is sokféle szempontból lehet osztályozni. Ilyen szempont lehet a felhasználási területe, a hologram fajtája, a holografikus elrendezés szerkezete, a hologramhoz használt hullám tulajdonsága vagy például az adatfeldolgozás módja.

Felhasználását tekintve lehet leképző és adatgyűjtő rendszer, amivel tárgyak képét, közegek hullámfront modulálását lehet rögzíteni vagy a környezet egy adott információját begyűjteni. Alkalmas 2,5 (2D-k több mélységben) – 3D-s leképzésekre [3, 4], lencse nélküli képalkotásra [5, 6, 7, 8], tomografikus képalkotásra [9], nyomkövetésre [10] és egyéb fizikai jellemzők mérésére, mint például a méret és a törésmutató [11, 12]. Megjelenítő rendszerként képek és mozgóképek 3D-s vizualizálását valósítják meg vele. Dolgoznak a holografikus TV megvalósításán [13, 14], és a hozzá szükséges hologramok 3D-s modellekből történő gyors numerikus generálási módszerein [15] is. Diffrakciós nyomatok készítésével holografikusan ábrázolnak körbejárható módon műkincset vagy akár épület vagy városrész tervet. De a holográfiát felhasználják adattárolásra [16, 17], titkosításra [18] és adatfeldolgozásra egyaránt.

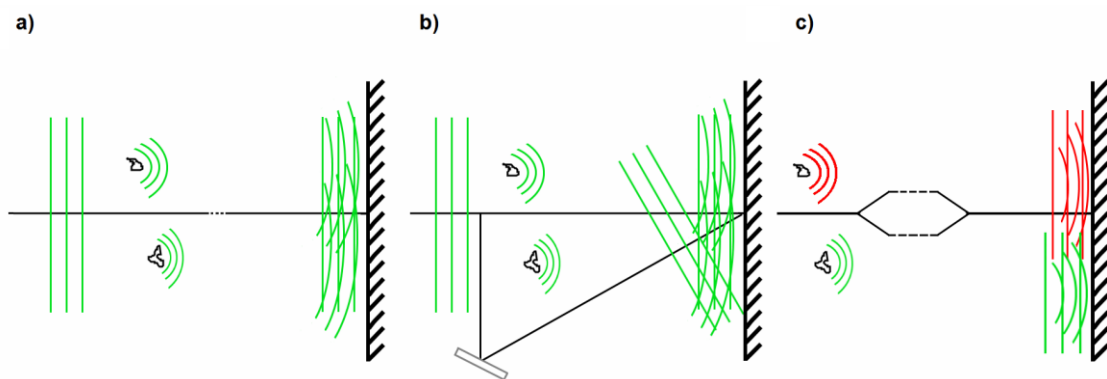
A hologram fajtáját [19] tekintve két nagy ágat említenék. Egyik a vékony hologramok [20] világa, a másik a vastag hologramok [21] világa. A vastag hologram a referencia és a tárgynyaláb interferenciáját térben rögzíti. Ezzel a vékony hologramhoz képesti információ többlettel nagyobb pontosságú, kisebb zajú (ikerkép nélküli) rekonstrukció válik lehetővé. A vékony hologram vastagsága az őt író hullám hullámhosszához képest elhanyagolható. Vékony hologram rekonstrukciója során ikerkép is megjelenik, ami zajt okoz. A vékony hologramokból van például sík és hengerré görbített is. Viszont a geometrián túl a hologram-információ tárolásának módja sem mellékes, hiszen megkülönböztethetünk digitális és analóg hologramokat, reflexiós és transzmissziós hologramokat, illetve intenzitás és fázis-hologramokat. Az intenzitás hologramok a rekonstruálónyaláb intenzitását modulálják, míg a fázis-hologramok fényvesztést nem okozva csak a fázisát modulálják annak. A hologramot ezen felül a tárolt információ szerkezetével is jellemezhetjük. Így említhetem meg például a Fourier, a Fresnel [22] vagy a Fraunhofer [23] hologramokat. A hologramokat felhasználás szerint lehet numerikusan generálni [24], mechanikusan gyártani vagy a hagyományos módon fényvel írni. A hologramok referencianyalábjukat tekintve in-line és off-axis jellegűek lehetnek. A hologramokat az általuk használt fény is jól jellemzi, hiszen ahogy a hagyományos képalkotásban a spektrum különböző színei más lehetőségeket rejtenek, úgy ez itt is megtalálható azzal a kiegészítéssel, hogy itt a felhasznált hullám koherenciája is lehetőségeket vagy korlátokat rejt magában. A hologramoknak két nagy, egymással nem vegyíthető rekonstrukciós módja van, a hagyományos fényvel történő és a numerikus, melyeket digitális hologramok esetén használnak.

Kutatásom szűk területét a holográfia ezen nem teljes, de széles spektrumán az alábbiak szerint határozom meg: *képalkotás* - azon belül *mikroszkópia*-, *digitális* holográfia, *multi-spektrális*, *illetve fluoreszcens* holográfia, és *in-line* jellegű holográfia. A következőkben ezeket fejtem ki.

2.3 Hagyományos és önreferenciás holografikus képalkotó elrendezések

A hagyományos holografikus leképző elrendezések három részből állnak. Első a *fényforrás*, második az opcionális *optikai rendszer* és a harmadik, *ami a hologramot rögzíti*. Mégis, ha a holografikus elrendezéseket szeretnénk kategorizálni, alapvetően a *fényforrás-tárgy kapcsolata*, illetve a *tárgy és referencianyaláb kapcsolata* alapján tenném meg.

Itt most három holografikus képalkotó elrendezést említek meg. Az első a Gábor-féle *in-line* rendszer [1, 2]. Ezt építette meg Gábor Dénes (2. a) ábra). Itt a megvilágításból jövő fény egy része szóródik, másik része törés nélkül áthalad a tárgyon. A szóródott fény alkotja a tárgynyalábot, a másik a referencianyalábot. Ezen rendszer azon módosulata, mikor a referencianyaláb nem transzmittál a mintán de interferál a tárgynyalábbal, *on-axis*-nak hívjuk. A második típusúnál, az *off-axis* elrendezésnél (2. b) ábra) egy *in-line* elrendezést kell elképzelni, melynek megvilágító nyalábjából a tárgy előtt kicsatolunk egy részt, melyet a tárgy után egy második referenciaként az *in-line* részhez keverünk, így mondhatni egy tárgy és két egymással szög bezáró referencianyaláb alkotja a hologram interferencia csíkrendszerét. Ennek előnye az ikerkép eltüntetésénél jelenik meg. A harmadik elrendezés, mikor a fény a tárgyról jön (2. c) ábra), akár azért, mert az sugározza, vagy azért mert reflektálja. Ilyenkor a tárgy fényéből lesz a tárgy és a referencianyaláb egyaránt. Ezeket *önreferenciás* holografikus elrendezéseknek hívják.



2. ábra a) Gábor-féle *in-line* elrendezés, ahol a megvilágítás tárgyon nem szóródó fénye alkotja a referencianyalábot, a tárgyon szóródó pedig a tárgynyalábot. b) *Off-axis* elrendezés: annyiban különbözik az *in-line* elrendezéstől, hogy a referencianyalábból ki van egy rész csatolva, és azt szög alatt keverik újra a többi nyalábhoz. c) *Önreferenciás* holografikus elrendezéseknél a tárgyról jövő fényből állítják elő a tárgy és a referencianyalábokat egyaránt.

2.4 Digitális holográfia – 2D-s hologram

A digitális holografikus képalkotásnak nagy előnye a hologram rögzítésének gyors eljárása [25], mely egy digitalizáló képérzékelővel történik, ezért nem kell laboratóriumban a hologramot hordozó foto-lemezt külön rögzíteni, mint a kezdeti hagyományos eljárásoknál. Hologram rögzítési szempontból viszont a digitális mintavételezés hátránya, hogy színmélységi és laterális felbontást tekintve jelenleg még gyengébb minőségű az analóg technikákhoz képest. A mintavételezés során számolni kell a Nyquist-Shanon kritériummal [26], viszont ez a hátrány sokszor eltöri a numerikus rekonstrukció adta lehetőségekhez képest, ami az automatizálhatóság és valósídejűség [27, 28, 29]. Az alapvetően gyengébb felbontás javítására különböző hatékony módszereket dolgoztak ki [30, 31, 32, 33].

A digitális kamerával rögzített hologramok vékony intenzitás hologramok. In-line rendszernél ebből következik a kép-ikerkép probléma, mely azt takarja, hogy kompenzáció nélküli rekonstrukciós eljárást használva a kép és az ikerkép egyaránt rekonstruálódik, és egymást zajként terhelik. Ez azért van, mert a hologram rögzítése során az interferencia csíkrendszer intenzitása rögzül csak, ami megegyezik a csíkrendszer hullámfrontjának és annak konjugáltjának szorzatával. Így a hologramban a nyaláb és annak „tükröképe” egyaránt rögzül, ami a rekonstrukciónál a kép és az ikerkép megjelenését eredményezi. Ennek a problémának a megoldására alkalmazták az off-axis rendszereket [34] hozzájuk tartozó rekonstrukciós eljárással; hoztak létre komplex hologramot fázistolás és több expozíció segítségével [35, 36]; illetve dolgoztak ki számos numerikus rekonstrukciós módszert [37].

Itt említeném meg, hogy színes képérzékelők színszűrőik révén alkalmassá váltak egyszerre több különböző színű hologram rögzítésére is.

2.5 Digitális holografikus képalkotást befolyásoló tényezők

Mint általában a mérés technikában, a holografikus képalkotásnál is a mérendő mennyiség meghatározza a felhasználandó mérőműszert.

A holografikus képalkotásban a mért minta szerkezete és átlátszósága meghatározza az optikai rendszer elrendezését. Ritkás és átlátszó közegeű minta esetén átnézeti holográfiát lehet alkalmazni, amire használható in-line és off-axis elrendezés egyaránt, míg nagy térkitöltési tényezőjű vagy átlátszatlan közegeű minta esetén csak reflexiós holografikus rendszer

alkalmazható, ami on-line és off-axis elrendezésekkel valósítható csak meg. A minta statikus, illetve lassan vagy gyorsan mozgó állapota az objektumról készíthető hologram-felvételek lehetséges számát határozza meg, ami elsősorban kihathat az ikerkép eltüntetési eljárásra, de szuperrezolúciós eljárásoknál -ahol több felvételt is készítenek egy tárgyról- is fontos paraméter lehet. A minta mérete, helye, esetleges emissziója kihat a holografikus képalkotásban használható nyaláb hullám- és koherencia-hosszára; meghatározza, hogy önreferenciás vagy hagyományos holográfia használható-e. A leképezendő tárgy mérete és a felbontási igények kihatnak a szenzor méreteire, és meghatározzák az optika feladatát, mely alapvetően az, hogy a hologramot illessze a detektorra.

2.6 Hologram rekonstrukció

A holografikus képalkotásnak ez a második lépcsőfoka, amikor a hologramban tárolt információt kinyerik. Szemléletesen megközelítve, ha a hologramon áteresztjük a referencianyaláb fényét, akkor az fölveszi többek között a tárgynyaláb térbeni eloszlását, és ezáltal úgy terjed tovább, mintha a tárgynyaláb volna. Amennyiben a rekonstruálónyaláb nem egyezik meg a hologramot létrehozó referencianyalábbal, a rekonstrukció nem alak és mérethűen fog lezajlani. Ebből előnyt is lehet kovácsolni, ha például cél a kicsinyítés vagy a nagyítás, illetve, ha a tárgy képének aberrált információját szeretnénk újabb aberrációval kikompenzálni a tárgy alakhű leképezéséhez.

A fizikai rekonstrukciós eljárások során egyszerűen a hologramot megvilágítjuk a rekonstruálónyalábbal. Numerikus rekonstrukció során mindezt szimuláció útján végezzük el, ahol különböző hullámterjesztési módszerekkel szimuláljuk a rekonstrukciós nyaláb hologramon történő diffrakcióját és terjedését. Ahogy a valós képrögzítés során egy síkba helyezük az ernyőt, úgy a numerikus rekonstrukció során is minden rekonstruált képsíkot külön-külön kell kiszámítani. A rekonstrukciós modelleket, melyek alkalmazása a hullámterjesztésnek a távolságától függ, a következő fejezetben fejtem ki.

A hologram rekonstrukciója nem csak a rekonstruálónyalábtól függ, hanem a hologramtól magától is. A hologram szerkezete meghatározza, a rögzíteni kívánt információ hiányosságait. A vastag hologramok képesek a teljes információt rögzíteni, ami hullámhossz szelektivitásban és diffrakciós irányszelektivitásban is megmutatkozik. A vékony és így a digitális hologramok pedig az információ veszteség hatása nyomán nem csak a tárgynyalábot, hanem annak a komplex konjugáltját is hordozzák, azaz a rekonstrukció során a tárgynyaláb hullámfrontja egyszerre összetart a valós képalkotás felé, illetve széttartó is, így hozva létre a virtuális (iker-) képet.

3. Optikai modellek

A színes DHM és az önreferenciás holografikus mikroszkóp egyaránt igényelt optikai tervezést, méretezést, illetve az optikai modellezések nélkülözhetetlen eszközök voltak a jelenségek megértésében. Bár a holográfia hullámterjesztésen alapul, a geometriai optika szerepe is legalább akkora volt, mint a hullámoptikáé. Ebben a fejezetben a felhasznált optikai háttéranyagot gyűjtöttem össze.

A fejezet végére, -mely az általános rész vége is egyben- a mérésekben többször használt USAF tesztárgy bemutatása kerül.

3.1 Geometriai optika

3.1.1 Geometriai optika elvi megközelítése

A geometriai optika a sugárátvezetés optikája, ami egy közelítés, ahol a hullámhossz nulla, azaz a fénynyaláb átmérőjéhez képest elhanyagolható, illetve a fény homogén, izotróp és lineáris közegben terjed. Alaptörvénye [19] kimondja:

1. A fény egyenes vonalban terjed.
2. Különböző közegek határain a fénysugár megtörve folytatja útját.
3. Különböző közegek határain a fény egy része visszaverődik. Ezt a tükörtörvény írja le, miszerint a beeső, a visszavert fénysugár és a beesési merőleges egy síkban fekszik, valamint a beesési és a visszaverődési szög egyenlő.
4. A fénysugarak függetlenségi elve érvényes, miszerint a tér egy pontján keresztül akárhány fénysugár haladhat keresztül egymás zavarása nélkül.
5. A fénysugár megfordíthatóságának elve érvényes, miszerint ha a fénysugár a tér egyik pontjából egy bizonyos útvonalon halad keresztül a tér másik pontjába, akkor a visszafele indított fénysugár ugyan azon az úton fog haladni.

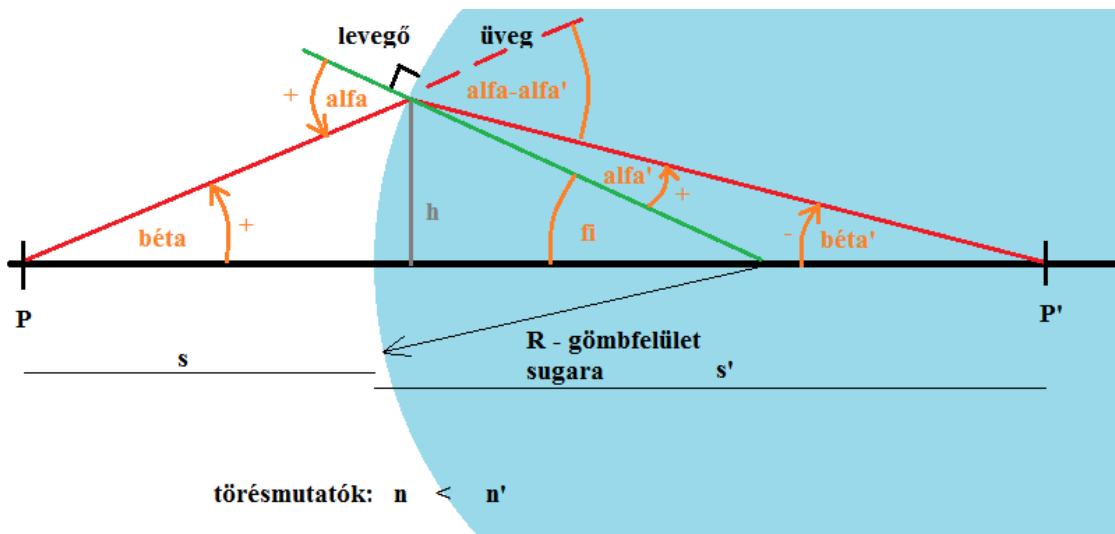
Két közeg határán a fénytörés jelenségét Snellius-Descartes törvénye az alábbiakkal írja le:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = \frac{c/n}{c/n'} = \frac{n'}{n}, \quad (4)$$

ahol α, α' rendre a beesési és a törési szög; c a fény vákuumbeli sebessége; n, n' pedig a homogén közeg törésmutatója. Ebből, a Snellius-Descartes törvényből vezetik le a gömbfelületű közeghatárok, lencsék képalkotását. Az alábbi 3. ábra a közeghatár két oldalán lévő metszéki távolságok kapcsolatát írja le (paraxiális közelítésben):

$$s' = \frac{n'}{\frac{n}{s} + \frac{n'-n}{R}} \quad (5)$$

ahol s és s' a kép és tárgyoldali metszéki távolságok.



3. ábra Fénysugár fénytörése gömbfelületű közeg határán a Snellius-Descartes törvénye alapján.

A közeghatár törőerejét (φ) ebből meg lehet kapni, amennyiben a képoldali metszéki távolságot a mínusz végtelenbe helyezzük. Ekkor a tárgyoldali metszéki távolság a rendszer tárgyoldali fókusz távolságával lesz egyenlő. A törőerőre hasonló eredményt kapunk, amennyiben gondolatban megfordítjuk az optikai rendszert. Ezek az alábbi módon írhatóak fel:

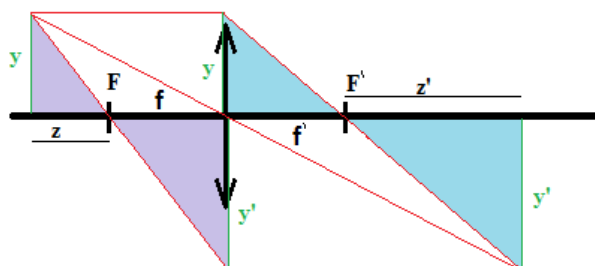
$$\begin{aligned} f' &= \frac{n'}{\frac{n}{-\infty} + \frac{n'-n}{R}} \\ \frac{n'}{f'} - \frac{n}{-\infty} &= \frac{n'-n}{R} \\ \varphi = \frac{n'}{f'} &= \frac{n'-n}{R} = \frac{n}{f} \end{aligned} \quad (6-8)$$

Ezeket továbbgondolva lehet eljutni a két gömbfelület alkotta vastag lencse fókuszának képletéhez (9. egyenlet), melyet a gyűrűs bifokális lencse tervezése során is alkalmaztam.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)}{n} \cdot \frac{1}{R_1 \cdot R_2} d_{lencse} \right) \quad (9)$$

Itt n a lencse anyagának törésmutatója, és R_1, R_2 pedig a lencse első és hátsó felületének görbületi sugarai, míg d_{lencse} pedig a lencse vastagsága, mely nulla értéke esetén vékonylencse kerül lemodellezésre.

Az optikai elemek paramétereinek ismeretében (4. ábra) a Newton-képlettel ($z_{kép} \cdot z_{tárgy} = -ff'$), illetve a belőle levezethető metszéki távolságokkal számoló lencsetörvény ($\frac{1}{f} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s}$) segítségével lehet a sugárátvezetést megvalósítani.



4. ábra Vékonylencsén való sugárátvezetés, melyből a Newton-formula is levezethető.

A fent levezetett vékonylencsés optikai rendszer modellezésében paraxiális képalkotás révén, a leképzésben résztvevő fénysugarak az optikai tengellyel kis szöget zárnak be, és tengelyközeli haladnak. Ilyenkor a szögfüggvények helyett a szögek ívmértékben vett nagyságát használhatjuk, és ideális leképzés feltételei teljesülnek. (Minden leképző rendszer az optikai tengely közelében ideális leképzést valósít meg.) Ideális a leképzés, amennyiben az optikai rendszer:

1. pontból pontba képez le
2. a tárgyter egyeneseit a képtér egyeneseibe képezi le
3. létezzon egy egyenes, amit a rendszer önmagába képez le (optikai tengely)
4. az optikai tengelyt tartalmazó („meridionális”) síkok önmagukba képződjenek le
5. az optikai tengelyre merőleges („szagittális”) síkok szagittális síkokba képződjenek le
6. a szagittális síkokban lévő alakzatok hasonló alakzatokba képződjenek le (azaz torzításmentesen)

3.1.2 Mátrix optika

Az ABCD mátrix optika [38] is paraxiális közelítés, ahol a rendszert leíró lineáris egyenletrendszert írjuk fel mátrixosan. Nevét onnan kapta, hogy ABCD értékű mátrixszal ki

lehet fejezni a sugarat módosító tényezőket. Az adott z távolságra szabad vákuum ($n=1$) térben való terjedés mátrixa:

$$\begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

míg f fókuszú vékony lencse mátrix modellje szintén $n=1$ esetén:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}.$$

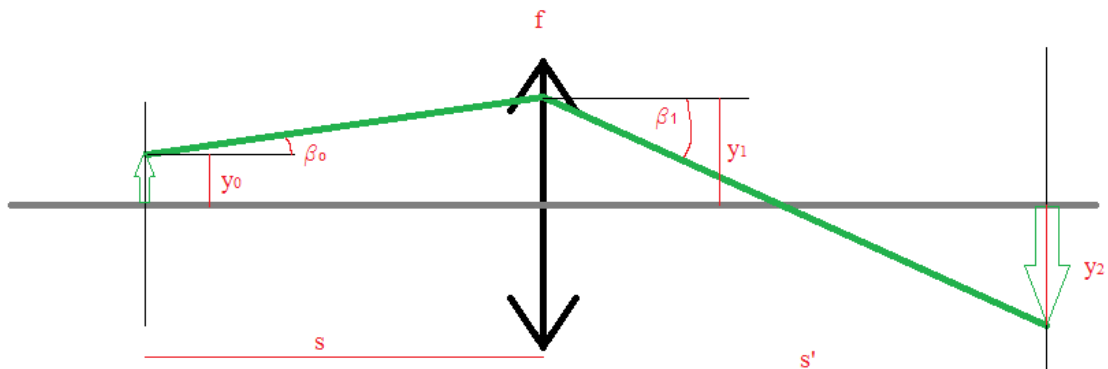
Az optikai rendszer átviteli függvénye (10. egyenlet) megkapható az optikai rendszer elemeinek és a szabad terekben való terjedéseknek mátrixmodelljeinek szorzatával.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{\text{átviteli}} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_n \cdot \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{n-1} \cdots \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_1 \quad (10)$$

Amennyiben egy adott sugár az optikai rendszeren való átvezetés utáni állapota (11. egyenlet) az ernyőn a kérdés, akkor az megkapható, ha a sugár kezdő állapotát (mely annak tengelytől való távolságával (y_0) és iránykoszínuszával -a paraxiális közelítés és a vákuum miatt- (β_0)-val jellemezhető) megszorozzuk az átviteli függvény mátrixával ($\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{\text{átviteli}}$).

$$\begin{bmatrix} y \\ \beta \end{bmatrix}_{\text{ernyő}} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{\text{átviteli}} \cdot \begin{bmatrix} y_0 \\ \beta_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

A következő 5. ábra két szabadtéri terjesztést és a közöttük történő lencsén való áthaladást szemlélteti.



5. ábra Mátrix optikában a sugárátvezetéshez szükséges paraméterek és jelölései.

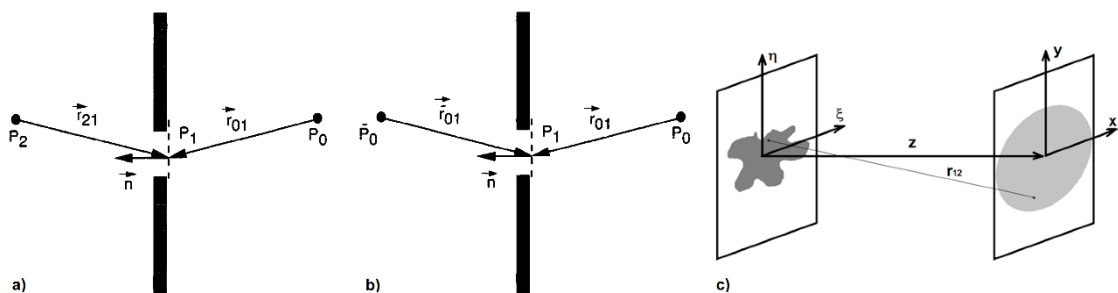
3.2 Hullámoptikai modellek

A hullámoptikai modellek a Maxwell egyenleteiből indulnak ki, melyek az elektromágneses teret írják le nagy pontossággal. Mint általában, ahol lehet, itt is cél az egyszerűsítés és a modellek használhatósági tartományainak leírása, melyet itt az elektromágneses tér definiálása révén érünk el. Modellünket az elektromágneses tér azon idealizált állapotára írjuk fel, melyre az alábbi állítások igazak: elektromágneses tér lineáris (azaz a különböző fényforrások fényei összeadhatóak), izotropikus (független a fény polarizációjától), homogén (permitivitása független a pozíciótól), nem diszpergáló (azaz hullámhossznak nem függvénye a törésmutató), és nem mágneses (a mágneses permeabilitás a vákumbeli permeabilitás értékét veszi fel). E peremfeltételekkel bíró hullámterjedés a skalár diffrakciós módszerrel leírható [39]. Ekkor az elektromágneses tér csak a komplex amplitúdóval ($E(x,y)$) van jellemezve az adott pontban, ami a fény intenzitás és fázis információját tartalmazza.

Hullámterjesztési módszerek szemlélete mögött a Huygens-Fresnel elv húzódik meg, mely kimondja, hogy:

1. Minden olyan pont, ahová a hullám elért, elemi hullámok kiindulópontjának tekinthető.
2. Egy későbbi időpontban észlelt hullámjelenséget ezen elemi hullámok interferenciája határozza meg.

Ahogy a Huygens-Fresnel elv a diffrakció jelenséget írja le, úgy a hullámterjesztés maga egy diffrakció számítási módszer, ahol egy adott síkban (tárgysík (ξ,η) , 1. sík) ismert a fény komplex eloszlása, melyet rés, rács, objektum, vagy egyéb apertúra is meghatározhat, és mely eloszlásból számolandó egy tőle adott távolságban levő síkban (képsík (x,y) , 2. sík) a komplex intenzitás eloszlás (6. ábra).



6. ábra a) Fresnel-Kirchhoff diffrakciós integrálformula kísérő ábrája. Pontforrás által megvilágított sík ernyő. [42] b) Rayleigh-Sommerfeld diffrakciós integrálformula kísérő ábrája. Pontforrás által megvilágított sík ernyő. [42] c) Fraunhofer és Fresnel diffrakciók alkalmazása kiterjedt objektumokra.

Mivel lineáris térről beszélünk, a teret alkotó pontok diffrakcióinak összege megegyezik a térben keletkező diffrakcióval. A következő két formula a tér egy pontja és egy felület közt adja meg a diffrakciós összefüggést.

1. Fresnel-Kirchoff diffrakciós integrálformula a következő:

$$E(P_0) = \frac{A}{i\lambda} \iint \frac{\exp(ik(r_{21}+r_{01}))}{r_{21}r_{01}} \left[\frac{\cos(\bar{n}, \bar{r}_{01}) - \cos(\bar{n}, \bar{r}_{21})}{2} \right] ds \quad (12)$$

2. Rayleigh-Sommerfield diffrakciós integrálformula az alábbi módon írható fel:

$$E(P_0) = \frac{A}{i\lambda} \iint \frac{\exp(ik(r_{21}+r_{01}))}{r_{21}r_{01}} \cos(\bar{n}, \bar{r}_{21}) ds, \quad (13)$$

Egy nem pontszerű, azaz kiterjedt és síkban elhelyezkedő komplex intenzitás-eloszlás tőle z távolságban (x, y) síkban alkotott diffrakciós képének közelítése a z távolságnak és a sík méretének az arányától vagy az átviteli függvényétől függően különbözőek lehetnek:

3. Fraunhofer diffrakciós közelítést akkor alkalmazhatunk, mikor a diffrakciós távolság közel a *végtelenben* van, azaz:

$$\left(\frac{\pi}{4\lambda} (\xi^2 + \eta^2) \right)_{max} \ll z \quad (14)$$

Ekkor a tárgysík $(U_2(x, y))$ diffrakciós képe a képsíkban az alábbi integrállal írható le:

$$E_2(x, y) = \frac{\exp(jkz) \exp\left(j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2)\right)}{j\lambda z} \times \iint E_1(\xi, \eta) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda z} (x\xi + y\eta)\right) d\xi d\eta \quad (15)$$

4. Fresnel diffrakciós közelítést akkor alkalmazhatunk, mikor a diffrakciós távolság véges, azaz:

$$\left(\frac{\pi}{4\lambda} ((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2)^2 \right)_{max} \ll z^3 \quad (16)$$

Ekkor a diffrakciós integrál alakja a következő:

$$E_2(x, y) = \frac{\exp(jkz) \exp\left(j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2)\right)}{j\lambda z} \times \iint \left\{ E_1(\xi, \eta) \exp\left(j \frac{k}{2z} (\xi^2 + \eta^2)\right) \right\} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda z} (x\xi + y\eta)\right) d\xi d\eta \quad (17)$$

ahol $k = 2\pi/\lambda$.

5. Munkám során az Angular Spectrum [40, 41] módszert használtam (mind a színes, illetve az önreferenciás holografikus mikroszkóp képeinek rekonstrukciói során), mely szögspektrum módszer különböző irányú síkhullámokra bontja a teret. Diffrakciós integrálformulája következőképpen írható fel:

$$E_2(x, y) = \iint E_1(\xi, \eta) h_{12,A}(r_{12}) d\xi d\eta, \quad (18)$$

ahol $h_{12,A}(r_{12})$ az 1. és a 2. sík közti impulzus válasz függvény:

$$h_{12,A}(r_{12}) = \frac{\exp(ikr_{12})}{r_{12}} \frac{z}{r_{12}} \left(\frac{1}{2\pi r_{12}} + \frac{1}{i\lambda} \right), \quad (19)$$

ahol $r_{12} = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}$, de amennyiben $r_{12} \approx r_z = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ -re cseréljük az átviteli függvényben, konvolúcióként az alábbi módon (20. egyenlet) írható fel a fenti 18. egyenlet:

$$E_2(x, y) = E_1(\xi, \eta) * h_{12,A}(r_z) \quad (20)$$

Fourier térben a konvolúció csak egy szorzás [42], így (21-22. egyenlet)

$$\mathcal{F}\{E_2(x, y)\} = \mathcal{F}\{E_1(\xi, \eta) * h_{12,A}(r_z)\} \quad (21)$$

$$\mathcal{F}\{E_2(x, y)\} = \mathcal{F}\{E_1(\xi, \eta)\} \mathcal{F}\{h_{12,A}(r_z)\}. \quad (22)$$

Az átviteli függvény kifejezhető $H_{\hat{a}tv}(u, v, w)$ -ként, ahol u, v, w Fourier térben az x, y, z irányokhoz tartozó térfrekvencia. Ekkor:

$$E_2(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{E_1(\xi, \eta)\} H_{\hat{a}tv}(u, v, w)\} \quad (23)$$

A 23. egyenletből látható, hogy az Angular Spectrum Method könnyen programozható, három lépcsős hullámterjesztési eljárás. Első lépés során a kezdeti sík Fourier transzformáció révén frekvencia térbe kerül át, második lépés annak az átviteli függvénnyel ($H_{\hat{a}tv}$) való szorzása, a harmadik lépés pedig a szorzat inverz Fourier transzformációja, mellyel visszajutunk a rendes térbe.

3.2.1 Számítógépes hullámterjesztési szimuláció

Számítógépes hullámterjesztési szimulációimat Matlab® programmal végeztem. Létrehoztam átviteli-, numerikus lencse, hologram generáló, és egyéb függvényeket, és ezen modulok segítségével építettem fel szimulációs és specifikus rekonstrukciós programjaimat.

4. DHM megvilágítása

Első tézisem egy a színes digitális holografikus mikroszkópba épített megvilágításról szól, ahol a mikroszkóp automata vízminőség ellenőrzés céljából épült meg. A megvilágítást, annak beépítési környezetét -ami a mikroszkóp optikai rendszere- és a tudomány állását -azaz mások által a színes holografikus mikroszkópiában alkalmazott megvilágításait- mutatja be a 4. fejezt.

4.1 Színes DHM alkalmazási területe

A víz nagy kincsünk, a biológiai élet nélkülözhetetlen alapeleme. Nem csak az egyedek szomját oltja, hanem fajok, társulások és egyéb közösségek élettere is. Szennyezettsége így rendszerszinten támadja az ökoszisztémát. A víz kémiai, fizikai és biológiai állapota egyaránt megváltozhat. Kiemelve párat, tudjuk, hogy a víz PH-ja, sótartalma, hőmérséklete vagy egy új domináns faj megjelenése hogyan van hatással az élővilágra, és ekkor még nem is beszéltünk a nehézfémekről, műtrágyákról, bányászati szennyezésekről, szennyvizekről melyek nem csak módosítják, de mérgezi is az adott vízhez kötött élővilágot.

A víz létfontossága miatt napjainkban követelmény annak folyamatos monitorozása, legyen szó természetes vizekről, vagy akár ivóvízről. A víz folyamatos figyelésével esetenként elkerülhetőek például tavak elmocsarasodása, halastavak halpusztulása, ökológiai egyensúly felborulása, de időben észlelhető az ivóvíz esetleges beszennyeződése is.

A monitorozás van, hogy csak a változást figyeli, de van, hogy az állapotok leírását rögzítését célozzák meg. A monitorozást sokszor laborokban adott időszakonként végzik melynek része az összetett mintaelőkészítés és a mikroszkópos vizsgálat. Ivóvíz tekintetében például Magyarországon Budapesten napi egyszer, vidéken heti egyszer végeznek biológiai mérést. Ezen mérés előkészítése abból áll, hogy adott térfogatú vízmintát leszűrnek szűrőpapírra, arról egy kis térfogatú vízbe visszamosás a mintát. Azt lecentrifugálják, s a sűrítmenyből raknak pipettával mintát tárgy és fedőlemez közé, melyben lévő algákat, férgek, törmelékeket mikroszkóp segítségével leszámolják.

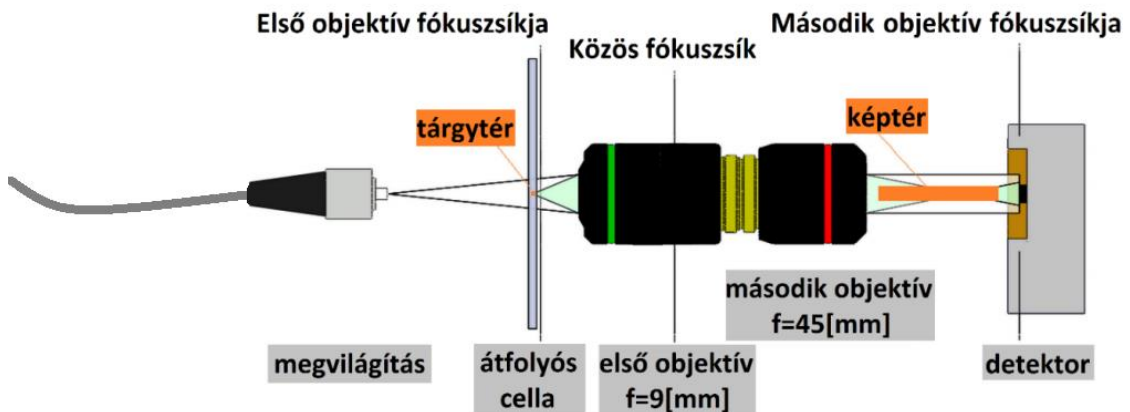
Laborok és vízművek ezen biológiai méréseit szeretném támogatni automata, valós idejű, folytonos mérésekkel a bemutatásra kerülő digitális holografikus mikroszkóppal. Holografikus mikroszkóp segítségével a preparálás vagy annak automatizálása elkerülhető azáltal, hogy

vastag térfogatot lehet vele egyszerre nézni. A minta egy adott keresztmetszetben szabadon áramolhat.

A biológiai sokféleség az élőlények méretében és színében is megnyilvánul. A bemutatásra kerülő mikroszkóp 5-40 μm -es algákra lett tervezve, és színes képet alkot, hogy az élőket könnyebben elválassza egymástól és a törmelékektől.

4.2 Színes DHM optikai rendszere

Az alkalmazott színes digitális *in-line* (2. ábra) holografikus mikroszkóp vázlatát az alábbi 8. ábra mutatja be.



8. ábra A színes digitális holografikus mikroszkóp optikai elrendezése.

A használt színes DHM optikájának a feladata, hogy a tárgy után keletkező interferencia csíkrendszert a detektorra illessze, azaz a hologram a Nyquist-Shanon tétel szerint kellő mintavétellel legyen rögzítve. Az optika két (Olympus LUCPLFLN 20x és Olympus PLN 4x) objektív összeforgatásával lett úgy megalkotva, hogy azok hátsó fókuszai egybe essenek. Így az optika fókuszról fókuszba képez át. A laterális nagyítása 5x. A második objektív fókuszában kap helyet az (EPIX SV9C10) kamera. Tapasztalati úton -az ikerképek miatt- előnyös volt az első objektív első fókuszsisíkján kívülre tenni a vizsgált térfogatot, tőle 0,6 mm távolságra. Ha a vizsgált térfogat optika felőli síkjában helyezkedik el a rögzített sík, akkor ami épp élesen van objektum, az szépen látszik, de ami kis terjesztési távolsággal rekonstruálható, arra az ikerkép minőségrontóan rátelepszik. Ha a vizsgált térfogat közepébe nézne az optika, akkor az attól a síktól egyenlő távolságra levő objektumok rekonstrukciós iránytól függetlenül egyszerre jelennének meg, amely objektum "sűrítés" szintén zavarja a képalkotás minőségét. A vizsgált térfogat térbeli definiálását egy 0,8 mm vastag átfolyós (Ibidi®) cella biztosítja.

A kamera Bayer-pattern-es, így a különböző színű hologramok egyszerre kerülnek rögzítésre. Mivel a Bayer-pattern különböző színű pixeleinek aránya pirosra, zöldre és kékre rendre 1:2:1, az azonos pixelszám elérése végett a zöld pixelszám felezésre kerül. Az optikai rendszer kompaktágából következik, hogyha a színes fényforrás egy pontból világít, az objektumok különböző színű rekonstrukciói (a megfelelő színnel történt de megegyező paraméterű rekonstrukciót (Angular Spectrum method) használva) azonos laterális pozíciókba kerülnek.

4.3 Elvárások a megvilágítással szemben

A holografikus mikroszkóp, amihez a megvilágítást illeszttem $1\ \mu\text{m}$ tárgyoldali laterális felbontással $1,22 \times 0,91\ \text{mm}^2$ keresztmetszetben $0,8\ \text{mm}$ vastag teret képes látni, (bár ha 2048×2048 -as pixelszámú a vizsgált területet –az FFT-t megsegítendő-, a tárgyoldali aktív keresztmetszet $0,717 \times 0,717\ \text{mm}^2$ -re csökken). Ebben a térfogatban levő objektumokról szóródó tárgynyaláboknak kell a referenciányalábokkal zöld (d) fényre számolva, $NA=0,36$ kúpban interferenciát adni a tárgytól $0,6$ - $0,14\ \text{mm}$ távolságra. Ehhez nagy *térbeli koherencia* megvilágításra van szükség. Továbbá, mivel a rekonstrukciós algoritmus rekonstruálónyalábja síkhullám, cél a *sík referenciahullám* elérése is. A referenciahullám hibája a rekonstruált kép minőségét is meghatározza.

Fényforrásokat áttekintve, a monokrómok jönnek szóba: LED-ek és lézerek, bár lehetne színes fényt is szűrni, de az itt most elkerülendő eljárás. LED fényforrásokat alkalmaznak holografikus mikroszkópiában, viszont koherencia hossza nem elég, hogy -például térfrekvencia szűrés vagy szuperrezolúció használata nélkül- azt itt alkalmazni lehessen. Így a kiválasztott fényforrás *lézer*, ami biztosítani tudja a kellő térbeli koherenciát.

Mivel az optikai rendszer a detektorának Bayer-patternes színkiosztása alapján három színű DHM, a megvilágításnak is a hozzájuk igazodó *három hullámhossz* kell tartalmaznia. A szenzorok színszűrői – mint az emberi szem csapjainak érzékenysége- szélessávú és spektrális átfedés is van köztük. Az ebből fakadó áthallás szellemképet eredményez, azaz egy adott színcsatornán a másik két szín hologramjai is meg fognak jelenni, igaz, kisebb intenzitással. Ezek a szellemképek azonban kezelhetőek [K1].

A tárgy különböző színcsatornán rekonstruált képei akkor rakhatók össze színes képpé, hogyha a tárgy egyazon nézetét tartalmazzák. Ezt nem csak az optikának, hanem a megvilágításnak is biztosítania kell. Azaz a különböző színű megvilágításoknak *azonos irányból* kell érkezniük a tárgyra.

Összefoglalva, olyan egyszerű és robusztus megvilágításra van szükség, ami a vizsgált térfogatban biztosítja a koherens, single módusú kvázi síkhullám megvilágítást három különböző hullámhosszon egyszerre, egyező nézetből.

4.4 Megvilágítások színes holográfiában

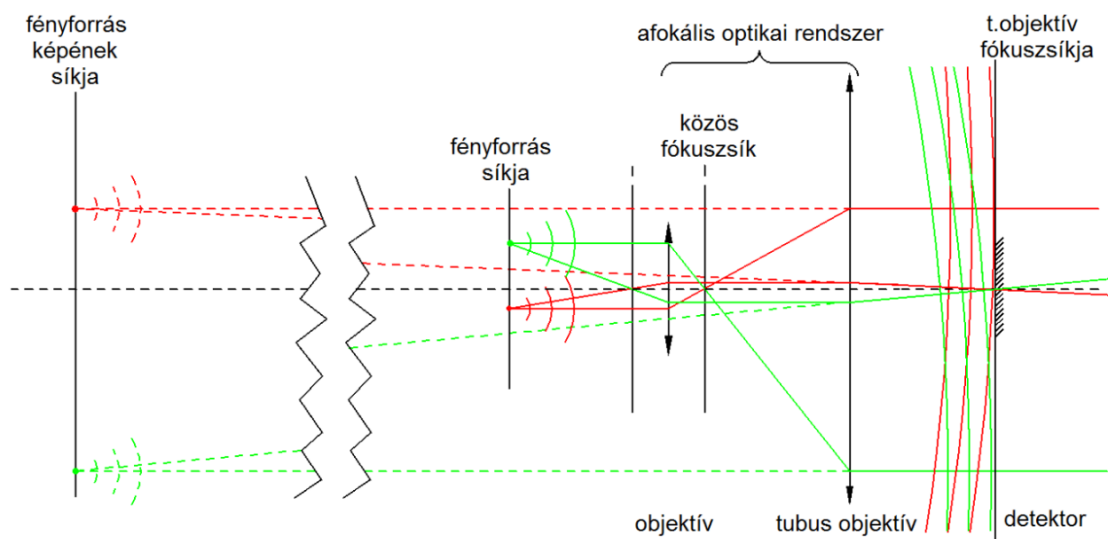
Sík referenciahullám előállítása megvalósítható kollimált lézerrel és nyalábtágítóval, vagy pontforrású lézer fényének kollimálásával, vagy esetleg ha a pontforrástól elég messze vagyunk, akkor a kívánt felületen a hullámfront síknak tekinthető. Ha egy referencianyaláb forrása és a tárgy közé aberrációval terhelt optikát (pl. nem megfelelő kollimátort vagy nyalábtágítót) helyezünk el, akkor az az in-line holografikus leképzésbe is aberrációt visz.

A single-módusú aberrációmentes hullámfront térfrekvencia szűréssel is előállítható, amit pinhole [48] és single-módusú optikai szál is el tud végezni. A pinhole, bár egyszerű optikai elem, könnyen piszkolódik, és pozíciójára sok esetben érzékeny. Mivel kapható single-módusú optikai szálba csatolt fényforrás, ezért a szál és a fényforrás pozíciója gyárilag biztosított, és egymáshoz képest fixált így az egymáshoz képesti pozicionálásukról nem kell gondoskodni, ezért optikai szállal könnyebb dolgozni.

A színes digitális holográfiában a fények egytengelyűsítését, azaz összevezetését dikroikus tükrökkel [44, 45] vagy szálcsatolókkal [46, 47] oldják meg. A dikroikus tükrök előnye, hogy nem okoz számottevő fényvesztést használatuk, viszont kiterjedt méretük, nagyobb felületük aberrációt vihet a rendszerbe. Amennyiben a dikroikus tükrök membrán, még a rezgésekre is jóval érzékenyebb. Az egymáshoz képest különböző módon torzuló megvilágítások szín aberrációt visznek a színes rekonstrukcióba, ezzel akár felbontás-vesztést eredményezve, ami a mikroszkópia területén különösen hátrányos. Az optikai szálcsatolók bár stabilabb üzeműek, nagyobb fényvesztéssel rendelkeznek a dikroikus tükrökhöz képest. Hatásfokukat az tovább rontja, ha kettőnél több különböző fényt akarunk összevezetni, akkor több szálcsatolót is kell alkalmazni sorba kötve. Kísérlet során fotodetektorral kimértem, hogy három (vörös, 650 nm; zöld, 532 nm; kék, 406 nm) különböző hullámhosszú fény összevezetésére két (Thorlabs FCMM50-50A-FC) szálcsatolót sorba kötve a hatásfok 8% alatti volt az először becsatolt vörös és zöld fényre. Bár az optikai szál végét könnyebb pozicionálni, mint sok dikroikus tükröt összehangolni, hatásfoka könnyen elmaradhat tőlük, ráadásul az optikai szálak hullámhosszfüggése is gátja lehet az optikai szálcsatolók használatának.

4.5 Új megvilágítás

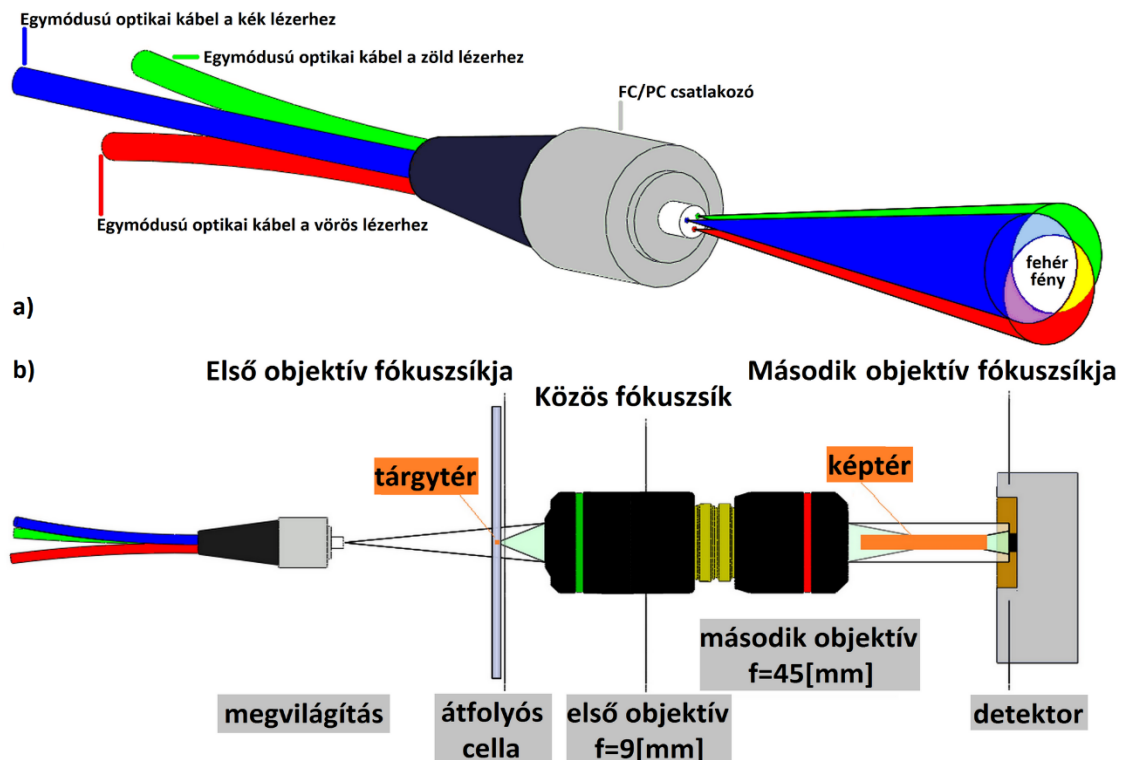
A referencia síkhullám optika általi aberráció nélküli megvalósítását a pontforrás távolba helyezésével valósítottam meg. Mivel a távolsággal négyzetesen csökken a fényerő, a fényforrás teljesítménye is meghatározhatja, hogy milyen messzire lehet azt helyezni. Annak ismeretében, hogy ha az aberrációval terhelt optika egyaránt a fényforrás és a tárgy után, de a szenzor előtt helyezkedik el, akkor az általa a tárgy és a referenciahullámokon megjelenő azonos aberrációk „kioltják” egymást, elmondható, hogy a megépített in-line rendszer leképzési hibái elvi szinten minimalizálva vannak. A tárgy után elhelyezkedő optikának olyan pozitív hatása is van, hogy a megvilágítást csak virtuálisan, de messzebb helyezi, így a fényteltjesítmény nem csökken a hologram síkjában úgy, mintha valóban olyan messzire került volna a fényforrás. A jelen rendszerben a megvilágítás 70 mm-re van elhelyezve a tárgytól, ami azt jelenti, hogy 25x-ös longitudinális nagyítással számolva a szenzor síkjától virtuálisan 1750 mm-re kerül, amely virtuális távolság meg is egyezik a hullámfront görbületi sugarával a szenzoron, melynek átfogója 7,6 mm. Ennél a megvilágítást természetesen lehet messzebb is vinni, és akkor a hullámfront még jobban közelíti a síkhullámot. Az alábbi 9. ábra az optikai rendszernek a szálakra gyakorolt hatását mutatja meg.



9. ábra Az új megvilágítás a megépített színes digitális holografikus mikroszkóp optikai rendszere által leképezve.

Fényforrásnak single-módusú szálba csatolt lézereket választottam, melyek színenként biztosítják az egy módusú Gauss-nyalábokat. A fényforrások hullámhosszai: 406 nm, 532 nm és 650 nm)

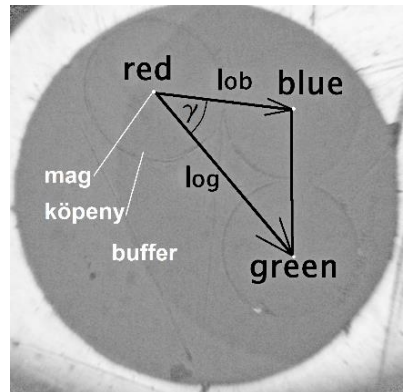
A fényforrások fényeinek összevezetése Mátyás- királyosan valósult meg, azaz nincs optikai elem, ami összevezetné a fényeket, szimplán az optikai szálvégek, melyekből kicsatolódnak a megvilágítás fényei, kerültek szorosan egymás mellé kvázi egy pontba. Ezt egy saját tervezésű és egyedi gyártású szálkötegelővel értem el. Lényege abban áll, hogy a kívánt hullámhosszúságú single-módusú optikai szálak bemeneti végeire sima FC/PC csatlakozókat illesztettem, a kimeneti végeiket viszont egy közös FC/PC csatlakozóba foglaltam bele, mint ahogy a következő 10. ábra is látható. Ez a piacon levő bi/trifurcated fiber bundles-től abban biztosan eltér, hogy single-módusú szálak vannak alkalmazva, és a különböző single-módusú szálak a különböző fényforrások hullámhosszaira vannak tervezve.



10. ábra a) Új színes megvilágítás holografikus képalkotó berendezések számára. A különböző színre tervezett single-módusú optikai szálak egy szálcsatlakozóban vannak szorosan egymás mellé kötegelve. Kis fényvesztésű és jó minőségű stabil hullámfrontú Gauss-nyalábokat biztosít. b) A megvilágítás beépítve.

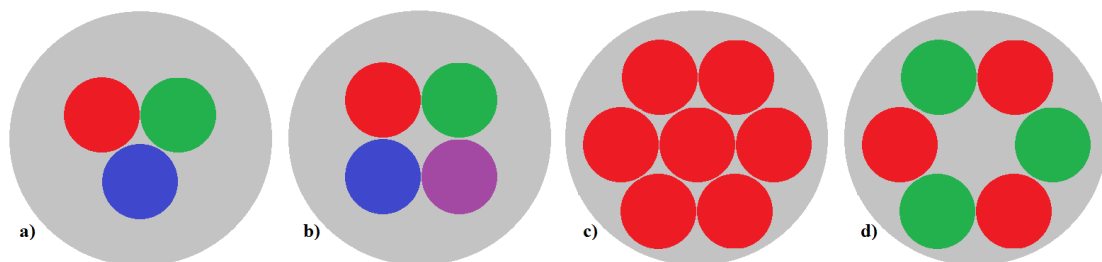
Az az elvárás, hogy a tárgyat egy irányból világítsuk meg, is teljesül. Ismerve az optikai szálak köpenyeinek külső átmérőjét, ami $125\ \mu\text{m}$, a pontforrások legkisebb távolsága is annyi kell, hogy legyen, s ismerve a csatlakozó belső átmérőjét, a maximális távolság nem lehet nagyobb $250\ \mu\text{m}$ -nél. Mivel a tárgy $70\ \text{mm}$ -ről van megvilágítva, a különböző pontforrások $0,1^\circ$ - $0,2^\circ$ közötti irányeltéréssel világítják meg a tárgyat, ami a leképzés szempontjából azonos nézetű képeket eredményez. Ez ahhoz hasonlítható, mintha egy ember a jobb és bal szemével 40 - $20\ \text{m}$ -re levő tárgyat nézne. A megvilágítást is tartalmazó optikai rendszerről szabadalom [S1] is született. A megvilágítást megrendelésre a FONET KFT készítette el. Egy legyártott példány

csatlakozójának kimeneti felületét, a három szálvéget az alábbi fénykép (11. ábra) mutatja be, melyet egy 200x-os szálvégmikroszkóp segítségével fotóztam le.



11. ábra A színes digitális holografikus mikroszkóp megvilágításának végződése. A fényképen látható az optikai szálvégek elhelyezkedése, és így azok távolságai mérhetők. A köpenyek átmérője 125 μm .

A megvilágítás e koncepciója nagy variabilitást is megenged, felhasználástól függően sokféle módon össze lehet állítani, például négy színcsatornás kamerák esetén a megvilágítás hullámhosszainak a száma is bővíthető, ahogy például az alábbi 12. ábra mutatja.



12. ábra a) Az új színes megvilágítás szerkezete. A különböző hullámhosszra tervezett single-módusú optikai szálak egy szálvégcsatlakozóban helyezkednek el szorosan egymás mellett. b) Ezt több, különböző hullámhosszra tervezett optikai szállal is össze lehet rakni. c) Vannak holografikus elrendezések (mint például szuperrezolúciót megvalósítóak), amelyeknél előnyös azonos, de egymás mellett elhelyezkedő optikai szálakból megalkotni a megvilágítást. d) Egy vegyes kivitelű elrendezés.

Azonos hullámhosszú, de különálló fényforrások is rendelhetők a szálakhoz (12. c) ábra), melyet akár szuperrezolúciós eljárásokhoz is lehet használni, s a szálak variálásának még ezernyi módja és célja is lehet.

4.6 Összefoglaló

A bemutatásra került, egy szálcsatlakozóban végződő optikai szálak, mint koncepció, lehetőséget ad színes holográfiában kívánt minőségű, stabil, iparban is használható színes megvilágítást biztosítani. Az így megépített színes single-módusú Gauss nyalábokat biztosító

megvilágítást én alkalmaztam először színes holográfiában. Azt gondolom, hogy a koncepció ezen a szinten végkifejlett állapotába érkezett, de felhasználásától függően tág határok közt variálható tovább, ami csak előnyére válik.

1. Tézis

Új megvilágítást dolgoztam ki színes digitális holografikus képalkotás számára. Bebizonyítottam, hogy különböző hullámhosszokra tervezett single-módusú optikai szálak kimeneti végeiknek egy optikai szálcsatlakozóba való egymással párhuzamos és szoros illesztésével színes holográfia számára robusztus, könnyen kezelhető és pozícionálható, tisztántartható és különböző hullámhosszú single-módusú Gauss-nyalábokat biztosító megvilágítás építhető egynézetű képalkotáshoz. Az optikai szálak önálló szabad végeikre kívánt fényforrások illeszthetők. A megvilágítás szabadalmaztatásra került, és alkalmazást nyert egy forgalomba állított színes digitális holografikus mikroszkópban.

Kapcsolódó szabadalom, folyóirat publikáció és konferenciaelőadások: [S1, F1, K1, K2]

5. Numerikus rekonstrukció

Az új megvilágítást beépítettem a meglévő és már bemutatott színes digitális holografikus mikroszkópba. Az immáron új rendszerrel (10. b) ábra) felvett hologramok numerikus rekonstrukciója során képszerű diffrakció keletkezik, melyet új módszerrel eliminálok. A hiba okairól, mások jó és a saját új megoldásomról -ami a második tézisem- szól az ötödik fejezet.

5.1 Színes DHM rekonstrukciója

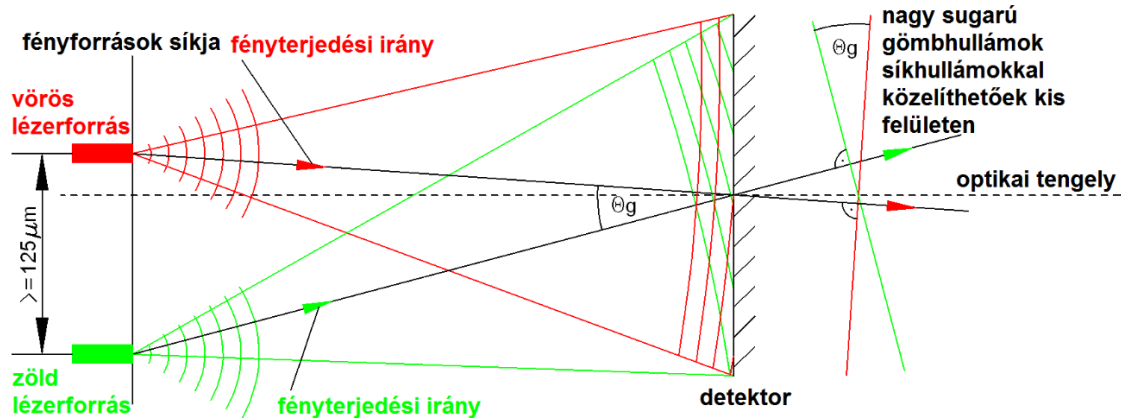
A színes DHM egyszerre három különböző hullámhosszon rögzíti az adott tárgy hologramjait egy Bayer-pattern színszűrő-kiosztású kamera segítségével. A színes DHM-mel felvett hologramokat egyesével Angular Spectrum (33. oldal) method-dal rekonstruálok. Ez a numerikus eljárás, ahogy a 3.2-es fejezetben bemutatam, sík rekonstruálól hullámot használ. Az új megvilágítást használva a színesatornák rekonstrukcióinak egymásra helyezése után az alábbi probléma merült fel: a tárgy éles rekonstrukciói nem fedik egymást (14. a,c) ábra), kicsit más laterális pozícióba kerültek, így a színesatornák képeit pozícionálni kell, hogy a kromatikus aberrációt elkerüljük. A leképzésből -tehát nem a laterális pozíciókból fakadó- kromatikus aberrációk nem jelentkeztek, mely egy cég két, színre kompenzált objektívjének használatára vezethető vissza.

A színesatornák objektumainak fedésbe hozását sok esetben x-y eltolással oldják meg, de ez az eljárás a térfogati holográfiában minden rekonstrukciós síkhoz más mértékű eltolást igényel. Ezért Laborunk más eljárást választott, melyet röviden az alábbiakban ismertetek.

A rekonstrukció során kiindulási alap az alkalmazott Angular Spectrum Method, mely numerikus eljárás alaptól a detektor síkjával párhuzamos sík numerikus rekonstruálól hullámot használ, s amely eljárásnak csak a hullámhossz paraméterét változtattuk a hologramot író hullám hullámhosszától függően. A színes DHM optikai rendszeréhez illesztett új megvilágítás elődje egy egy optikai szálba csatolt színes megvilágítás [K1]. Az előd alkalmazása esetén, a rekonstrukció során a különböző színű rekonstrukciók laterálisan egymásra kerültek. Így egyértelmű, hogy az új megvilágítás okozza a rekonstrukciók laterális pozíciókülönbségeit. Itt említek meg még egy tapasztalatot, miszerint, ha a pontforrás megvilágítás laterális pozíciója változik, akkor a rekonstruált kép laterális pozíciója is megváltozik annak ellenére, hogy a tárgy, optika és a detektor egymáshoz képest fix maradt. A régi megvilágítás laterális pozíciójának változtatásával a színesatornák rekonstrukciói bár laterálisan elmozdultak, de végig fedésben

maradtak. Ha az új megvilágítás laterális pozícióján változtattam, akkor egy tárgy különböző színű rekonstrukciói azonos mértékben mozdultak el, azaz a relatív távolságuk nem változott. Az utolsó empirikus észrevételem pedig, hogy minél nagyobb a rekonstrukciós távolság, annál nagyobb a színcsatornák közti laterális pozíciókülönbség, és a kapcsolat lineáris.

Ezek alapján a laborunkban kimutattuk, hogy a megvilágítás annak ellenére, hogy messze van, az általa adott síkkal közelíthető referenciahullám nem tekinthető a detektorral párhuzamosnak, azzal szöveget zár be. *Ez, a detektorral szöveget bezáró referenciahullám a **ferde megvilágítás**.* Ez akkor keletkezik, ha a fényforrás nincs az optikai tengelyen. Egy színcsatornás „szürke” hologram esetén ezzel nem szoktak foglalkozni. Viszont több színcsatornás hologram esetén, mint amelyet a színes DHM is produkál, már a különböző hullámhosszú sík referencianyalábok egymáshoz képesti ferdesége az, ami vizsgálat alá kerül. Az új megvilágítás által adott síkkal közelíthető különböző hullámhosszú referenciahullámok egymással is szöveget (Θ) zárnak be, mint ahogy a következő 13. ábra is mutatja két szín esetén, ahol a tárgy a detektortól már a virtuális távolságban van, ott ahova az optika helyezi, mely optikával nem zsúfoltam a képet.



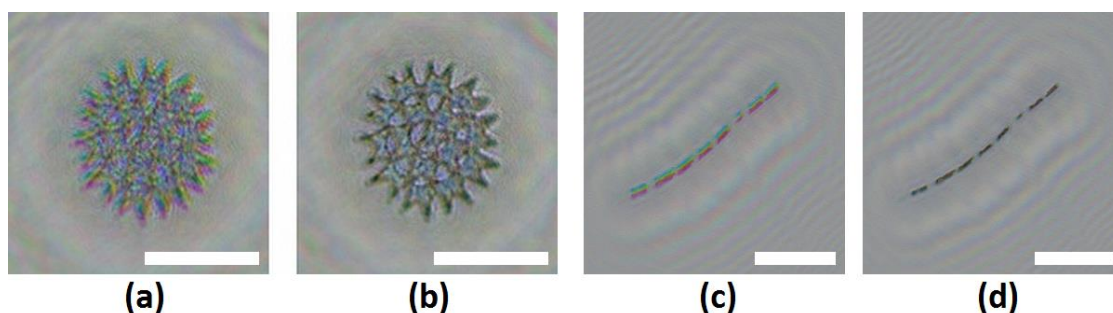
13. ábra A pontforrások fénye a detektortól való nagy távolságuk miatt sík referenciahullámként közelíthetők. A pontforrások egymástól való távolsága miatt a sík referenciahullámok szöveget zárnak be egymással.

Abból, hogy ha a megvilágítások egy pontból indulnak ki, függetlenül a forráspont laterális helyétől nem lép fel kromatikus aberráció, sejtethető, hogy a kromatikus aberrációt a referenciahullámok egymáshoz képesti – relatív- ferdesége okozza az új megvilágításnál, azaz nem kell megállapítani a különböző hullámhosszú referencianyalábok detektor síkjával bezárt szöveget, csak az egymáshoz képest bezárt szögüket, Θ -t. *Ez a Θ szög a **relatív ferdesége a megvilágításnak**, ahol a viszonyítás egy a szabadon választott sík referenciahullám.*

Laborunkban bebizonyítottuk [F1], hogy ha a numerikus rekonstruálónyalábok hasonló relatív Θ szöveget zárnak be egymással, mint a referencianyalábok, akkor a kromatikus aberráció megszűnik. *A kromatikus aberráció elkerülése céljából a numerikus rekonstrukció során a*

numerikus rekonstruáló síkhullámok (egymáshoz képesti kívánt állapot elérése céljából való) abszolút rendszerben történő megdöntését **tílt-kompenzációnak** hívjuk. A különböző hullámhosszú rekonstruáló síkhullámok egymáshoz képesti relatív szögei a **relatív tílt**. Tílt-kompenzáció esetén önkényesen kiválasztható például a vörös referencianyaláb, melyhez a relatív tílt ismeretében igazíthatóak a zöld és a kék numerikus rekonstruáló síkhullámok ferdeségei (Θ_g , Θ_b), de mind a három rekonstruálónyaláb együtt tetszőlegesen is dönthető a relatív tílt megtartásával a nélkül, hogy kromatikus aberráció jelentkezne.

A következő 14. ábra két algatelep eredeti és tílt-kompenzációval javított rekonstrukcióját mutatom be.

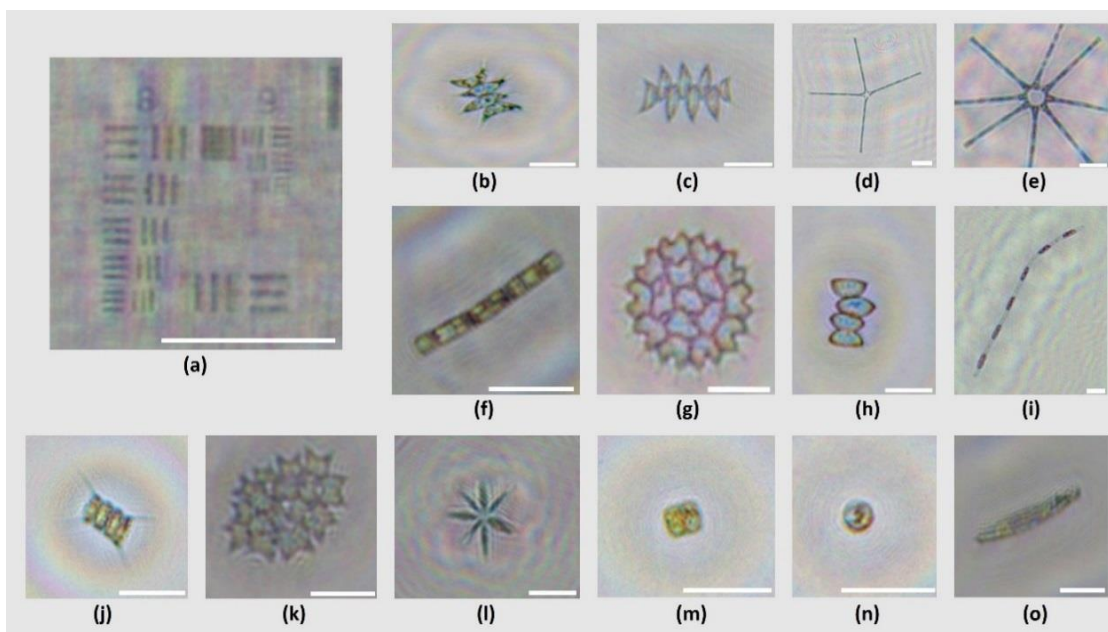


14. ábra Tílt-kompenzáció nélküli (a, c) és a kompenzációs (b, d) hologram-rekonstrukciók. Ahol (a, b) *Pediatrum* algatelep, és (c, d) pedig fonalas *Melosira*. (A méretvonalak hossza 20 μm .)

A rekonstrukciók a színes digitális holografikus mikroszkóp képminőségét mutatják be. A 14. b) ábra képen az alga színi információja is megjelenik, míg a d) képen ez kevésbé szembeötlő. A tílt-kompenzációs rekonstrukciók a különböző színű hologramok összeillesztési eljárásának gyakorlati alkalmazhatóságát mutatják be. A tílt-kompenzációs eljárás a különböző színcsatornák laterális pozícióinak megfelelő illesztését szolgálták, a színhelyességre nincs hatással.

5.1.1. A megépült színes DHM képei

A megépített színes holografikus mikroszkóp által rekonstruált képeket mutatom be, melyek nagy felbontású tesztárgyról, illetve algákról készültek. A rendszer képalkotását ismerve olyan berendezés épült, ami 1 μm felbontású színes képet képes alkotni 0,8 mm mély cellában szabadon úszó objektumokról. Az alábbi 15. ábra rekonstruált objektumokat mutat be.



15. ábra A DHM-el készített színes képek algákról. USAF tesztárgy holografikus képe (a) és színes rekonstrukciók algákról. Scenedesmus (b, c, h, j), Asterionella (d, e), Melosira (f, i), Pediatrum (g, k), Ankistrodesmus (l), Thalassiosirales (m, n), és Bacillariophyceae (o). (A méretvonalak hossza 20 μm .)

5.2 Színes rekonstrukció numerikus problémája

A digitális hologram-rekonstrukció másik velejárója lehet a hologram széle által keletkező diffrakciós zaj (16. d) ábra). Ez mondhatni a képmezőt csökkenti le. Ez hagyományos fényel történő fizikai rekonstrukció, illetve numerikus rekonstrukció esetén is jelentkezhet. Ezt a kép széle által előidézett intenzitás vagy fázis ugrás okozza, hagyományos képnél azzal, hogy a kép véget ér.

A képszéli diffrakciós zajt többféleképpen is el lehet tüntetni. Például egyszerűen rekonstrukció után csökkenteni a képmező méretét mező rekesszel, hogy az ne legyen benne. Ez bár egyszerű megoldás, a mérési térfogatot jelentősen csökkentheti. Numerikus eljárásoknál maradva, le lehet generálni a diffrakciós zajt, és a rekonstrukcióból ki lehet vonni. Ezen megoldás eredménye nagyban függ a helyes diffrakciós zaj generálásától. Széles körben elterjedt megoldás a Zero padding, ahol a hologramot körbekerítik egy kinullázott fekete területtel, és a fekete terület meg a hologram között egy simított átmenetet képeznek az intenzitás és fázisugrás elkerülése végett. Ez két okból hátrányos, egyrészt mert megnövelve a hologram méretét nagyobb számítási kapacitást igényel a rekonstrukció, másrészt pedig az átmenetnek is lesz diffrakciós zaja, még ha kisebb is, mint az ugrásnak.

A színes DHM rekonstrukciója során, a numerikus hullámterjesztéskor Fast Fourier Transformat (FFT-t) használunk. Az FFT numerikus algoritmus úgy tekint a kép szélére, mint ahol újra a kép kezdődik. Ez olyan, mintha egy végtelen tér ki lenne tapétázva végtelen számú egymást érő ugyanolyan képpel. Így, az él menti diffrakcióra okot adó éleket a kép aljának és tetejének, illetve a jobb és bal oldalainak találkozásai adhatják. Azaz, ha a kép alja és teteje megegyezik intenzitásban és fázisban, akkor a végtelen képen vízszintesen nincs él, s nem lesz él menti diffrakció, s ugyanígy a jobb és bal oldalainak egyezősége határozza meg, hogy van-e függőleges él menti diffrakció. Tehát például egy homogén intenzitású és homogén fázisú digitális kép numerikus terjesztésekor a kép szélein nem keletkezik diffrakciós zaj. (Ugyanilyen valós kép hagyományos, fényvel való terjesztésénél viszont keletkezne diffrakció az éleken.) Az FFT mind a hologram, és mind a numerikus rekonstruálónyaláb komplex amplitúdójának eloszlása és a frekvencia tere közti transzformációt elvégzi. Így akár a hologram szélén, akár a numerikus rekonstruálónyaláb szélén van ugrás, az képszél menti diffrakciót okoz a rekonstrukcióban.

Ebből látható, hogyha a hologram háttérintenzitása homogén, akkor az már részlegesen gátja a numerikus rekonstrukció során a diffrakció keletkezésének.

Az új megvilágítás okán bevezetésre kerülő tilt-kompenzáció fázis inhomogenitást – rács mintázatú eloszlást – okoz a numerikus rekonstruáló síkhullám fáziseloszlásában. Ez a ferdeség igen könnyen okoz fázisugrást a kép szélén, ami generálja a képszéli diffrakciót. Ezt a fázisugrást mutatja a 16. b) ábra, ahol egy végtelen tér egy kép fáziseloszlásával kitapétázott darabja látható, ahol a fehér vonal a kép határát jelzi. Ezen fázisugrást el lehetne úgy kerülni, hogy például a képet úgy vágjuk meg, hogy a kép alját és a kép tetejét összeillesztve folytonosság legyen a mintázatban, mint amilyen folytonosság a 16. c) ábrán is látható az élek (fehér vonalak) mentén. Ezen képvágás bár a diffrakciót el tudná tüntetni, de a képméret elég változó lenne, ami nem jó egy ipart célzó berendezésben, illetve az FFT kettő hatványú pixelszámú oldalhossz esetén dolgozik gyorsan, így például a 2048x2048-as képméret nem lenne biztosítható. Továbbá a különböző színcsatornákat különböző méretűekre kellene vágni az eltérő tiltú rekonstruáló síkhullámok miatt, ami a képek összeillesztésénél okozna újabb feladatot.

5.3 Képszéli diffrakció elkerülése a DHM-ben

Lehet-e a képszéli, numerikus rekonstruáló ferde nyaláb okozta fázisugrást a ferdeség módosításával (kerekítésével) eltüntetni, hisz a ferdeségnek vannak olyan állapotai, mikor a tapétázott mintázatban a folytonosság teljesül (16. c) ábra)?

Digitális hologram rekonstrukciója során első lépésként (24. egyenlet) az intenzitás hologramból vissza kell állítani a hullámfront komplex amplitúdóját ($E(x, y, 0)$), amely úgy érhető el, hogy az intenzitás hologramot, amit a detektor rögzít ($I(x, y, 0)$) meg kell szorozni a rekonstruálónyaláb ($Rek(x, y, 0)$) komplex hullámfrontjával.

$$E(x, y, 0) = I(x, y, 0) \cdot Rek(x, y, 0) \quad (24)$$

A rekonstruálónyaláb egy homogén és egységnyi intenzitású, a tilt kompenzáció után egy ferde hullámfrontú nyaláb (25. egyenlet), melyet a rögzített hologram síkjában ($z=0$) így írhatunk fel:

$$Rek(x, y, 0) = 1 \cdot e^{i\Phi} = e^{i(k_x x + k_y y)} \quad (25)$$

Ahol k_x és k_y a hullámszám vektor x , illetve y irányú komponense. Amennyiben a sík rekonstruálónyaláb hullámfrontja párhuzamos a hologram síkjával, akkor a hullámszám vektor értéke nulla.

Numerikus rekonstrukciók, mint a bemutatott rendszer által használt Angular Spectrum method, előszeretettel alkalmaznak gyors Fourier transzformációt, mely végteleníti a vizsgált síkot annak ismétlődő összefüggő tapétázásával.

Az így egymás mellé kerülő síkrészek közt könnyen előfordulhat intenzitás vagy fázisugrás, ami élként jelentkezik és diffrakciót okoz. Mivel a holografikus rendszer biztosítja a sík és homogén kivilágítást, csak a fázisugrás vihet be élképződést a végtelenített térbe. Általános ferde rekonstruáló síkhullám esetén ez be is következik, ha nem teljesülnek az alábbi 26-27. egyenletek.

$$\Phi(x, y) = \Phi(x + w, y) \quad \text{és} \quad \Phi(x, y) = \Phi(x, y + h), \quad (26-27)$$

ahol $\Phi(x, y)$ a végtelenített tér adott pontjában a fázis, és w , illetve h pedig a kép szélessége (width) és magassága (height). Ennek a feltételnek a be nem teljesülését a 16 ábra b) részlete mutatja be, beteljesülését pedig a c) részlete. A piros körbe zárt betűk pedig a képtér különböző széleit jelölik.

A képek illeszkedésénél a fázisugrás általában bekövetkezik, amikor a síkhullám egy általános hullámszámvektor (\bar{k}) jellemzi. Viszont annak módosításával ($\Delta\bar{k}$) egy olyan módosított hullámszámvektor nyerhető (\bar{k}') (28. egyenlet), mellyel az előző 26-27. egyenlet teljesül.

$$\bar{k}' = \bar{k} + \Delta\bar{k} \quad (28)$$

Amennyiben $\Delta\bar{k}$ értéke nagyságrendileg kisebb 1-nél, a síkhullám dőlése elhanyagolható módon változik meg. Így a rekonstrukció során a kép pozíciója elhanyagolható módon változik meg, és a folytonosság is teljesül a periodikusan végtelenített térben. Ebben az esetben az alábbi módon írható fel a fázis:

$$\begin{aligned} e^{i(k'_x \cdot x + k'_y \cdot y)} &= e^{i(k'_x \cdot (x+w) + k'_y \cdot y)} & \text{és} & & e^{i(k'_x \cdot x + k'_y \cdot y)} &= e^{i(k'_x \cdot x + k'_y \cdot (y+h))} \\ e^{i(k'_x \cdot w)} &= 1 & & & e^{i(k'_y \cdot h)} &= 1 \end{aligned} \quad (29-30)$$

Ez akkor teljesül, ha

$$k'_x = N \cdot \frac{2\pi}{w} \quad \text{és} \quad k'_y = M \cdot \frac{2\pi}{h} \quad (31-32)$$

ahol $N, M \in \mathbb{Z}$. Ebben az esetben viszont a hullámszám változására a következőket kapjuk:

$$\begin{aligned} |\Delta k_x| &= |k'_x - k_x| = \left| N \times \frac{2\pi}{w} - k_x \right| \\ &\quad \text{és} \\ |\Delta k_y| &= |k'_y - k_y| = \left| M \times \frac{2\pi}{h} - k_y \right| \end{aligned} \quad (33-34)$$

$|\Delta k_x|$ és $|\Delta k_y|$ akkor minimális, ha

$$\left| N - \frac{k_x \cdot w}{2\pi} \right| \quad \text{és} \quad \left| M - \frac{k_y \cdot h}{2\pi} \right| \quad (35)$$

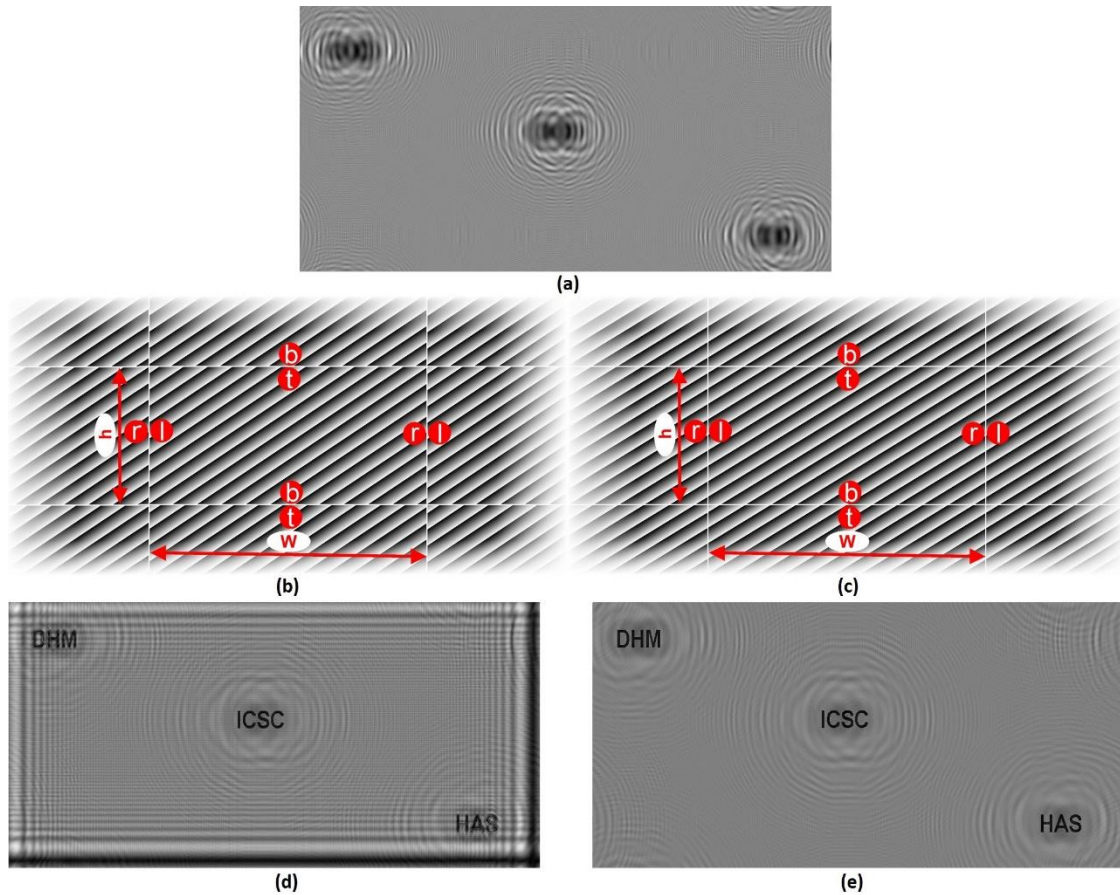
értékeik a legkisebbek. Ez akkor áll fenn, ha

$$N = \text{round} \left(\frac{k_x \cdot w}{2\pi} \right) \quad \text{és} \quad M = \text{round} \left(\frac{k_y \cdot h}{2\pi} \right). \quad (36-37)$$

Az ezekből kapott módosított irány szerinti hullámszámok a következőek:

$$k'_x = \text{round} \left(\frac{k_x \cdot w}{2\pi} \right) \frac{2\pi}{w} \quad \text{és} \quad k'_y = \text{round} \left(\frac{k_y \cdot h}{2\pi} \right) \frac{2\pi}{h}. \quad (38-39)$$

Minél ferdebb a rekonstruálónyaláb $\frac{k}{k'}$ hányadosa, annál közelebb áll az 1-hez, azaz a módosítás értéke annál kisebb. A módosított hullámszámokhoz tartozó abszolút tiltek a **kerekített tiltek**. A megépített mikroszkópban a ($k_{\text{vörös}} = 0$) vörös rekonstruálónyalábhoz igazított zöld és kék rekonstruálónyaláb dölések esetén olyan $k_{\text{zöld}}$ és $k_{\text{kék}}$ értékeket kaptunk, melyek módosított $k'_{\text{zöld}}$ és $k'_{\text{kék}}$ értékei szubpixeles laterális eltolódást vittek a rekonstrukcióba, mely hiba nem volt érzékelhető a képminőség változásában, azaz a relatív tiltek nem (elhanyagolható módon) változtak meg. Amennyiben a kerekített tiltek alkalmazásával a relatív tilt értékek megváltoznának, a különböző színcsatornákhöz tartozó (abszolút) tiltek együttes növelésével elérhető, hogy aztán a belőlük számolt kerekített tiltek közt ne jelentkezzen a relatív tiltek megváltozása. Hiszen minél nagyobb egy tilt, annál kisebb az ő és a belőle számolt kerekített tilt különbsége. A következő 16. ábrán bemutatásra kerül egy hologram, és két rekonstrukciója. A baloldali rekonstrukció során egy általános ferde sík rekonstruálónyaláb, a jobboldalinál pedig egy módosított dőlésű ferde sík rekonstruálónyaláb alkalmazásával történt a rekonstrukció. A ferde sík rekonstruálónyalábok fáziseloszlása, és a fázis folytonosság függvényében a rekonstrukcióban megjelenő diffrakciós csíkok is láthatóak.



16. ábra Rekonstruálónyaláb általános ferdeségének (tilt) a hatása a széleken megjelenő diffrakciós csík, mely a tilt pontos beállításával korrigálható. a) Egy hagyományos in-line hologram. b) A rekonstruálónyaláb fázisa, mely általános tilt-et tartalmaz. c) Oldalhossz alapján kerekített tilt, hogy a rekonstruálónyaláb a gyors Fourier-transzformáció során ne szenvedjen fázisugrást a széleken. d) és e) pedig rendre a „b”, illetve a „c” fázisú rekonstruálónyalábbal történt rekonstrukciók.

5.4 Összefoglaló

Numerikus rekonstrukciók során gyakran keletkezik a kép szélén diffrakciós zaj. Amikor ezt a Fast Fourier Transzformáció és a ferde rekonstruáló síkhullám együttes használata okozza, akkor a síkhullám ferdeségének kerekítésével a diffrakciós zaj keletkezése elkerülhető. Amikor a síkhullám ferdesége, a rekonstrukciós hullámhossz és a képméret rekonstrukciótól függetlenül állandó – mint ahogy nagyon sok esetben- ezt a kerekítési beállítást egyszer kell elvégezni a rendszer beüzemelésekor. De, ha bármelyik paraméter változik is, a kerekítési számításigény elhanyagolható az FFT számítási igényéhez képest. A diffrakciós zaj elkerülése ezen kerekítési módszerrel, független a rekonstrukciós távolságtól. A bemutatott egyszerű numerikus eljárás stabil része a színes holografikus berendezésünk fejlődő szoftverének.

2. Tézis

Új, a jelenlegieknél hatékonyabb algoritmikus megoldást dolgoztam ki, amely a ferde síkhullámmal történő numerikus rekonstrukciók során, a képtér szélén az FFT numerikus artefaktjaként keletkező diffrakciókat küszöböli ki azzal, hogy a ferde síkhullám ferdeségét úgy korrigálja, hogy a kép oldalainak hosszai megegyezzenek a velük párhuzamos hullámszámvektor-komponensekből származtatható hullámhosszak egész számú szorzataival. Az új eljárás megtartja a hologramok és a rekonstrukciók eredeti méreteit, és kellő paraméterezés mellett nincs hatással a képalkotásra, ugyanakkor számítás és műveletigénye is elenyésző a rekonstrukcióéhoz képest.

Kapcsolódó szabadalom és folyóiratpublikáció: [S1,F1]

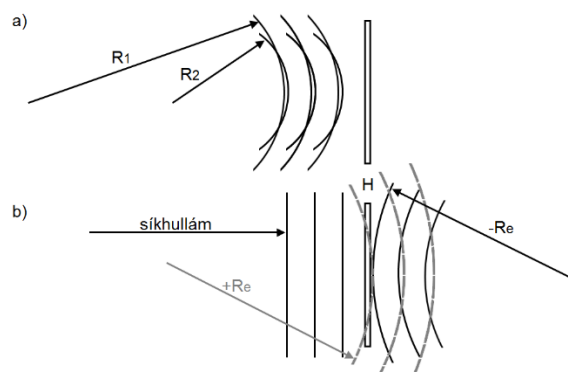
6. Önreferenciás holográfia

A vízminőség képalkotás alapú automata monitorozására alkalmas berendezés, a színes digitális holografikus mikroszkóp a negyedik és az ötödik fejezetben bemutatásra került. Ez a berendezés azonban nem alkalmas, és nem fejleszhető tovább fluoreszcens vizsgálatokra. A fluoreszcens vizsgálat segít megkülönböztetni az élőt az élettelenről, ami biológiai vizsgálat során láthatóan előnyös. A holográfia azon lehetőségeit ismerve, hogy a mintát nem kell preparálni, hanem szabadon áramolhat, és hogy létezik -fluoreszcens mérésre alkalmas- önreferenciás ága, fordult a tekintetem az önreferenciás holográfia (2. c) ábra) felé. Itt, a hatodik fejezetben kifejtem a második fejezetben csak megemlített önreferenciás holográfia mibenlétét, bemutatom a mások által ismertett önreferenciás elrendezéseket, és ismertetem a saját elgondolásomat, miszerint alkossunk gyűrűs bifokális lencsével önreferenciás holografikus mikroszkópot. Bemutatom a gyűrűs bifokális lencse tervezésének szempontjait, az ipari mikroszkópot, melybe a megtervezett és legyártott lencsét beépítettem, és végül az így kapott rendszerrel végzett méréseimet. Itt a hatodik fejezetben ismertetésre kerülő harmadik tézisem arra ad választ, hogy gyűrűs bifokális lencsével lehet-e fluoreszcens mérésekre alkalmas önreferenciás holografikus mikroszkópot építeni, máshogy fogalmazva: gyűrűs bifokális lencse segítségével lehet-e egy tárgyról jövő fluoreszcens fényel interferenciát létrehozni és így hologramot alkotni?

6.1 Önreferenciás holográfia elvi háttere

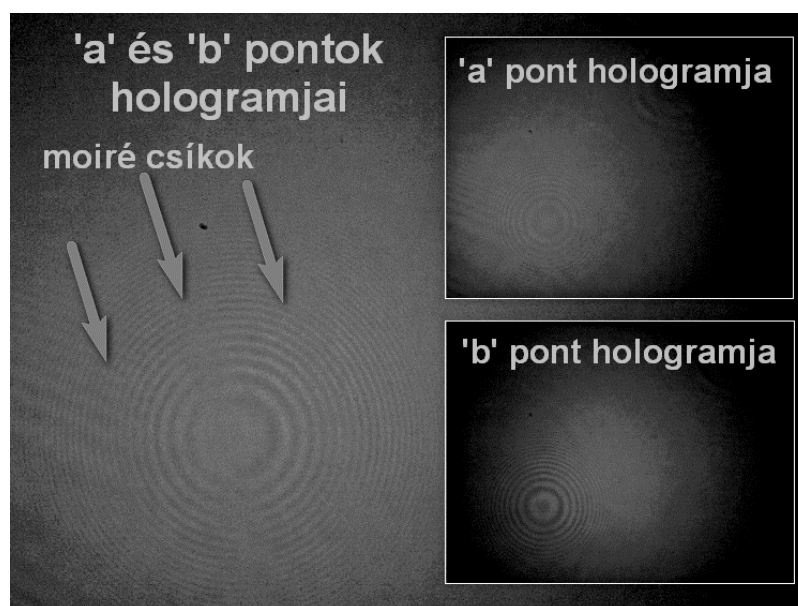
Az önreferenciás képalkotás egy pontból jövő fénynyalábból két gömbhullámot készít. Ezek a gömbhullámok egymással interferálva hozzák létre az önreferenciás interferencia csíkrendszert (*self-referenced interference pattern* - SIP), aminek detektorral rögzített képe a digitális intenzitás hologram. Ehhez az önreferenciás holografikus optikai elrendezésnek biztosítania kell azt, hogy a pont fényéből előállított két gömbhullám egymással koherens legyen a hologram síkjában, (máskülönben nem beszélhetünk holográfiáról). Több pont SIP-jei intenzitásban és fázisban is összeadódnak, ha a pontok fényei egymással koherensek. Ugyanakkor, csak intenzitásban adódnak össze, ha a pontok fényei egymással inkoherensek. Egymással inkoherens fényű pontokból álló tárgy amplitúdó tárgyának tekinthető, mivel időben nem állandók pontjainak fáziskülönbségei. Fluoreszcens pontforrások a gerjesztő fénytől függetlenül egymással inkoherensek, ezért amplitúdó tárgyak, és önreferenciás hologramjaik inkoherensen adódnak össze.

Vizsgáljuk meg egy pontforrás önreferenciás hologramjának keletkezését. A pontforrás fényéből az önreferenciás holografikus rendszer a hologram síkjában két különböző görbületi sugarú (R_1 , R_2) gömbhullámot hoz létre. Számításaim szerint ezek interferenciája nyomán egy olyan intenzitás hologram keletkezik, mely szintén előállítható egy sík és egy „eredő” görbületi sugarú (R_e) gömbhullám interferenciájából. Az eredő görbületi sugar így írható fel: $R_e = \pm (R_1 * R_2 / (R_1 - R_2))$. Az R_e határozza meg aztán a síkhullámmal történő rekonstrukció során a rekonstrukciós távolságot.



17. ábra Két gömbhullám által írt vékony hologramból (a) síkhullámmal történő rekonstrukció (b) során keletkező gömbhullámok és azok görbületi sugarai. „H” a hologram.

Az inkoherensen összeadó SIP-ek természetesen nem befolyásolják egymás rekonstrukciós távolságait. Viszont a kamera dinamikartományát egymás rovására csökkentik, és csíkrendszereik kiátlagolhatják egymást, ami információ veszteséget okozhat. Az intenzitás rácsok összegzésekor a moiré [52] jelenség lép fel, ami két ponthoz tartozó SIP-ek esetén könnyebben észrevehető, mint ahogy ezt az alábbi 18. ábra is mutatja. Az alábbi ábra képei egy az általam megépített Hariharan-Sen interferométer alapú önreferenciás holografikus rendszerrel készültek [53], ahol a tárgy az két, egymással inkoherens de azonos vörös színű szálbacsatolt LED fény.



18. ábra Inkoherenesen összeadódó önreferenciás hologramok (a,b) moiré jelenséget idéznek elő.

6.2 Tudomány állása

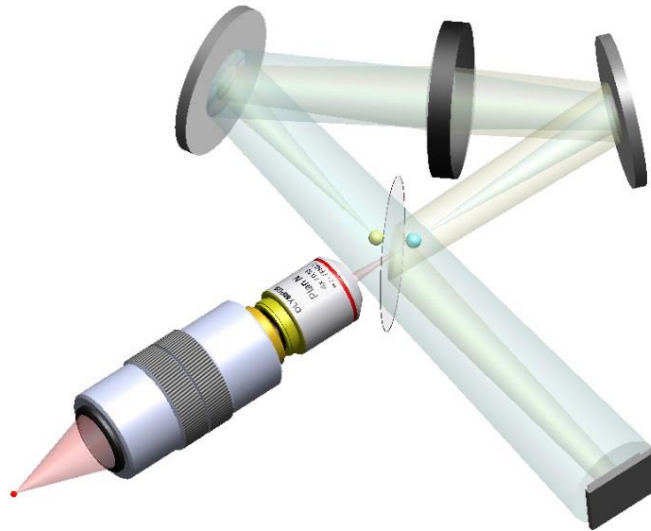
A hagyományos holografikus képalkotás nehézkessé vagy lehetetlenné válik, mikor a tárgy kiterjedt, messze van, vagy ha a saját fényét használnánk fel képalkotáásra, ugyanis a hagyományos külső holografikus megvilágítást nem lehet alkalmazni. Ilyen esetekben csak a tárgyról jövő fény áll rendelkezésre a holografikus képalkotáshoz. Ebből kell létrehozni a tárgy- és a referencianyalábot egyaránt, melyek egymással interferálva megrajzolják a hologramot. Innen kapta az önreferenciás holográfia a nevét. Bár, ha jól meggondoljuk, a hagyományos holografikus rendszereknél is egy forrás fényéből lesz a tárgy- és a referencianyaláb, csak a forrás különbözik a tárgytól. Ez az interferenciához szükséges koherencia biztosítása miatt nélkülözhetetlen.

Az önreferenciás holográfia többek között megcélozta fluoreszcens objektumok [54], távoli kiterjedt tárgyak [55] és csillagok [56] leképzését. Elrendezésüket tekintve beszélhetünk interferométer alapúakról, bi- vagy multifokális optikai elemre [57, 58, 59], illetve diffraktív optikai elemre [56, 60] épülő berendezésekről.

Interferométer alapú önreferenciás berendezéseket előszeretettel valósítanak meg Hariharan-Sen [53, 61], Michelson [55], Mach-Zender és Linnik interferométerekkel [62]. A Hariharan-Sen előnye, hogy elrendezéséből fakadóan biztosítja a nyalábok interferenciáját, ugyanis az optikai tengelyen mind a két nyaláb ugyanakkora utat tesz meg. A többinél az optikai úthosszak beállítása külön feladatot jelent. Ezeknek a rendszereknek előnye, hogy alap optikai elemekből

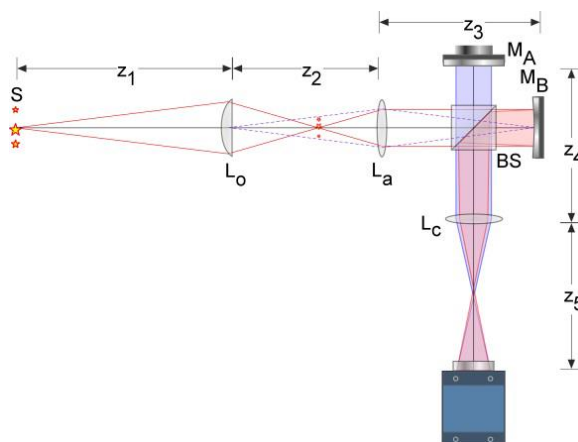
változatosan megépíthetőek, fázistolásra alkalmasak a Hariharan-Sen-t kivéve, így akár ikerkép-eltüntetésre is alkalmasak lehetnek. Hátrányuk egyfelől a nyálábsztóból fakad, ami legalább 50%-os fényvesztéséget produkál, illetve a sok optikai elem és méreteik kiterjedté teszik a rendszert, ami nem kedvez rezgésektől terhelt környezetben való alkalmazásuknak.

Az alábbi elrendezésű (19. ábra) Hariharan-Sen alapú önreferenciás holografikus berendezést építettem kísérleti jelleggel fluoreszcens mikroszkópnak, míg mások például csillagok vizsgálatára építették meg.



19. ábra Hariharan-Sen típusú önreferenciás holografikus mikroszkóp képalkotási elve. Látható, hogy egy az optikai tengelyen levő tárgypontról kiinduló fény kettéválasztott részei ellenkező irányban járnak körbe az interferométer aszimmetrikus háromszögét, azonos úthosszakot bejárva az optikai tengelyen. Az ábra egy pont (a piros) önreferenciás holografikus leképzését mutatja, ahol a tárgypontról jövő fénynyaláb két ága a sárga és a türkiz, melyek aztán a detektoron interferálnak.

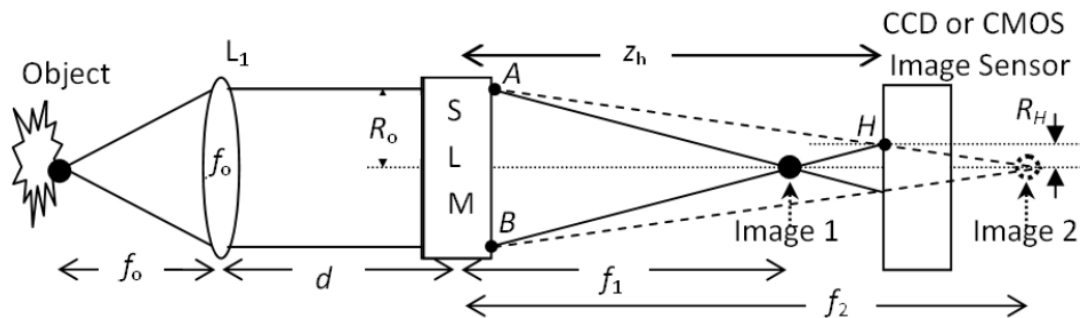
A következő Michelson- interferométer alapú önreferenciás holografikus elrendezés (20. ábra) színes tájkép fotózáshoz készült.



20. ábra Színes digitális önreferenciás holografikus Michelson interferométer alapú képalkotó rendszer [55].

Bifokális lencsére épülő önreferenciás holografikus mikroszkóp gondolata a holográfia kezdeti idejére tehető [7]. Ekkor már megfogalmazódott, hogy a birefringent duplafókuszú lencse [8], a fresnel zónalemez [56], a felezett apertúrájú lencse, és az apertúrában osztott lencse és diffrakciós elem kombináció egyaránt képezheti az önreferenciás holografikus rendszer alapját [57]. Ezt a palettát bővíti a fázist moduláló térbeli fénymodulátor (SLM [63], 21. ábra). Ezen optikai elem előnye a kompaktság és egyszerűség. Az SLM-nek további előnye a statikus lencsékhez képest, hogy a fázistolása programozható, ami több felvételes alkalmazásnál ikerkép-eltüntetésre ad lehetőséget.

A statikus bifokális lencsék egy részét csak elméleti szinten említették, de volt, amit felhasználtak ugyancsak csillagok vizsgálatára, vagy fluoreszcens mikroszkópiában. Ezen a területen ipari alkalmazást nem tudok mondani, inkább kísérleti elrendezéseket építenek intenzitás tárgyak leképzésére.



21. ábra Térbeli fénymodulátor (SLM) alapú FINCH önreferenciás holografikus mikroszkóp elvi ábrája. Látható az interferométer mellőzéséből fakadó kompaktsága a rendszernek. [64]

A diffrakciós optikai elem mondhatni a bifokális lencse kategóriába esik. Fresnel zónalemez alkalmazását már fent is megemlítettem. Itt még annyit tennék hozzá, hogy magam is kipróbáltam az önreferenciás holográfiában. Legfontosabb tapasztalatom az volt vele, hogy mint az off-axis rendszereknél, itt is szétválik a kép és az ikerkép, de mivel a rendek szétválását okozó interferencia rács nem csíkos, hanem gyűrűs elrendezésű, a rendek mélységben válnak szét és nem síkban. A fresnel zónalemezt gyártani is lehet, de hologramon interferenciával is elő lehet állítani [60].

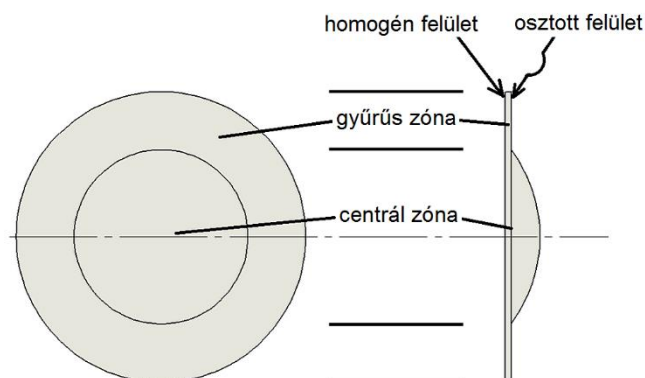
6.3 Gyűrűs bifokális lencse

Kutatásom során az ipari szempontokat figyelembe tartva, melyek az egyszerűség, kompaktság, könnyen gyárthatóság és az olcsó kivitelezhetőség, a bifokális lencsékre terelődött tekintetem, melyek nagy részét ki se próbálták, csak lehetőségét vetették fel. Megfigyelve őket és képalkotó tulajdonságaikat képzeltem el a gyűrűs bifokális lencsét [65] új optikai elemként a holográfia területén. Kutatásom során megkerestem a gyűrűs bifokális lencse holografikus működését befolyásoló paramétereket, és azok hatását. Elméleti levezetésemre alapozva megterveztem és legyártattam egy gyűrűs bifokális lencsét, önreferenciás holografikus alkalmazhatóságát működésével bizonyítottam, illetve vele olyan statikus egy felvételre alapuló holografikus képalkotó eljárást alkottam meg, mellyel a kép és az ikerkép szétválík.

6.3.1 GyBL, mint új optikai elem, az önreferenciás holográfiában

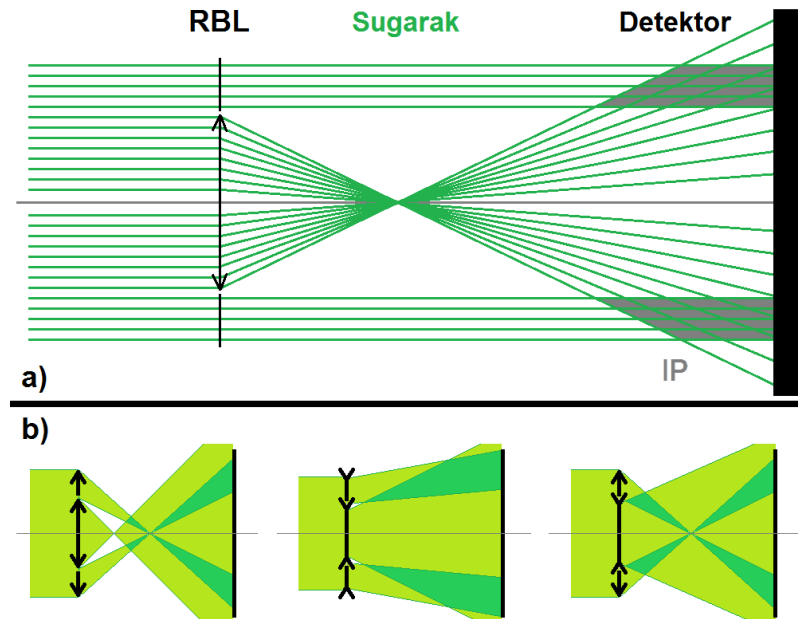
Az új önreferenciás holografikus mikroszkóp alapja és lényegi része a gyűrűs bifokális lencse. Ez az egy optikai elem az, ami megvalósítja az önreferenciás holografikus leképzést. Így az alábbiakban elsőként annak szerkezetét és képalkotását mutatom be.

A megvalósított gyűrűs bifokális lencse egy apertúrában osztott, tengelyszimmetrikus lencse, aminek tengely mentén más a fókusza, mint az azt körbevevő gyűrűs területnek. A fókuszkülönbség megvalósítható az anyag inhomogenitása (pl. grin lencse) vagy geometriája által, illetve a kettő ötvözetével egyaránt. A bifokalitás egyszerű megvalósítását a homogén anyagú lencse geometriájával képzeltem el. Hogy egy nyaláb biztosan csak két részre legyen osztva, a gyűrűs bifokális lencsének csak az egyik (a jobb oldali) felülete osztott geometriájú, mint ahogy az az alábbi 22. ábrán is látható.



22. ábra A gyűrűs bifokális lencse elöl és oldal nézetei. Látható a homogén anyagú lencse bifokalitását előidéző geometriai kialakítás.

A már megtervezett és legyártott gyűrűs bifokális lencse egy 400 mm fókuszú sík-domború tengely menti lencséből és egy végtelen fókuszú sík-sík gyűrűs „lencséből” áll. A gyűrűs bifokális lencse külső átmérője 10 mm és osztókörének átmérője ($2r_o$) 6 mm. A következő 23. ábra egy végtelenben levő pont e gyűrűs bifokális lencse által készített önreferenciás hologramjának keletkezését mutatja be. A kúpszerű tengely menti és csőszerű külső nyaláb uniójának keresztmetszete gyűrű alakú, így egy pont hologramja is középen hiányos, gyűrű alakú. A lencsék fókuszai a nyalábok átfedését, és hullámfrontjaik görbületi sugarait határozzák meg a hologram síkjában, míg a külső lencse apertúrája (ami akár lukas kocka is lehet) a hologram alakját határozza meg. Ezek az alábbi 23. ábrán is láthatóak.



23. ábra A gyűrűs bifokális lencse (GyBL), amint párhuzamos nyalábból önreferenciás interferencia csíkrendszer (IP) alkot. a) A megtervezett GyBL-en történő sugárátvezetés. b) Egyéb tetszőleges GyBL-en történő nyalábátvezetések.

A gyűrűs bifokális lencse a rá beeső hullám komplex amplitúdóját ($E(r, GyBL1)$) az alábbi módon modulálja öt elhagyó komplex amplitúdóvá ($E(r, GyBL2)$):

$$E(r, RBL2) = E(r, RBL1) * (A_{gy}L_r + A_cL_c) \quad (40)$$

Ahol A_{gy} és A_c rendre a GyBL gyűrűs és tengely menti területeinek apertúrái, illetve L_r és L_c pedig a gyűrűs és tengely menti (centrál) részek lencséit jellemzik, melyek így is kifejezhetőek:

$$A_{gy} = \text{sign}(r - r_o) \quad (41)$$

$$A_c = \text{sign}(r_o - r) \quad (42)$$

$$L_r = \exp(i\pi/(\lambda * f_r)r^2) \quad (43)$$

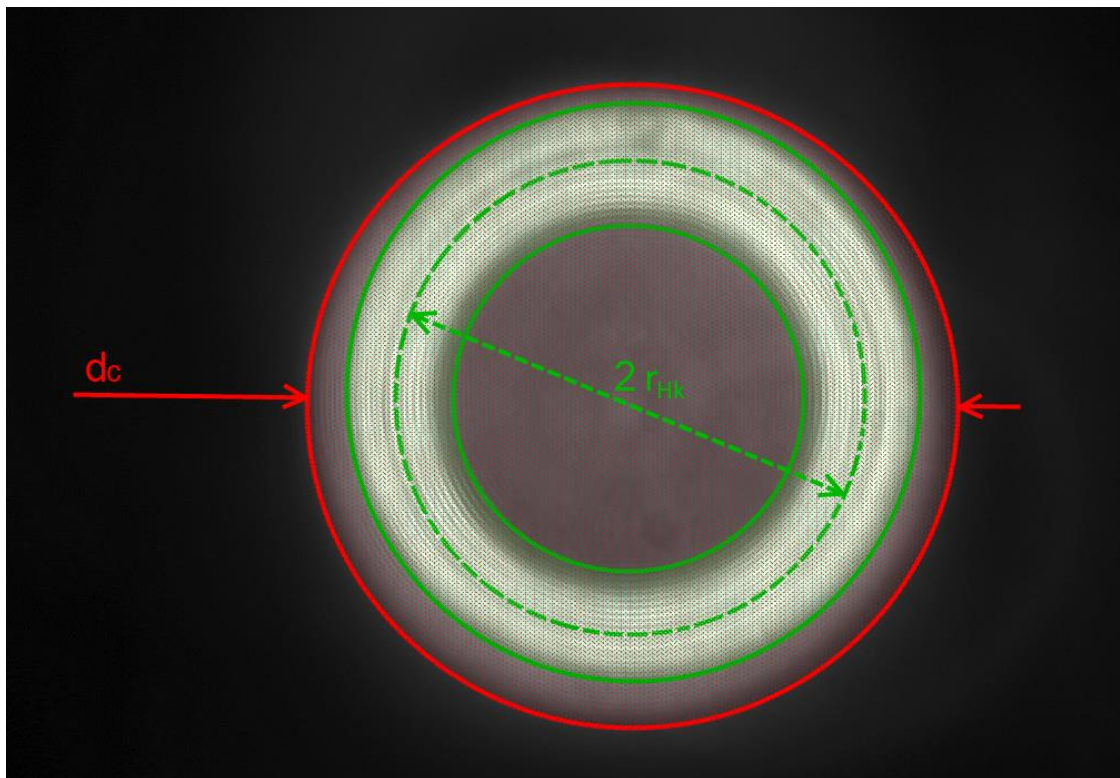
$$L_c = \exp(i\pi/(\lambda * f_c)r^2) \quad (44)$$

Ahol: $sign(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$, r az optikai tengelytől való távolság, r_0 a GyBL területének osztóköreinek a sugara, λ hullámhossz, f_{gy} és f_c pedig rendre a gyűrűs és tengely menti lencse fókuszai.

Kísérletemhez és az önreferenciás holografikus képalkotáshoz nem önállóan használtam a gyűrűs bifokális lencsét, hanem egy hagyományos fénymikroszkóppal együtt, amelybe beépítettem. Azaz a megépített önreferenciás holografikus rendszerben ez a gyűrűs bifokális lencse kiegészül egy objektívvel és egy tubuslencsével. Ennek sematikus ábráját és optikai leképezését a 32. ábrán mutatom be.

6.3.1.1 Gyűrűs bifokális lencsével felvett hologram képe

Egy nem tengelyen elhelyezkedő kiterjedt tárgy hologramját az alábbi 24. ábra mutatja be. A piros mező a centrál nyaláb által megvilágított területet, míg a zöld mező a gyűrűs nyaláb által megvilágított területet jelöli. A centrál nyaláb átmérője (d_c) akkor jó, ha nagyobb a gyűrűs nyaláb átmérőjénél, de nem sokkal, hogy ne vigyen fölösleges fényvesztést a képalkotáshoz. A gyűrűs nyaláb szaggatottan jelzett középátmérőjét ($2r_{HK}$) jelöli. Mivel a tárgy nem a tengelyen helyezkedett el, a nyalábok nem centrikusak egymásra.



24. ábra GyBL által alkotott gyűrűs hologram képe. A d_c átmérőjű piros kör a centrál nyalábot jelöli ki, míg a zöld körök a gyűrűs nyaláb helyét mutatják. $2r_{HK}$ a gyűrűs nyaláb (és így közel a gyűrűs hologram) középátmérőjét jelöli. A zöld területen, a két nyaláb metszetében láthatóak az interferencia csíkok.

6.3.2 Optikai úthosszak számítása

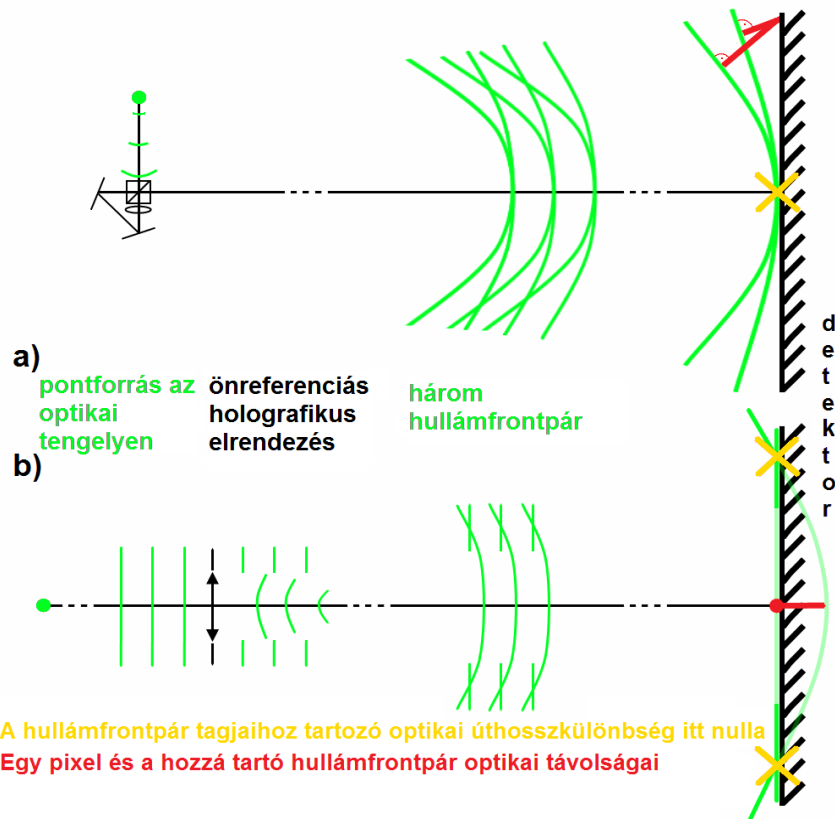
A tervezéshez elsőként felmértem a gyűrűs bifokális lencse legfontosabb paramétereit.

Egy berendezésnek az önreferenciás holografikus alkalmazásához az elsődleges dolog, amit biztosítani kell az az, hogy a tárgytól a hologram síkjáig a tárgy és a referencianyaláb optikai úthosszainak különbsége kisebb legyen a felhasznált nyaláb koherencia-hosszánál. Bármennyire fontos paraméter, az irodalomban az önreferenciás holografikus rendszereknél ezt nem szokták tárgyalni. Hariharan-Sen interferométer szerkezetéből fakadóan biztosítja, hiszen mind a két nyaláb pontosan ugyanazt az utat járja be, csak az interferométer háromszögében ellentétes irányban. A Michelson-, Mach-Zehnder és a hozzájuk hasonló interferométereknél ez jusztírozással empirikus úton beállítható.

Az SLM-nél és a diffraktív optikai elemeknél empirikus bizonyítást nyert az alkalmazhatóságuk. De mi a helyzet a gyűrűs bifokális lencsével? A gyűrűs bifokális lencse térben választja ketté a tárgyról jövő nyalábot, két lencsét tartalmaz, melyek egyikén megy át a tárgy és másikon a referencianyaláb, ezzel különböző úthosszakat járva be. Mivel statikus az optikai elem, az optikai úthosszkülönbséggel annak tervezésénél kell számolni.

Másik fő paraméter a lencsék fókuszai, mivel ez határozza meg a nyalábok átfedését (23. ábra), és azok hullámfrontjának görbületi sugarait a hologram síkjában. Ez azért is fontos, mert a hullámfront görbületek az optikai úthosszkülönbséget (így az interferencia létét) is befolyásolják a detektor adott pontjában.

A következő 25. ábrán a Hariharan-Sen interferométernek és a gyűrűs bifokális lencsének a képalkotását mutatom be, ahol a nyalábok közti optikai úthosszkülönbségek alakulása van kiemelve, egy az optikai tengelyen elhelyezkedő tárgy leképzése esetén.



25. ábra Az GyBL optikai úthosszainak számításához alkalmazott szemlélet. a) Optikai tengellyel azonos tengelyű nyalábok úthosszkülönbségei a detektor síkjában Hariharan-Sen interferométer alapú rendszer esetén. a) Optikai tengellyel azonos tengelyű nyalábok úthosszkülönbségei a detektor síkjában gyűrűs bifokális lencse alapú rendszer esetén.

A kép szemlélteti, hogy a bifokális lencse tagjainak vastagsága optikai úthosszkülönbséget visz be a hullámfrontpárok tagjai közt, azaz a tengelyen elhelyezkedő pontforrás fényéből generált hullámfrontpárok tagjai nem a tengelyen metszik egymást. Mivel a hullámfront görbülete a fényterjedéssel változik, a detektor tengely menti pozíciója is meghatározza a hullámfront párok tagjainak nulla optikai úthosszkülönbségének a helyét. Összefoglalva, a gyűrűs bifokális lencse tervezésénél három fő paraméter-csoportot vettem elsődlegesen figyelembe, melyek a lencsetagok fókuszai, (tengely menti) vastagságai és a detektor tengely menti pozíciója.

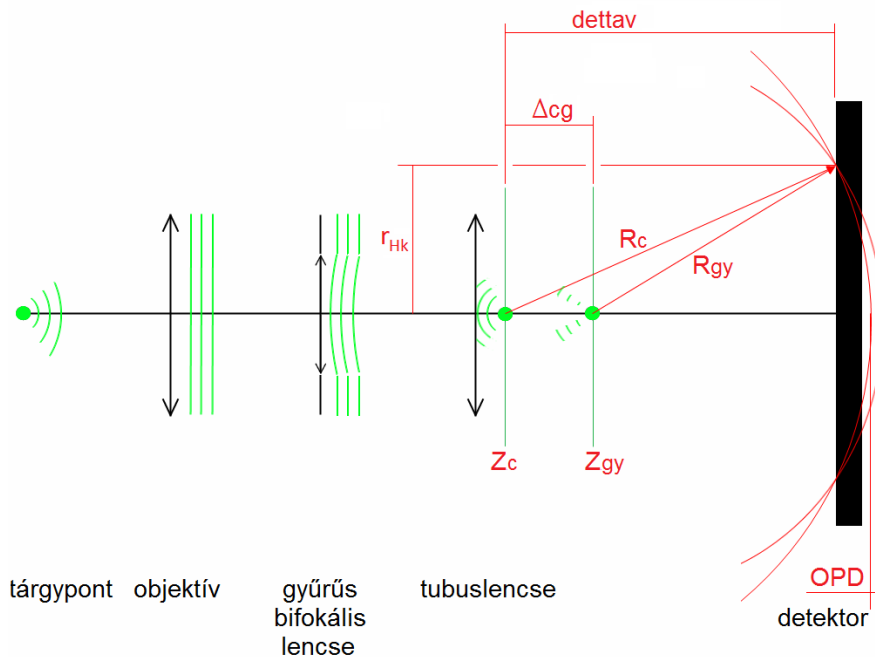
6.3.2.1 A gyűrűs bifokális lencse optikai úthossz-kompensációja

A számítás során a lencsevastagság-különbséget tengely menti pontforrásra optimalizáltam. A centrál lencse vastagsága egyértelműen a tengelyen értendő, és mivel a gyűrűs lencse a közepének kiegészítése esetén is egy plánpáralel lemez, tengely menti virtuális vastagsága megegyezik a vastagságával. Anyagában homogén a gyűrűs bifokális lencse, így az általa generált optikai úthosszkülönbség (OPD) a lencsetagok tengely menti vastagságkülönbség és az anyag - levegő törésmutatóinak különbségének a szorzata. Ez az optikai úthosszkülönbség (45. egyenlet) fogja eredményezni, hogy az összetartozó azonos fázisú hullámfront párok a tengely

mentén térben szétválnak, és csak a tengelytől távolabb metszik egymást, ahogy ez az előző és a következő ábrákon is látható különböző optikai elrendezések mellett.

$$OPD = (d_c - d_{gy}) * (n_{GyBL} - n_{levegő}) \quad (45)$$

A nulla optikai úthosszkülönbséget a gyűrűs nyaláb detektor síkbeli metszetének középvonalán, a *gyűrű középvonalon* célszerű elérni, így maximalizálható az interferencia kiterjedése a két nyaláb átfedésének területén. A következő 26. ábra a méretezéshez felhasznált modellt és a fő paramétereket tartalmazza.



26. ábra A gyűrűs bifokális lencse gyűrűs és centrál részének tengely menti optikai úthosszkülönbségének (OPD) beállításához használt modell ábrája. R_{gy} , R_c a gyűrűs és centrál nyaláb képeinek távolsága a gyűrű középvonalától. Z_{gy} és Z_c a gyűrűs és a centrál nyaláb képeinek helyei, d_{ettav} a detektor távolsága a centrál képsíktól, Δcg a centrál és a gyűrűs képsíkok távolsága, és r_{Hk} a gyűrű középvonal, ahol az optikai úthosszkülönbség alap esetben nulla.

A számítás célja, hogy a gyűrűs bifokális lencse OPD-jét az optikai rendszer felől lehessen meghatározni (46. egyenlet), hogy annak ismeretében a lencse területeinek vastagságkülönbsége meghatározható lehessen. Az optikai rendszer felől a 26. ábra alapján az OPD az alábbi módon számolható a tengelyen mért távolságokból:

$$OPD = \Delta cg + R_{gy} - R_c, \quad (46)$$

ahol Δcg a centrál és gyűrűs képsíkok távolsága. A képsíkok helyei (z_{gy} , z_c) az optikai rendszer paramétereiből és a tárgy távolságból számolhatóak a metszéki távolságok számítási módszerével, mely vékony lencsés közelítésben az alábbi módon írható le. A centrál képsík helyének számítása a következő:

$$s_{1c} = \frac{1}{\frac{1}{f_{obi}} + \frac{1}{z_t - z_{obi}}} \quad (47)$$

$$s_{2c} = \frac{1}{\frac{1}{f_{central}} + \frac{1}{z_{obi} + s_{1c} - z_{GyBL}}} \quad (48)$$

$$s_{3c} = \frac{1}{\frac{1}{f_{tubi}} + \frac{1}{z_{GyBL} + s_{2c} - z_{tubi}}} \quad (49)$$

$$Z_c = Z_{tubi} + s_{3c} \quad (50)$$

A gyűrűs képsík pedig az alábbi módon számítható szintén vékonylencsés közelítéssel:

$$s_{1gy} = \frac{1}{\frac{1}{f_{obi}} + \frac{1}{z_t - z_{obi}}} \quad (51)$$

$$s_{3gy} = \frac{1}{\frac{1}{f_{tubi}} + \frac{1}{z_{obi} + s_{1gy} - z_{tubi}}} \quad (52)$$

$$Z_c = Z_{tubi} + s_{3gy} \quad (53)$$

Ahol s a tárgyoldali metszéki távolságokat jelöli. Az R_c és R_{gy} *OPD* nélküli kiszámításához a centrál vagy a gyűrűs képpont, a detektor-tengely metszéspont és a detektor síkjában a tengelytől r_{Hk} távolságra levő pont által meghatározott derékszögű háromszögekre felírt Pitagorasz-tétel ad lehetőséget.

$$R_c = \sqrt{d_{ettav}^2 + r_{Hk}^2} \quad (54)$$

$$R_{gy} = \sqrt{(d_{ettav} - \Delta cg)^2 + r_{Hk}^2} \quad (55)$$

Ezen egyenlet megoldásához a h ismerete szükséges, mely a rendszer tárgyoldali numerikus apertúrájából, az objektív és a tubuslencse fókuszainak arányából, a gyűrűs nyaláb képsíkjának (z_{gy}) a detektor síkjától (z_{det}) való távolságától és a gyűrűs lencse apertúra-sugaraiból (r_o , r_{GyBL}) számolt közép vonal relatív helyéből az alábbi módon számolható érték.

$$h = \frac{\frac{A_{obi}}{2}}{z_{obi} - z_{targy}} * \frac{f_{obi}}{f_{tubi}} * (z_{det} - z_{gy}) * \frac{r_o + r_{GyBL}}{2} \quad (56)$$

A (47, 55, 56)-os egyenletekből az alábbi módon adódik ki az *OPD*.

$$OPD = \Delta cg + \sqrt{d_{ettav}^2 - 2d_{ettav}\Delta cg + \Delta cg^2 + r_{Hk}^2} - \sqrt{d_{ettav}^2 + r_{Hk}^2} \quad (57)$$

Látható, hogy az *OPD* három paraméterrel kifejezhető. Egyik a Δcg , mely a centrál apertúrának a fókuszának is a függvénye a (3) egyenletből fakadóan, d_{ettav} , mely szabad paraméter, és r_{Hk} , mely a bifokális lencse nélküli alap optikák, pozícióik és a tárgytávolság függvénye.

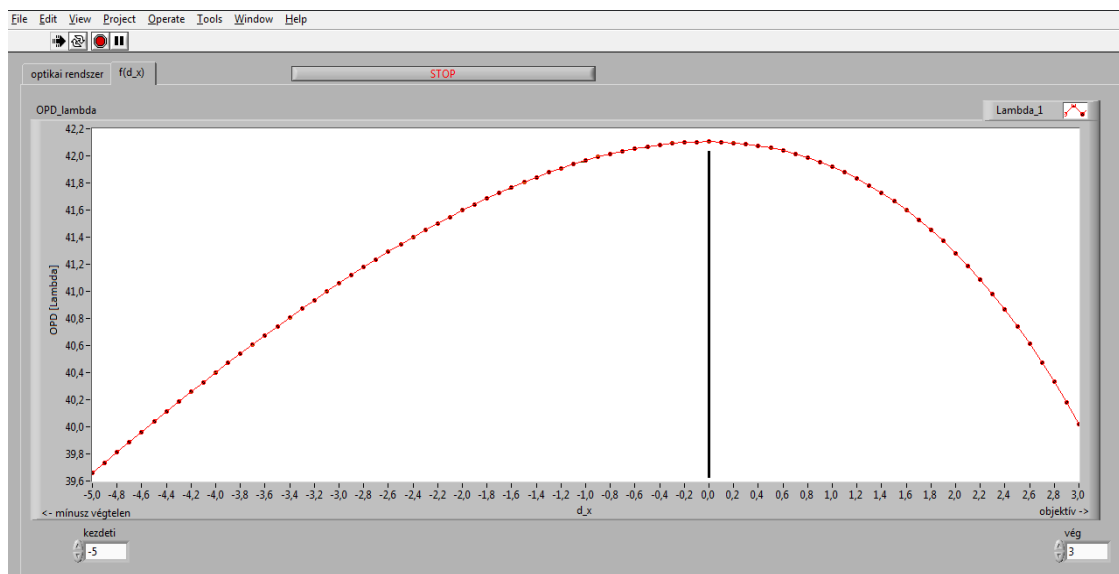
A fent említett összefüggéseket felhasználva állítottam össze a szimulációs programomat, mely segítségével terveztem meg a gyűrűs bifokális lencsét. A szimulációs tervezés iteratív módon két programmal zajlott.

A rengeteg szabad paraméter miatt először a beépítési környezetet fixáltam, azaz a felhasznált objektívet (Olympus, 4x), tubuslencsét (U-TR30-2) és a kamerát (ASI120MM-S), illetve a gyűrűs bifokális lencse gyűrűs apertúrájának végtelen fókuszát és egy elképzelt optimális apertúra sugár arányt (3:2).

Ezen paraméterek felhasználásával és egy a 32. ábrán látható egyszerűsített elrendezést alapul véve modellt alkottam, mellyel beállítottam a centrál nyaláb fókuszát, hogy a centrál és a gyűrűs nyalábok divergencia szögei megfeleljenek.

Az optikai elemek fő paramétereinek ismeretében a levezetés alapján saját szimulációs programmal beállítottam a detektor távolságot, optimalizálhattam a centrál nyaláb sugarát, és kiszámítottam a gyűrűs bifokális lencse OPD-jét.

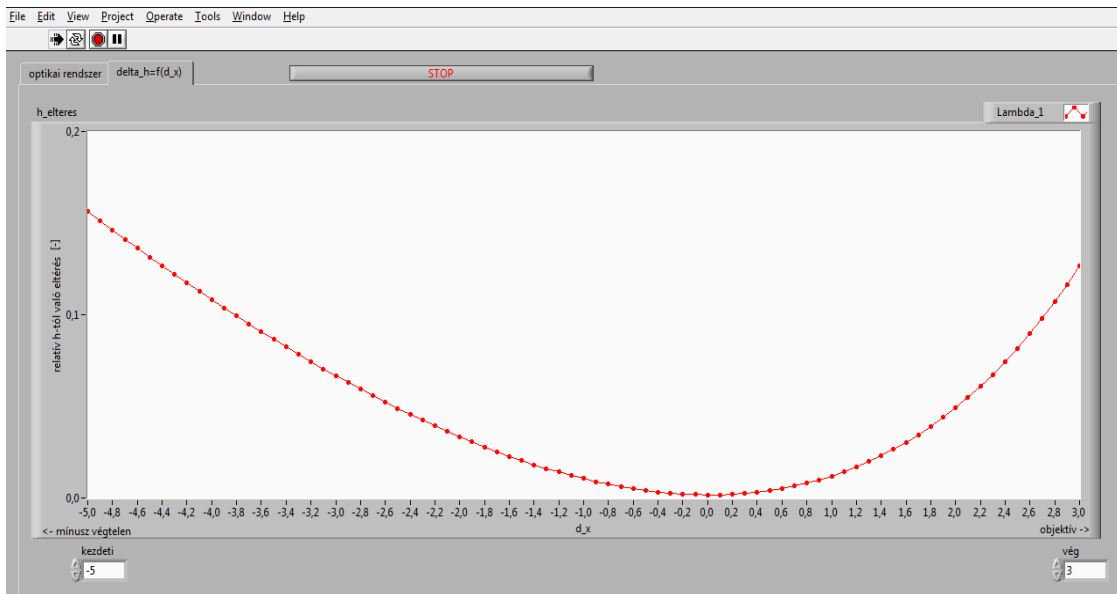
A szimulációs programom nem csak a tengelyen levő fókuszpontban levő tárgypontra eseten számította az OPD-t, hanem onnan az objektív felé 3 és ellenkező irányba 5 mm távolságokon belül is. A következő 27. ábrán jól látható, hogy a gyűrűs bifokális lencsének tárgy-távolságtól függően kellene az OPD-jét változtatni ahhoz, hogy a nyalábok nulla úthosszkülönbségeinek helye mindig a gyűrű középvonalára essen.



27. ábra A görbe a tárgy-távolság függvényében mutatja meg, hogy milyen tengely menti optikai úthosszkülönbséggel kellene a gyűrűs bifokális lencsének rendelkeznie, hogy a tárgy és a referenciányaláb nulla optikai úthosszkülönbsége a gyűrű középvonalon legyen biztosítva. Látható, hogy 8 mm tárgymozgás során 2,5 hullámhosszon belül kéne csak változtatni a GyBL úthossz kompenzációját ahhoz, hogy a nulla úthosszkülönbség helye mindig a gyűrű középvonalra essen. Az objektív fókusz síkjában (0-ban) a görbe vízszintes, azaz a hozzá tartozó OPD érték esetén, annak környékén a nulla úthosszkülönbség a gyűrű középvonalra esik. Egy 630 nm hullámhosszú fény átlagos 14 μm -es koherenciahossza 22,2 lambdával egyenlő.

Ugyanakkor az is jól látható, hogy beállíthatóak olyan paraméterek, ahol a különböző tárgy távolságokhoz tartozó OPD-k értékei közti különbség kicsi. Itt a 8 mm tárgy távolságon 2,6 hullámhossznyi különbség jelentkezett az OPD-knél 630 nm-es fény esetén. Az átlagos koherencia hossza az algák autó-fluoreszcens fényének 14 μm körüli, ami nagyságrendileg 22 hullámhossznak felel meg.

Megfordítva a modellezést, megvizsgáltam, hogy a fókusz síkhoz tartozó OPD-t alapul és fixnek véve, a tárgy távolság függvényében mennyivel hagyja el a gyűrű középvonalát a centrál és gyűrűs nyalábok nulla úthosszkülönbségének a helye. A középvonal elhagyásának távolságát az aktuális gyűrű vastagságának felével normáltam, így a távolság 1 értéke a gyűrű külső szélét jelöli. A normálásra azért van szükség, mert a gyűrűs nyaláb átmérője szintén változik a tárgy távolság függvényében. Az eredmény a következő 28. ábrán tekinthető meg. Látható rajta, hogy a nulla úthosszkülönbség helye a gyűrű középvonaltól kifelé került, de a közelében maradt. Azaz az interferencia kontraszt maximuma a két egymással interferáló nyaláb metszetének belső részébe esik különböző tárgy távolságok esetén is. Ezzel az interferencia szempontjából a mélyégi fluoreszcens képalkotás biztosított a gyűrűs bifokális lencsével.



28. ábra Az előző diagramon a fókusz síkhoz tartozó OPD-t alapul és fixnek véve az itt látható görbe megmutatja, hogy a tárgy távolság függvényében mennyivel hagyja el a gyűrű középvonalát a centrál és gyűrűs nyalábok nulla úthosszkülönbségének a helye. Az 1 érték a gyűrűs nyaláb külső szélét jelentené, míg -1 pedig a belsőét.

6.3.2.2 *Általam alkotott modell alapja*

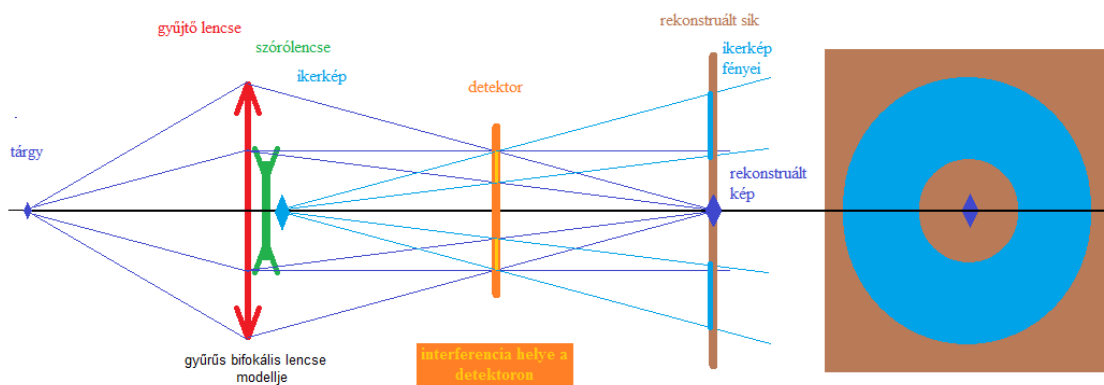
Mivel gyártási titokból fakadóan ismeretlen paraméterű objektívet és tubuslencsét alkalmazok, és a mikroszkóp, amibe a bifokális lencsét beépítem is egy fekete doboz, pontos optikai úthosszakkal lehetetlen számolni. Ugyanakkor a gyűrűs bifokális lencsének nulla úthosszkülönbséget kell biztosítania a detektor síkjában a hologram területén belül, de nyilván nem az egész területen. Ezen okokból a sugárátvezetési módszerek és a tervezőprogramok szimulációi nem vezetnek sikerre, hiszen azon modellek pontatlansága nagyobb a beállítani kívánt optikai úthosszkülönbségnél. Ezért a modellalkotásom során az alábbi szempontokat vettem figyelembe:

- 1) ideális optikai rendszer, hiszen a valós optikai elrendezés nem ismert.
- 2) tengely menti leképzés vizsgálata, abból kiindulva, hogy a Hariharan-Sen interférométernél is csak ott egyértelmű a nulla úthosszkülönbség megléte.
- 3) pontforrás fénye gömbhullámot eredményez
- 4) a hullám egy adott hullámfrontja összefüggő felületű azonos fázisú pontok halmaza, ahol a hullámfront minden pontja ugyanannyi optikai (nem fizikai) utat tett meg a pontforrástól.
- 5) homogén térben (nem tükörrel) kettéválasztott hullámfront mindkét felületdarabja bár térben máshol helyezkedik el, az időben azonos fázisúak, azaz koherensek.

Ezen pontok alapján belátható, hogy a nyalábok közti optikai úthosszkülönbség a nyalábok hullámfrontpárjainak eltolásával beállítható. Ez sokkal egyszerűbb módszer, mint a pontos optikai paramétereket igénylő modellezés, mely jelen esetben nem is kivitelezhető.

6.3.3 Kép-ikerkép szétválasztása a képtérben GyBL segítségével

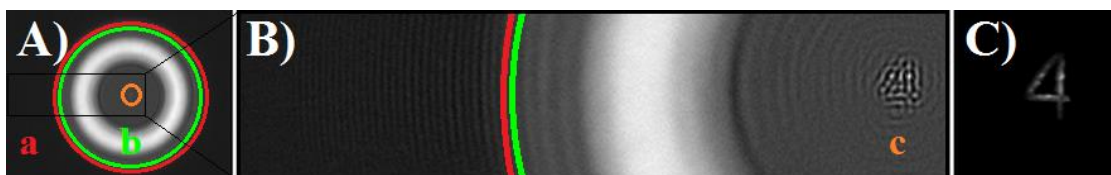
A gyűrűs hologram egy olyan hiányos hologram, amelynél a kisfrekvenciás terület – a hologram közepe - hiányzik. Azaz a hologram közepén nincs interferenciából származó információ. Az alábbi 29. ábra egy GyBL segítségével alkotott gyűrűs hologramot mutat be, melyen ez jól látható. A gyűrűs hologram egy hagyományos rekonstrukciója során a rekonstruálódó kép a hologram hiányos középső területére esik. Ennek két előnye van: az egyik, hogy homogén háttérrel lehet biztosítani a rekonstruálódó kép számára, a másik pedig, hogy az ikerkép, ami széttartóan terjed a képpel ellentétben, nem fog ráakodni zajként a fókuszált képre. Ezt az alábbi 29. ábra mutatja be.



29. ábra A gyűrűs bifokális lencsével (GyBL) történő holografikus képalkotás. Látható, hogy a rekonstrukciós síkban a kép és az ikerkép a térben szétválik.

Jól látható rajta, hogy amíg a sötétkék valós kép befelé terjed, addig a világoskék ikerkép széttartóan, azaz kifelé diffraktálódik, mint általában. Mivel azonban a hologram gyűrű alakú, a rekonstruálódó kép a gyűrű közepébe az üres területre kerül.

Egy valós, a gyűrűs bifokális lencse segítségével fölvetett gyűrűs hologram rekonstrukciós eredményét is bemutatom. A tárgy itt a fluoreszcens USAF teszttárgy „4”-es alakú fluoreszcens pontthalmaza. A 30. ábrán látható, ahogy a kép és az ikerkép szétválnak. Az ikerkép -a csíkrendszer- a piros körön kívülre kerül, míg a kép a gyűrű közepébe, ahol korábban nem volt interferencia.

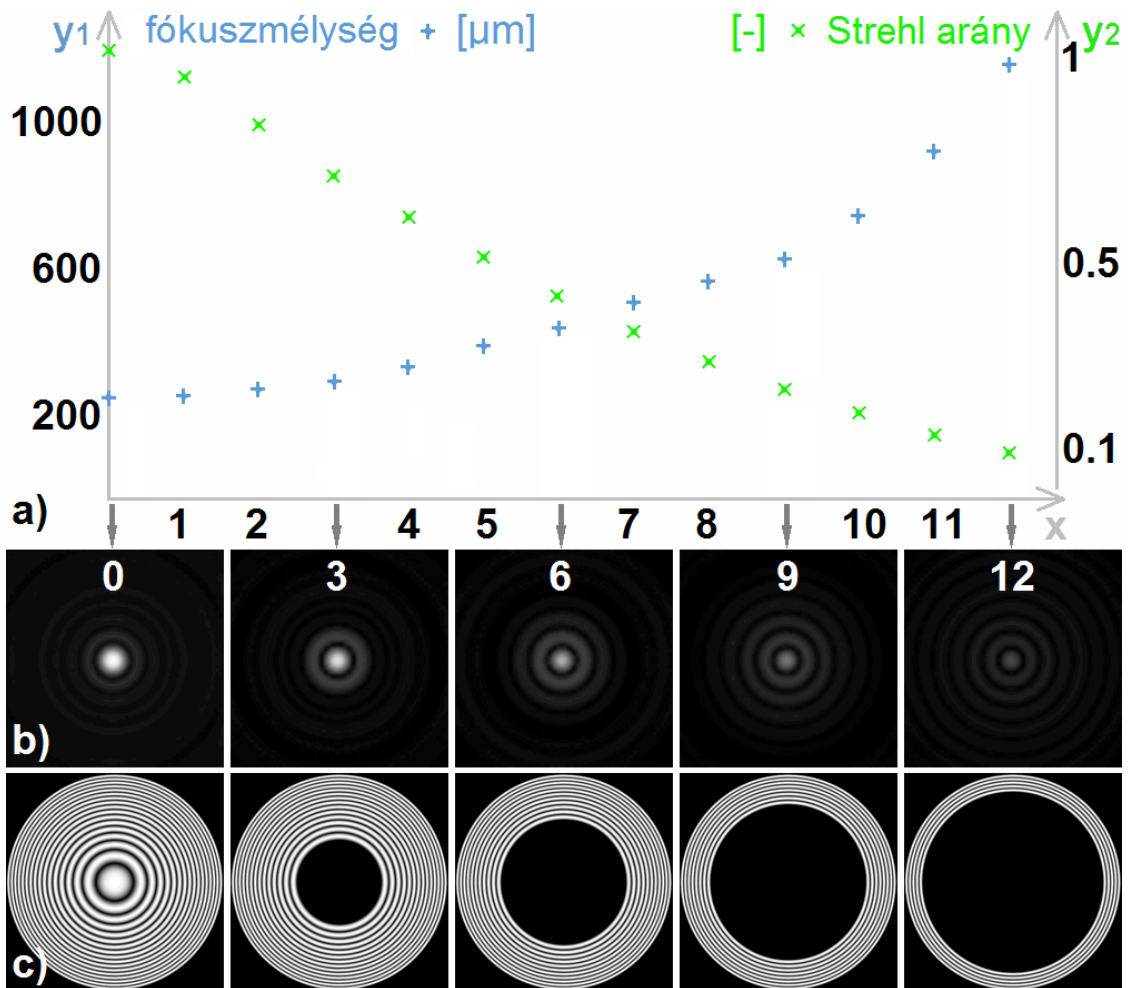


30. ábra Gyűrűs bifokális lencse segítségével felvett gyűrűs hologram rekonstrukciója. A) Teljes rekonstrukció. B) Rekonstrukció kiemelt részlete, ahol jól látható, hogy az eredeti hologram helyéről (a fényes gyűrűből) kidiffraktálódtak az interferencia csíkok, így az ikerkép a piros körön kívülre került, a kép a „4”-es minta pedig a gyűrű közepére. C) Az eredeti fluoreszcens teszttárgy fényképe. Megfigyelhető, hogy az intenzitáseloszlás a rekonstrukción és a fényképen korrelál, azaz a „4”-esnek nem csak az alakja, hanem a szerkezete is visszakapható. Ugyanakkor a képek alapvető „stílus” különbségei is megfigyelhetők, mint a háttér és a diffrakciós csíkok jelenléte.

Összehasonlítva az eredeti tárgy fényképét a rekonstrukcióval az is észrevehető, hogy az intenzitáseloszlás a rekonstrukción és a fényképen korrelál, azaz a „4”-esnek nem csak az alakja, hanem a szerkezete is visszakapható.

Ezen előnyöket homályosítja el, hogy a rekonstrukcióból hiányzó kis térfrekvenciák egy, a rekonstrukciót körülvevő diffrakciós csíkrendszert generálnak.

Szimulációval vizsgáltam egy pont gyűrűs hologramjának és az abból való rekonstruált képének a kapcsolatát. A szimulációban egy pont egy adott teljes intenzitás hologramjából (mely 17db erősítést tartalmaz) különböző mértékben távolítottam el a hologram csíkjaikat belülről indulva, és figyeltem az ezekből rekonstruálódó pontokat a Strehl arány segítségével, illetve az ezeket körülvevő csíkrendszerek alakulását, és a rekonstruálódott „pontok” fókuszmélységének, azaz mélységbeli hosszának változását. A kezdeti hologram rekonstrukciós távolság 3000 μm , használt hullámhossz 530 nm és a pixelméret 0,9 μm . A szimulációs hologramokat, a belőlük rekonstruált pontokat és grafikonon a hozzájuk tartozó fókuszmélységet, illetve Strehl arányait a következő 31. ábra mutatja be. A fókuszmélység meghatározásához azon mélységben tekintetem a rekonstruálódó pontot még valósnak, ahol a pont laterális pozíciójában a maximális intenzitás eléri közvetlen környezetének (eredeti hologramból rekonstruált pont átmérőjénél 3x nagyobb átmérőjű terület) maximális intenzitását. A Strehl arány kiszámításához etalonnak a csak diffrakció limitált „0”-ás rekonstrukcióból indultam ki, melynek intenzitás maximumához arányítottam a többi („1-12”) rekonstrukció intenzitásmaximumát.



31. ábra Ahol a) a fókuszmélység (y_1 , [μm]) és a Strehl arány (y_2 , [-]) alakulását mutatja be a hologram közepéből hiányzó gyűrűk darabszámának (x) függvényében; b) a hologramokból 3000 μm távolságba rekonstruált pontok és környezetüknek nagyított képei. c) Az intenzitás hologramok.

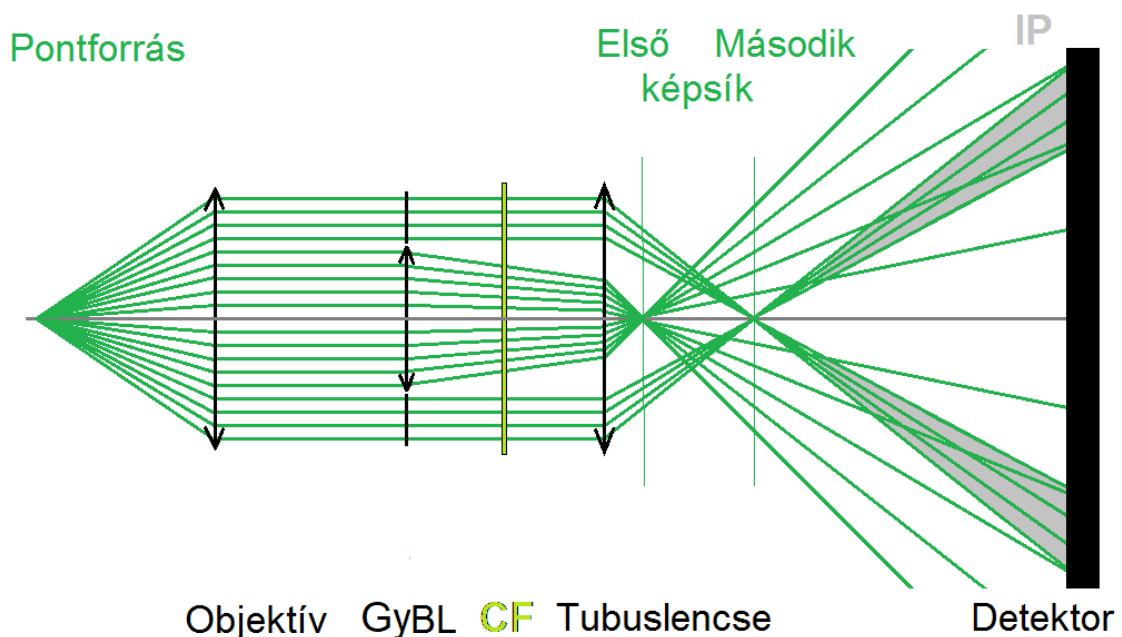
A szimuláció megmutatta, hogy a hologram hiányának növelésével a Strehl-arány csökken, és a fókuszmélység megnő. Látható, hogy a fókuszmélység növekedése a hologram gyűrűjének elvékonyodásával felgyorsul, de kis hiány esetén nem számottevő a változása. Mivel a gyűrűs hologram kitöltési tényezője a gyűrűs apertúrájú lencse geometriai arányaitól függ, ez a paraméter könnyen kézben tartható.

Továbbá megállapítható, hogy egy pont gyűrűs hologramjának rekonstrukciója (a hologram közepének kitakarása mértékében) rekonstrukciós irányban megnő, vonalszakasszá válik, így a (keskeny) gyűrűs hologram egyfajta axikonként viselkedik. De ennek bővebb tárgyalása túlmutat e disszertáció témáján.

6.4 Gyűrűs bifokális lencse alkalmazhatósága

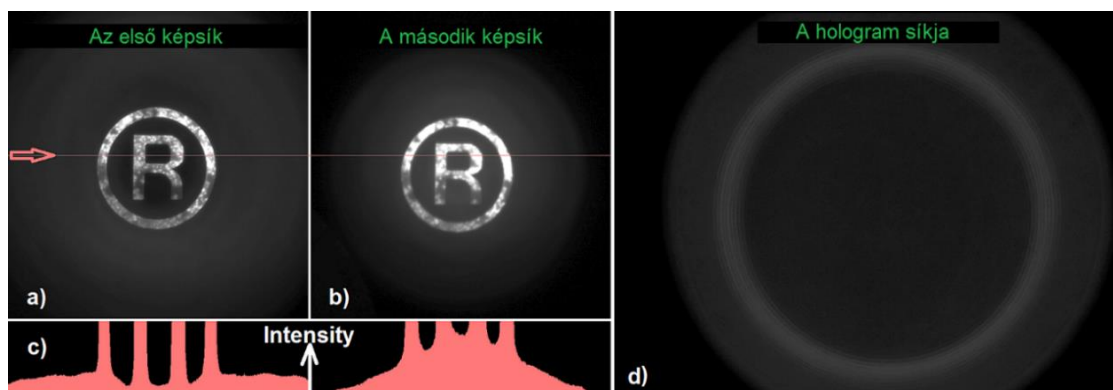
Cél, hogy az elméleti megfontolások gyakorlati haszonhoz vezessenek. A megfogalmazott előnyök a vastag térfogatban szabadon úszó fluoreszcens objektumok egy expozíciós képalkotásban és az egyszerű beépíthetőségében öltenek testet. Éppen ezért a következőkben a gyűrűs bifokális lencse gyakorlati alkalmazhatóságát mutatom a beépíthetőségen és a képalkotásán keresztül.

Egy Olympus IX71-es mikroszkópot egészítettem ki digitális önreferenciás holografikus mikroszkóppá a bifokális lencse alkalmazásával és a kamera pozíciójának beállításával. A hologramot egy monokróm nagy érzékenységgű kamera (ASI120MM-S, 1280x960 felbontású) rögzítette. A használt végtelenre korrigált mikroszkóp objektív típusa: Olympus, 4x Plan, NA=0.16, $f=45$ mm. A GyBL a revolverfejben rögtön az objektív után kapott helyet. A kamera a trinocular fejre (U-TR30-2) szerelt kamera adapteren (U-TV0.5XC-3) helyezkedik el a gyűrűs képalkotás fókusz síkjától 40 mm-re kitolva. A mikroszkóp gerjesztő fényének hullámhossza 405 nm volt. A fluoreszcens USAF teszttárgy esetén a fluoreszcens fényt 530 nm-es 10 nm sávzélességgű színszűrő (Thorlabs FB530-10), míg alga minta esetén 600 nm-es (Thorlabs FEL 600) felül áteresztő színszűrő szűrte. Az összeállítás elvi vázlatát az alábbi 32. ábrán látható.



32. ábra A megépített önreferenciás holografikus mikroszkóp elvi vázlatát. A pontforrás képét egy objektív bontja fel. A fénynyalábot a bifokális lencse (GyBL) választja ketté térben. A színszűrő (CF) a gerjesztő fényt szűri ki, és a fluoreszcens fény sávzélességét típusától függően csökkenti. A Tubuslencse a nyalábok divergenciáját állítja be, és a detektor a hologramot rögzíti. A két nyaláb metszete az interferencia csíkrendszer (IP) megjelenési helye.

A GyBL hatására egy tárgynak két éles képe keletkezik. Ennek elvi okát a fenti ábra mutatta, fizikai megvalósulását pedig a következő 33. ábra. Jól látható alább, hogy a tengely menti nyaláb képét az első képsíkban egy gyűrűs intenzitás eloszlású, míg a gyűrűs nyaláb képét a második képsíkban egy hagyományos, tömör defókuszált kép veszi körül.



33. ábra a) A tengely menti nyaláb képe és a gyűrűs nyaláb defókuszált képe, míg b)-nél fordítva. c) intenzitáseloszlás a piros csík mentén d) Hologram.

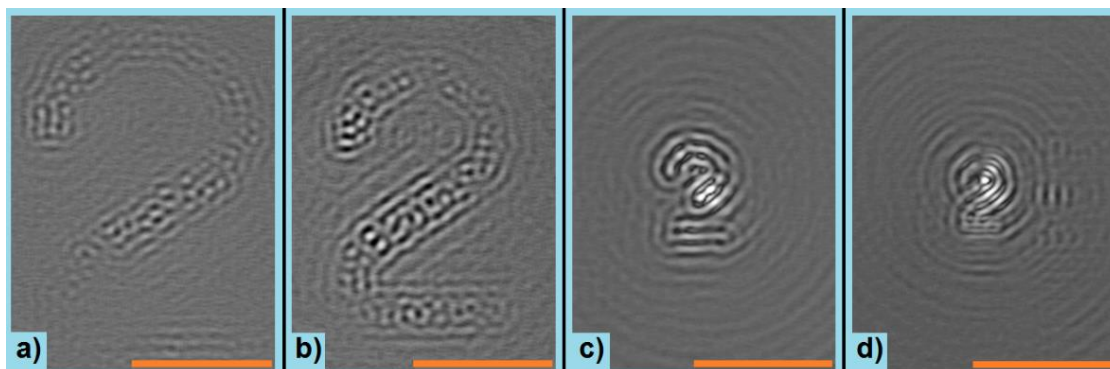
6.5 Mérések és rekonstrukciók

Ez a fejezet mutatja be a gyűrűs bifokális lencse képalkotási alkalmazhatóságát.

A megépített önreferenciás holografikus mikroszkóppal fölvelt hologramokat Angular Spectrum módszer alkalmazásával rekonstruáltam. A mikroszkóp rendszer teszteléséhez három mérést végeztem el. Az elsőben azonos mélységben levő, de különböző méretű objektumok hologramjait rögzítettem, majd rekonstruáltam. A másodikban a rendszer térfogati látásának vizsgálatára 1,5 mm mélységű térben helyeztem el az objektumokat. A harmadikban pedig élő algáról alkottam holografikusan auto-fluoreszcens képet.

6.5.1 Tárgyméret vizsgálata

Itt azonos síkba – az objektív fókuszsíkjába - helyezett hasonló mintázatú, de különböző méretű objektumokról alkottam önreferenciás hologramokat, melyek rekonstrukcióit és eredeti méreteit (a méretvonal segítségével) az alábbi 34. ábra mutatja be.



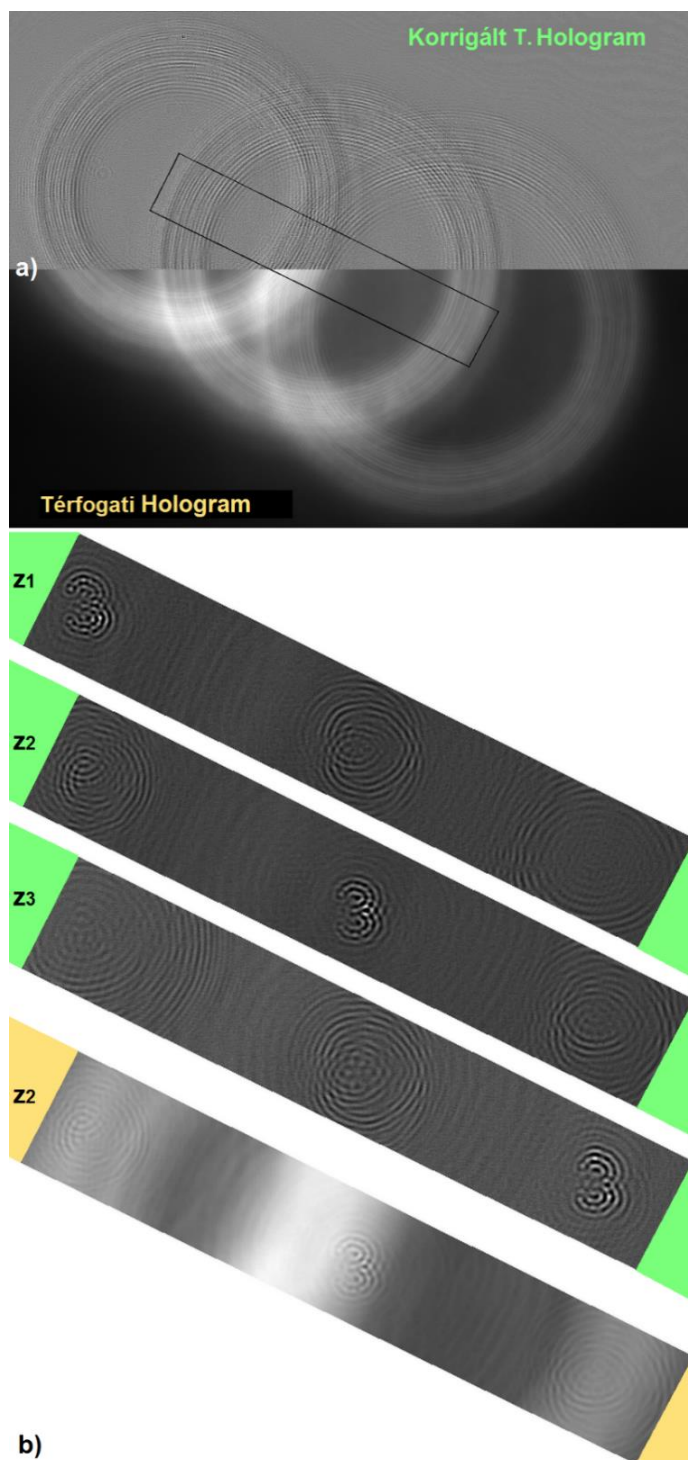
34. ábra Különböző méretű fluoreszcens „2”-es minta holografikusan rekonstruált képei figyelhetőek meg. A narancssárga méretvonalak 200 μm -t jelölnek. A több pontforrásból álló kép kontrasztja kisebb, mert több pontforrás hologramjai inkoherensen összeadódva kiátlagolják egymást.

A több pontforrásból álló kép kontrasztja kisebb, mert több pontforrás hologramjai inkoherensen összeadódva kiátlagolják egymást.

6.5.2 Mélységi látás vizsgálata

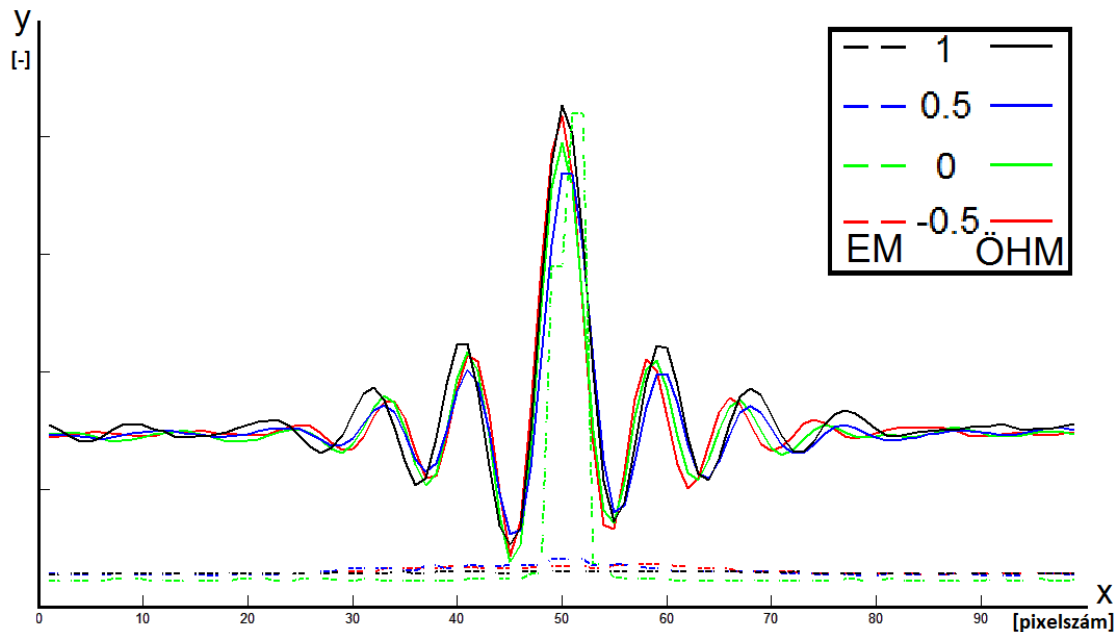
A mélységi vizsgálathoz -0,5, 0, és +1 mm mélységekben helyeztem el ugyan azt a tárgyat, ahol a 0 mélység az objektív munkatávolságának síkja. Technikailag a mikroszkóp a GyBL beépítése után nem engedett nagyobb mozgásteret. Mivel a felhasznált USAF teszttárgy átlátszatlan és csak egy volt belőle, ezért a hologramokat külön-külön vettem fel, és utólag adtam össze őket csak intenzitásban, mint ahogy amúgy is összeadódtak volna valódi, ritkás térfogati tárgy esetén. Ezt a mérésekből összeállított különböző mélységű objektumok hologramjait tartalmazó mérés értékű hologramot *Térfogati Hologramnak* (TH) neveztem el. A TH erősen inhomogén nulladrenddel rendelkezik, mely a rekonstrukciók háttéréül, gyakorlatilag zajként szolgál. Ezen inhomogenitást az alábbi módon tüntettem el: a TH-t a Matlab® „sharpeningFilter” függvénye segítségével élesítettem mely a hologram csíkrendszerének kontrasztját növelte, de a nulladrendét nem, majd ebből vontam ki a TH-t. Az így kapott nulladrend nélküli hologramhoz egységnyi és természetesen homogén nulladrendet adtam a rekonstrukció helyessége miatt. Az alábbi 35. ábra a TH-t, a Korrigált Térfogati Hologramot (KTH-t) és a KTH, illetve TH különböző mélységű rekonstrukcióit mutatja meg.

Az eredményekből megfigyelhető a háttér homogenizálásának pozitív hatása, és a nagyobb mélység vizsgálatára való képessége. A megépített optikai rendszer legalább 1,5 mm mélységű térfogat vizsgálatára alkalmas, egy általános 4x-es objektív 0,1NA-val meg cc. 55 μm -es mélységélességű, így legalább 25x-ösére növelte a látott térfogatot a gyűrűs bifokális lencse.



35. ábra Mélységvizsgálat Az a) ábra a Térfogati Hologram és az abból numerikus eljárás során javított Korrigált Térfogati Hologram felezett képeit mutatja. A három különböző méretű gyűrű a különböző mélységekbe helyezett ugyan azon objektum hologramjai. b) A különböző z távolságokba történő rekonstrukciói a korrigált és a mért hologramoknak.

A képképzésen túl az épített önreferenciás holografikus rendszert a különböző tárgytávolsághoz tartozó pontszórás függvények segítségével is megvizsgáltam. Eredményét a 36. ábra mutatja be.

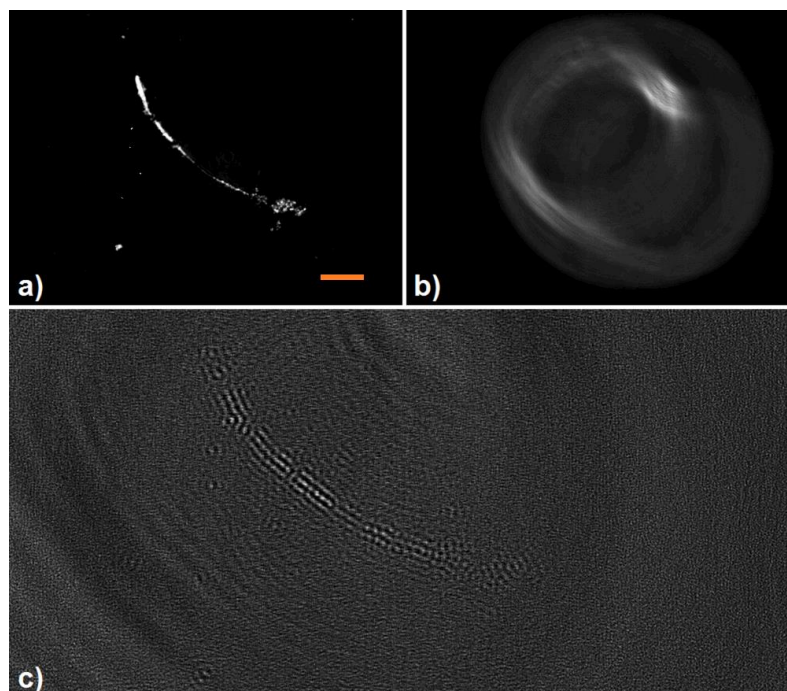


36. ábra A hagyományos (EM) és az önreferenciás holografikus mikroszkóp (ÖHM) különböző mélységekhez tartozó pontszórás függvénye. Amíg a hagyományos mikroszkóp PSF-je a fókuszról kimozdulva a tárgyat teljesen ellaposodik, addig a holografikus mikroszkóp PSF-je megtartja alakját 1 mm-es kimozdítás esetén is.

A fenti ábrán látható, hogy a holografikus rekonstrukció centrális foltjának átmérője hasonló nagyságú a hagyományos mikroszkóp foltátmérőjével, azaz hasonló felbontásra lenne képes, mint az eredeti mikroszkóp, ha nem venné őt körbe a diffrakciós csíkrendszer. Ez a csíkrendszer a gyűrűs bifokális lencse optimalizálásával csökkenthető, de el nem tüntethető. Továbbá az is látható, hogy a különböző mélységekhez tartozó PSF függvény a holografikus rendszernél jó azonosságot mutat, nem úgy, mint a hagyományos mikroszkóphoz tartozó PSF, mely a fókuszról kimozdulva teljesen ellaposodik. A holografikus rendszer különböző mélységhez tartozó PSF függvényeinek ismeretéből arra engedek következtetni, hogy 25x-ösnél nagyobb látott mélységnövekedés is elérhető a gyűrűs bifokális lencse segítségével.

6.5.3 Élő alga autofluoreszcens mérése

Fonalas zöldalgáról is vettem föl hologramot, mely fluoreszcens fényének sávszélességét nem korlátozta, és koherencia hosszát nem növelte az alkalmazott felül áteresztő szűrő, mely csak a gerjesztőfényt vágta ki. A rekonstrukció a második méréshez hasonlóan történt. A fonalas zöldalga képe és rekonstrukciója az alábbi 37. ábrán látható.



37. ábra Alga rekonstrukció. a) Hagyományos fluoreszcens kép. A narancssárga méretvonal hossza 200 μm . b) Fölvett hologram. c) Rekonstrukció, melyen nem csak a fonalas alga látható, hanem apróbb fluoreszcens algák is.

A rekonstrukcióban nem csak a fonalas zöldalga képe tűnik ki, hanem pár egyéb apró fluoreszcens algatöredék is észlelhető. Az autofluoreszcens fény sávszélességét mérésekből ismerve elmondható, hogy a gyűrűs bifokális lencse képes 14 μm koherencia hosszal rendelkező fényvel is önreferenciás holografikus képalkotásra.

6.6 Összefoglaló

Bebizonyítottam, hogy önreferenciás holográfiában alkalmazható a gyűrűs bifokális lencse. A lencse legyártásához olyan egyszerű optikai modellt használtam, mellyel a gyűrűs bifokális lencsének az optikai úthosszait méretezni lehetett, mely nélkülözhetetlen feladat kis koherenciájú holografikus képalkotás használatához. Továbbá a gyűrűs bifokális lencse alkalmazásával bebizonyítottam, hogy lehetséges olyan egy expozíciós hologramot előállítani,

melyből való rekonstrukció során a kép és az ikerkép a térben szétválik. Elméleti megfontolásaim bizonyításának eszközéül összeállítottam egy önreferenciás holografikus mikroszkópot, melyet egyszerűen, egy hagyományos mikroszkópba történő gyűrűs bifokális lencse beépítésével és a kamerapozíció beállításával értem el. Ezzel a berendezéssel végeztem fluoreszcens objektumok térfogati és egy expozíciós önreferenciás holografikus leképezését.

Kutatásom a GyBL fluoreszcens mérésekre való alkalmazhatóságának igen/nem kérdésére adott igen választ. Viszont a minőséget meghatározó tényezők és összefüggések újabb kutatásokat igényelnek. Így a képalkotás kielemezése révén, a képminőséget alakító paramétereket és összefüggéseket fel lehet tárni; a GyBL-ét más objektívekhez, így más felbontásra is lehet optimalizálni; és végül, de nem utolsó sorban, a segítségével megalkotott képrekonstrukció (akár neurális hálóval történő) képfeldolgozása révén is további eredményeket lehet -még csak elméletileg- elérni.

3. Tézis

Önreferenciás holografikus képalkotásra elsőként javasoltam gyűrűs bifokális lencse (GyBL) használatát. A GyBL-t megterveztem, és a gyártmányt beépítettem egy hagyományos mikroszkópba. A GyBL által rajzolt hologram gyűrű alakú. Mérésekkel igazoltam, hogy a GyBL alkalmas kis koherenciahosszú fénnel, mint például fluoreszcens fénnel is az önreferenciás holografikus képalkotásra, illetve, hogy a GyBL-vel megépített optikai rendszer a vele hasonló hagyományos leképezésű optikánál nagyságrenddel nagyobb mélységet is képes egy expozícióval átlátni. A gyűrűs hologramból való rekonstrukció síkjában a kép és az ikerkép térben szétválik, így azok nem fedik át egymást. Bebizonyítottam, hogy a GyBL alkalmazásával lehetőség nyílik egy egyszerű, kompakt, robusztus és olcsó önreferenciás holografikus mikroszkóp megépítésére.

Kapcsolódó folyóirat és konferencia publikációk: [F3, K3, K4]

7 Irodalom

7.1 A szerző szabadalmának gyűjteménye

[S1] **Kiss Márton**, Szatmári István, Orzó László, Göröcs Zoltán, Tőkés Szabolcs; "Háromdimenziós színes képet alkotó berendezés" HU000229591B1, 2011.

7.2 A szerző folyóirat publikációinak gyűjteménye

[F1] **M. Z. Kiss**, B. J. Nagy, P. Lakatos, Z. Göröcs, S. Tőkés, B. Wittner, and L. Orzó, "Special multicolor illumination and numerical tilt correction in volumetric digital holographic microscopy," *Opt. Express*, vol. 22, pp. 7559–7573, Apr 2014.

[F2] **M. Z. Kiss**, "Ring-shaped bifocal lens used for fluorescent self-referenced holographic imaging" EOS-JRP, 2016.

[F3] P. Bawuah, **M. Z. Kiss**, P. Silfsten, C.-M. Tåg, P. A. C. Gane, and K.-E. Peiponen, "Far infrared (THz) absorption spectra for the quantitative differentiation of calcium carbonate crystal structures: Exemplified in mixtures and in paper coatings," *Optical Review*, vol. 21, no. 3, pp. 373–377, 2014.

7.3 A szerző konferencia publikációinak gyűjteménye

[K1] Z. Göröcs, L. Orzó, **M. Kiss**, V. Tóth, and S. Tőkés, "In-line color digital holographic microscope for water quality measurements," 2010.

[K2] Z. Göröcs, **M. Kiss**, V. Tóth, L. Orzó, and S. Tőkés, "Multicolor digital holographic microscope (DHM) for biological purposes," in *BiOS*, p. 75681P, International Society for Optics and Photonics, 2010.

[K3] **M. Z. Kiss**, “A new compact self-referenced holographic setup tested on a fluorescent target,” in *Digital Holography & 3-D Imaging Meeting*, p. DTh1A.7, Optical Society of America, 2015.

[K4] **M. Kiss**, Z. Gorocs, and S. Tokes, “Self-referenced digital holographic microscopy,” in *Cellular Nanoscale Networks and Their Applications (CNNA), 2012 13th International Workshop on*, pp. 1–4, Aug 2012.

[K5] **M. Zs. Kiss**, “Proper autofocus for better particle measurements,” *International Society for Optics and Photonics, Practical Holography XXXIII: Displays, Materials, and Applications, (SPIE), pp 107-115, 2019*

7.4 Kapcsolódó publikációk

[1] D. Gabor *et al.*, “A new microscopic principle,” *Nature*, vol. 161, no. 4098, pp. 777–778, 1948.

[2] D. Gabor, “Microscopy by reconstructed wave-fronts,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 197, no. 1051, pp. pp. 454–487, 1949.

[3] P. Ferraro, S. Grilli, L. Miccio, D. Alfieri, S. D. Nicola, A. Finizio, and B. Javidi, “Full color 3-D imaging by digital holography and removal of chromatic aberrations,” *J. Display Technol.*, vol. 4, pp. 97–100, Mar 2008.

[4] F. Dubois, C. Yourassowsky, O. Monnom, J. Legros, O. Debeir, P. Van Ham, R. Kiss, and C. Decaestecker, “Digital holographic microscopy for the three-dimensional dynamic analysis of in vitro cancer cell migration,” *JBO*, vol. 11, p. 054032, 2006.

[5] Z. Göröcs and A. Ozcan, “On-chip biomedical imaging,” *Biomedical Engineering, IEEE Reviews in*, vol. 6, pp. 29–46, 2013.

[6] J. Garcia-Sucerquia, W. Xu, S. K. Jericho, P. Klages, M. H. Jericho, and H. J. Kreuzer, “Digital in-line holographic microscopy,” *Appl. Opt.*, vol. 45, pp. 836–850, Feb 2006.

[7] W. Bishara, T.-W. Su, A. F. Coskun, and A. Ozcan, “Lensfree on-chip microscopy over a wide field-of-view using pixel super-resolution,” *Opt. Express*, vol. 18, pp. 11181–11191, May 2010.

[8] A. F. Coskun, T.-W. Su, and A. Ozcan, “Wide field-of-view lens-free fluorescent imaging on a chip,” *Lab Chip*, vol. 10, pp. 824–827, 2010.

- [9] M. Habaza, B. Gilboa, Y. Roichman, and N. T. Shaked, “Tomographic phase microscopy with 180° rotation of live cells in suspension by holographic optical tweezers,” *Opt. Lett.*, vol. 40, pp. 1881–1884, Apr 2015.
- [10] I. Moon, M. Daneshpanah, B. Javidi, and A. Stern, “Automated three-dimensional identification and tracking of micro/nanobiological organisms by computational holographic microscopy,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 6, pp. 990–1010, 2009.
- [11] S. Grare, S. Coëtmelec, D. Allano, G. Grehan, M. Brunel, and D. Lebrun, “Dual wavelength digital holography for 3d particle image velocimetry,” *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*, vol. 10, no. 0, 2015.
- [12] X. Wu, S. Meunier-Guttin-Cluzel, Y. Wu, S. Saengkaew, D. Lebrun, M. Brunel, L. Chen, S. Coetmelec, K. Cen, and G. Grehan, “Holography and micro-holography of particle fields: a numerical standard,” *Optics Communications*, vol. 285, no. 13, pp. 3013–3020, 2012.
- [13] T. Agocs, T. Balogh, T. Forgacs, F. Bettio, E. Gobetti, G. Zanetti, and E. Bouvier, “A large scale interactive holographic display,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Virtual Reality, VR '06*, (Washington, DC, USA), pp. 311–, IEEE Computer Society, 2006.
- [14] D. Smalley, Q. Smithwick, J. Barabas, V. M. B. Jr, S. Jolly, and C. DellaSilva, “Holovideo for everyone: a low-cost holovideo monitor,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 415, no. 1, p. 012055, 2013.
- [15] J. Weng, T. Shimobaba, N. Okada, H. Nakayama, M. Oikawa, N. Masuda, and T. Ito, “Generation of real-time large computer generated hologram using wavefront recording method,” *Opt. Express*, vol. 20, pp. 4018–4023, Feb 2012.
- [16] Z. Göröcs, T. Sarkadi, G. Erdei, and P. Koppa, “Hologram positioning servo for phase-encoded holographic data storage systems,” *Appl. Opt.*, vol. 49, pp. 611–618, Feb 2010.
- [17] A. Glass, M. Cardillo, H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox, *Holographic data storage*, vol. 76. Springer, 2012.
- [18] Y.-H. Seo, H.-J. Choi, and D.-W. Kim, “Digital hologram encryption using discrete wavelet packet transform,” *Optics Communications*, vol. 282, no. 3, pp. 367 – 377, 2009.
- [19] Ábrahám György, ed., *Optika*. Panem Könyvkiadó, 2007.
- [20] A. Yariv, “Four wave nonlinear optical mixing as real time holography,” *Optics Communications*, vol. 25, no. 1, pp. 23 – 25, 1978.
- [21] M. Forshaw, “The imaging properties and aberrations of thick transmission holograms,” *Optica Acta: International Journal of Optics*, vol. 20, no. 9, pp. 669–686, 1973.

- [22] J.-H. Park, M.-S. Kim, G. Baasantseren, and N. Kim, “Fresnel and fourier hologram generation using orthographic projection images,” *Opt. Express*, vol. 17, pp. 6320–6334, Apr 2009.
- [23] G. A. Tyler and B. J. Thompson, “Fraunhofer holography applied to particle size analysis a reassessment,” *Optica Acta: International Journal of Optics*, vol. 23, no. 9, pp. 685–700, 1976.
- [24] C. Slinger, C. Cameron, and M. Stanley, “Computer-generated holography as a generic display technology,” *Computer*, vol. 38, no. 8, pp. 46–53, 2005.
- [25] U. Schnars and W. Jueptner, *Digital holography*. Springer, 2005.
- [26] C. Mann, L. Yu, C.-M. Lo, and M. Kim, “High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography,” *Opt. Express*, vol. 13, pp. 8693–8698, Oct 2005.
- [27] T. Shimobaba, Y. Sato, J. Miura, M. Takenouchi, and T. Ito, “Real-time digital holographic microscopy using the graphic processing unit,” *Opt. Express*, vol. 16, pp. 11776–11781, Aug 2008.
- [28] L. Orz , Z. Göröcs, I. Szatm ri, and Sz. T k s, “Gpu implementation of volume reconstruction and object detection in digital holographic microscopy,” in *Cellular Nanoscale Networks and Their Applications (CNNA), 2010 12th International Workshop on*, pp. 1–4, IEEE, 2010.
- [29] T. Shimobaba, J. Weng, T. Sakurai, N. Okada, T. Nishitsuji, N. Takada, A. Shiraki, N. Masuda, and T. Ito, “Computational wave optics library for C++: CWO++ library,” *Computer Physics Communications*, vol. 183, no. 5, pp. 1124–1138, 2012.
- [30] J. K hn, F. Charri re, T. Colomb, E. Cuche, F. Montfort, Y. Emery, P. Marquet, and C. Depeursinge, “Axial sub-nanometer accuracy in digital holographic microscopy,” *Measurement Science and Technology*, vol. 19, no. 7, p. 074007, 2008.
- [31] P. Marquet, B. Rappaz, P. J. Magistretti, E. Cuche, Y. Emery, T. Colomb, and C. Depeursinge, “Digital holographic microscopy: a noninvasive contrastimaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy,” *Opt. Lett.*, vol. 30, pp. 468–470, Mar 2005.
- [32] C. Liu, Z. Liu, F. Bo, Y. Wang, and J. Zhu, “Super-resolution digital holographic imaging method,” *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 17, pp. 3143–3145, 2002.
- [33] A. Greenbaum, N. Akbari, A. Feizi, W. Luo, and A. Ozcan, “Field-portable pixel super-resolution colour microscope,” *PLoS ONE*, vol. 8, p. e76475, 09 2013.

- [34] E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, “Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography,” *Appl. Opt.*, vol. 39, pp. 4070–4075, Aug 2000.
- [35] S. Lai, B. King, and M. A. Neifeld, “Wave front reconstruction by means of phase-shifting digital in-line holography,” *Optics Communications*, vol. 173, no. 1–6, pp. 155 – 160, 2000.
- [36] I. Yamaguchi, J. ichi Kato, S. Ohta, and J. Mizuno, “Image formation in phase-shifting digital holography and applications to microscopy,” *Appl. Opt.*, vol. 40, pp. 6177–6186, Dec 2001.
- [37] J. R. Fienup, “Phase retrieval algorithms: a comparison,” *Appl. Opt.*, vol. 21, pp. 2758–2769, Aug 1982.
- [38] A. Gerrard and J. M. Burch, *Introduction to matrix methods in optics*. Courier Corporation, 2012.
- [39] D. G. Voelz, *Computational fourier optics: a MATLAB tutorial*. Spie Press Bellingham, Wash, USA, 2011.
- [40] F. Shen and A. Wang, “Fast-Fourier-transform based numerical integration method for the Rayleigh-Sommerfeld diffraction formula,” *Appl. Opt.*, vol. 45, pp. 1102–1110, Feb 2006.
- [41] K. Matsushima and T. Shimobaba, “Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields,” *Opt. Express*, vol. 17, pp. 19662–19673, Oct 2009.
- [42] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*. Roberts and Company Publishers, 2005.
- [43] A. Greenbaum, A. Feizi, N. Akbari, and A. Ozcan, “Wide-field computational color imaging using pixel super-resolved on-chip microscopy,” *Opt. Express*, vol. 21, pp. 12469–12483, May 2013.
- [44] J.-M. Dese, P. Picart, and P. Tankam, “Digital three-color holographic interferometry for flow analysis,” *Opt. Express*, vol. 16, pp. 5471–5480, Apr 2008.
- [45] J. Zhao, H. Jiang, and J. Di, “Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless fourier transform holography,” *Opt. Express*, vol. 16, pp. 2514–2519, Feb 2008.
- [46] Z. Göröcs, L. Orzó, M. Kiss, V. Tóth, and S. Tóké, “In-line color digital holographic microscope for water quality measurements,” 2010.

- [47] Z. Göröcs, M. Kiss, V. Tóth, L. Orzó, and Sz. Tőkés, “Multicolor digital holographic microscope (DHM) for biological purposes,” in *BiOS*, p. 75681P, International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [48] W. Xu, M. Jericho, I. Meinertzhagen, and H. Kreuzer, “Digital in-line holography for biological applications,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, no. 20, pp. 11301–11305, 2001.
- [49] H.-J. Cho, D.-C. Kim, Y.-H. Yu, S. Shin, and W. Jung, “Tilt aberration compensation using interference patterns in digital holography,” *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 13, no. 4, pp. 451–455, 2009.
- [50] M. Zs. Kiss, B. J. Nagy, P. Lakatos, Z. Göröcs, Sz. Tőkés, B. Wittner, and L. Orzó, “Special multicolor illumination and numerical tilt correction in volumetric digital holographic microscopy,” *Opt. Express*, vol. 22, pp. 7559–7573, Apr 2014.
- [51] B. Nagy and S. Tőkés, “Study on application of reference conjugated hologram for aberration correction of multiple object planes,” in *2012 13th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications*, pp. 1–4, Aug 2012.
- [52] M. Zs. Kiss, “Digital image processing for surface mapping with mioiré technique,” No. G-2008-L-08, 6. Országos Gépészeti Konferencia - Gépészet 2008, 2008.
- [53] M. Zs. Kiss, Z. Göröcs, and Sz. Tőkés, “Self-referenced digital holographic microscopy,” in *Cellular Nanoscale Networks and Their Applications (CNNA), 2012 13th International Workshop on*, pp. 1–4, Aug 2012.
- [54] J. Rosen and G. Brooker, “Digital spatially incoherent fresnel holography,” *Opt. Lett.*, vol. 32, pp. 912–914, Apr 2007.
- [55] M. K. Kim, “Full color natural light holographic camera,” *Opt. Express*, vol. 21, pp. 9636–9642, Apr 2013.
- [56] L. Mertz and N. Young, “Fresnel transformations of images,” *SPIE milestone series ms*, vol. 128, pp. 44–49, 1996.
- [57] A. W. LOHMANN, “Wavefront reconstruction for incoherent objects,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 55, pp. 1555_1–1556, Nov 1965.
- [58] J. Rosen and G. Brooker, “Fluorescence incoherent color holography,” *Opt. Express*, vol. 15, pp. 2244–2250, Mar 2007.
- [59] G. Sirat and D. Psaltis, “Conoscopic holography,” *Opt. Lett.*, vol. 10, pp. 4–6, Jan 1985.

- [60] P. WANG, “Self-interference low-coherent digital holography by engineered volume holographic pupils,” in *Digital Holography & 3-D Imaging Meeting*, p. DT3A.7, Optical Society of America, 2015.
- [61] Y. Wan, T. Man, and D. Wang, “Incoherent off-axis fourier triangular color holography,” *Opt. Express*, vol. 22, pp. 8565–8573, Apr 2014.
- [62] A. Kozma and N. Massey, “Bias level reduction of incoherent holograms,” *Appl. Opt.*, vol. 8, pp. 393–397, Feb 1969.
- [63] J. Rosen and R. Kelner, “Modified lagrange invariants and their role in determining transverse and axial imaging resolutions of self-interference incoherent holographic systems,” *Opt. Express*, vol. 22, pp. 29048–29066, Nov 2014.
- [64] B. Katz, J. Rosen, R. Kelner, and G. Brooker, “Enhanced resolution and throughput of fresnel incoherent correlation holography (finch) using dual diffractive lenses on a spatial light modulator (slm),” *Opt. Express*, vol. 20, pp. 9109–9121, Apr 2012.
- [65] M. Zs. Kiss, “A new compact self-referenced holographic setup tested on a fluorescent target,” in *Digital Holography & 3-D Imaging Meeting*, p. DTh1A.7, Optical Society of America, 2015.