

SHACK-HARTMANN HULLÁMFRONT-SZENZOR ÉPÍTÉSE

Antalicz Balázs
SZTE Eötvös Loránd Kollégium
SZTE TTIK Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Köszönetnyilvánítás

A dolgozat elkészítéséhez iránymutatást és egyes esetekben segítséget kaptam témavezetőmtől, Dr. Börzsönyi Ádámtól és kollégájától, Kovács Mátétól, akiknek ezúton is szeretnék köszönetet mondani. Emellett külön is meg szeretném köszönni Dr. Börzsönyi Ádámnak azt, hogy a rendelkezésemre bocsátotta a szimuláció elvégzéséhez szükséges programot, amely segítségével elvégezhettem a dolgozatomban szereplő szimulációkat.

Köszönet illeti Dr. Sergei Kühnt és Arjun Nayakot a pellicle nyalábosztók rendelkezésre bocsájtásáért.

Köszönetet szeretnék nyilvánítani ezen kívül a TeWaTi, valamint a HeLiOS laborok munkatársainak, amiért a munkámat lehetővé tették.

1 Bevezetés

Lézerrendszereket egyre nagyobb számban alkalmaznak az élet számos területén, például kutatási, ipari, orvosi célokra. Az ezen rendszerek által kibocsátott lézerefény egyik legfontosabb jellemzője a fókuszálhatóság, azaz, hogy mennyire közelíthető meg a diffrakció-elmélet által meghatározott minimális foltméret. Ez a foltméret akkor érhető el egy ideális lencse fókuszában, ha a lencse előtt a lézer hullámfrontja, vagyis az időben azonos fázisú pontok térbeli alakját egy időpontban leíró felület tökéletes sík- vagy gömbfelület. Különösen nagy a jelentősége a fókuszálhatóságnak nagy intenzitású lézerrendszerek esetében: a nagy térerősséggel rendelkező fényimpulzusok ugyanis térben és időben könnyen torzulhatnak a

terjedésük során fellépő effektusok és leképzési hibák következtében. Ezek a hibák torzítják a lézernyaláb hullámfrontját, egyúttal csökkentve az elérhető maximális intenzitást.

Egy nyaláb hullámfrontjának mérése tehát fontos feladat, mert a torzult hullámfrontú nyalábok fókuszálhatósága romlik. Ez az elérhető csúcshintenzitás csökkenése mellett általános esetben megnövekedett fókuszoltmértetet, illetve egyes esetekben a fókuszolt alakjának megváltozását jelenti. A valós és az ideális esetben elérhető maximális csúcshintenzitások arányát a Strehlszámmal szoktuk jellemezni (1).

A hullámfront mérésére számos módszert, valamint ezeket felhasználó szenzort dolgoztak már ki. A leginkább elterjedt szenzortípusok közé tartozik a görbületérzékelő szenzor (2), a többsugaras interferométer (3), illetve a Shack–Hartmann szenzor (4). Ezek közül a legrégebben ismert a görbületérzékelő szenzor, később a Shack–Hartmann szenzor, míg végül a többsugaras interferométerek alkalmazása terjedt el.

A Shack–Hartmann szenzor az 1960-as években került kifejlesztésre, és vált a modern hullámfrontmérés megkerülhetetlen eszközévé. Flexibilitása és a teljes látható fénytartományban való működőképessége miatt gyakran alkalmazzák csillagászati távcsövek és lézerrendszerek tesztelésénél, valamint lézeres szemműtétéknél.

2 Célkitűzések

Kutatási tevékenységem keretében egy a lézernyalábok hullámfronttorzulásainak vizsgálatát lehetővé tévő szenzor megépítését tűztem ki célul. Szenzortípusként a Shack–Hartmann szenzort választottam, mely kedvező tulajdonságai miatt közkedvelt szenzortípus.

A szenzor megépítése, valamint a meghajtó szoftver megtervezése és fejlesztése után a szenzor tesztelését szerettem volna elvégezni. A mért adatokat kiértékelő szoftver megbízhatóságát ellenőrizendő, tesztelésnek vettem azt alá. Ennek során nevezetes képtorzulásokkal rendelkező fény terjedését vizsgáltam a szenzor segítségével, és összehasonlítottam a szimuláció bemeneti hullámfrontjait a szoftver által kiszámoltakkal.

Az összeszerelt szenzort szerettem volna tesztelni is, így összehasonlítottam egy kereskedelemben kapható változattal, melyhez az ELI-ALPS

munkatársai révén juthattam hozzá. Az összehasonlítás során a két szenzorra ugyanazon nyalábot vezettem egy nyalábosztó kocka segítségével.

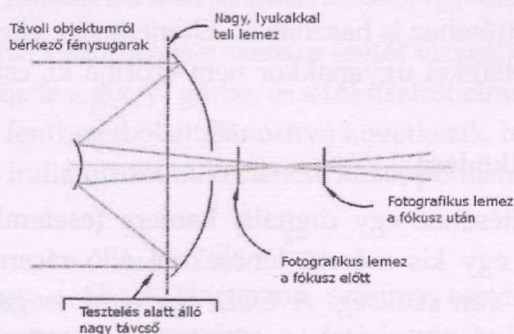
Mivel a Shack-Hartmann szenzorok aktív felülete általában pár mm², szoftveres segítség vagy – már önmagában aberrációkat okozó – teleszkóprendszer nélkül nem alkalmasak nagyméretű optikai elemek hullámfront-torzulásának megállapítására. Ilyen szoftveres kiegészítés azonban egyik gyári szenzorhoz sem érhető el, így ezt ki szerettem volna fejleszteni. Ennek segítségével egy egyedi gyártású optikai elem, a – többnyire diszperziómentes nyalábosztásra használt – vékony optikai hártya (ún. *pellicle*) kísérleti vizsgálatát is elvégeztem. A mérés elvégzéséhez a hártya teljes felületét végigpásztáztam a szenzorral, majd a mérési eredményeket szoftveresen összeillesztettem, megkapva a teljes felületen mérhető hullámfronttorzulást.

3 A Shack-Hartmann szenzor

3.1 Történeti áttekintés

A Shack-Hartmann szenzor kifejlesztését megindító probléma (4) az 1960-as években jelentkezett: műholdakat a Földről fényképezve a képek minőségét az atmoszféra aktuális állapota jelentősen limitálta.

A légkör által keltett aberrációk méréséhez akkoriban a 3.1. ábrán látható Hartmann-tesztet alkalmazták. A teszt abból állt, hogy a beérkező fény lefokuszálás után egy lyukakkal teli lemezen ment keresztül, amelyről a fókusz előtt és után képet készítve megadható a beérkező fény hullámfrontjának torzulása.



3.1. ábra: Korabeli Hartmann-teszt felépítése (4)

A fenti technika azonban nem hozott megfelelő eredményeket, mert a műholdak vizsgálata esetén a fénynyalábok által hagyott foltok túl homályosak lettek. Dr. Roland Shack, aki részt vett a tanulmány elkészítésében, azzal az ötlettel állt elő, hogy a lemezen lévő lyukakat lencsékre cseréljék le, így csökkentve a fotografikus lemezen megjelenő foltok méretét és egyúttal növelve az intenzitásukat. Az új elrendezésben két fotolemez helyett egy is elegendő. A beérkező hullámfront torzulásának köszönhetően a lencsék által létrehozott kép a fókuszsíkban kimoszdul egy síkhullám képéhez képest, amiből visszaszámolható a beérkező fény hullámfrontja.

Akkoriban azonban még nem álltak rendelkezésre az ehhez szükséges lencsék, így Shacknak magának kellett ezeket legyártania. Az ilyen lencsék legyártásához szükséges gépet hosszas próbálkozás után sikerült megterveznie és megépítenie. A következő 5 évben a világon az összes ilyen lencsesor Dr. Shack feleségének konyhájában készült, a Dr. Shack által készített öntőformával.

A szenzor az elnevezését 1984-ben kapta Ray Wilsontól. Ray Wilson munkája során az európai déli obszervatóriumok teleszkópjait vizsgálta, és azok beállításait korrigálta a szenzor segítségével. Wilson az erről írt cikkének egy másolatát elküldte Shacknak, és hálája jeléül 'Shack-Hartmann szenzornak' nevezte el az eszközt.

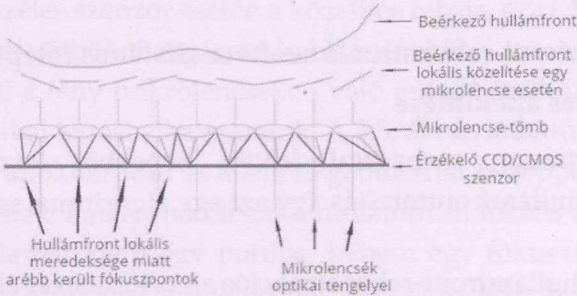
A szenzor kiforrottsága és jó alkalmazhatósága miatt az egyik legelterjedtebb hullámfrontszenzor típus. A szenzort lézerek és félvezető köröngök vizsgálatától lézeres szemműtéteken át valódi háromdimenziós fényképek elkészítéséhez is használják. Elterjedtsége ellenére a hagyományos interferométereket ugyanakkor nem szorítja ki, csupán kiegészíti a használatukat.

3.2 A szenzor működése

A szenzor felépítéséhez egy digitális kamera (esetemben CCD típusú szenzor) mellett egy kis méretű lencséből álló rácsra, avagy angolul *microlens-array*-re van szükség. A CCD egy eltoló segítségével éppen a mikrolencsék fókuszsíkjába pozícionálható. A beérkező hullámfront lokális meredekségétől függően az egyes mikrolencsék fókuszfoltjai eltolódnak a

Shack-Hartmann hullámfront-szenzor építése

mikrolencsék optikai tengelyeihez képest. A folyamat jobb megértéséhez segítséget a 3.2. és 3.3. ábra adhat.

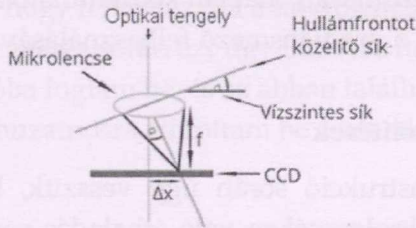


3.2. ábra: Shack-Hartmann típusú hullámfrontszenzor működésének vázolata

Ha megvizsgáljuk egy lencse fókuszfoltjának elmozdulását, akkor a fenti, egydimenziós esetben azt kapjuk, hogy Δx elmozdulás és m meredekség kapcsolata közt a 3.3. ábra alapján az

$$m = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta x}{f} \quad (1)$$

kapcsolat áll fenn, ahol f a mikrolencsék fókusz távolsága, α pedig az optikai tengelyre merőleges sík és a hullámfrontot közelítő sík által bezárt szög.



3.3. ábra: Hullámfront adott pontjának leképzése egy mikrolencsével

Amennyiben a kétdimenziós szenzor esetét vizsgáljuk, a beérkező hullámfelületet írja le a $g(x, y)$ görbe, és a fókuszfolt elmozdulása legyen Δr . Ekkor a fenti esetből általánosítva következik, hogy a következő állítás lesz igaz a hullámfront mikrolencse középpontjánál mérhető gradiensére:

$$\nabla g = \frac{\Delta r}{f} \quad (2)$$

Azt kaptuk, hogy a Shack-Hartmann szenzor esetén a fókuszfoltok elmozdulása egyenesen arányos a beérkező hullámfront lokális gradiensével.

Az elmozdulást egy referencia síkhullámmal felvett képhez képest kell számolni, valamint figyelembe kell venni a szenzor pontos fizikai paramétereit is.

3.3 Egy hullámfront-rekonstruáló szoftver általános felépítése

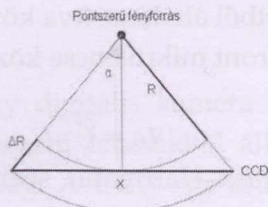
3.3.1 A működés áttekintése

A Shack–Hartmann szenzorral felvett képekből közvetlenül nem olvasható le a hullámfronttorzítás, így azt egy algoritmus segítségével kell kiszámítani.

Egy ilyen hullámfront-rekonstrukciós algoritmusnak először meg kell határoznia az egyes mikrolencsék által létrehozott fókuszfoltok közepét a teszt- és referenciaképeken. Ezt követően ezeket a pontokat, valamint a mikrolencséket össze kell párosítanunk egymással. Ezt legkönnyebben úgy tehetjük meg, ha egy olyan rácsot illesztünk az egyes képeken lévő pontokra, hogy annak alakja követi a mikrolencsékét; ez többnyire téglalap alakú rácsot jelent. A teszt- és a referenciaképeken az illesztett rácsok segítségével párosítsuk össze az egyes pontokat, majd az egymáshoz képest vett relatív elmozdulásaik alapján kiszámítható a hullámfront lokális gradiense. Végezetül a gradiensmező felhasználásával visszaállíthatjuk a hullámfrontot.

3.3.2 Felhasznált közelítések

A hullámfront-rekonstrukció során úgy vesszük, hogy a hullámfront időben állandó a mikrolencséken való áthaladás során. A gyakorlatban azonban nem az, ezt a 3.4. ábra szemlélteti egy pontszerű fényforrás esetére: a bejövő gömb alakú hullámfront görbületi sugara az apertúrán való áthaladás során megnövekszik.



3.4. ábra: Geometriai viszonyok a számolási példához

Az ábra segítségével könnyen kiszámolható, hogy a pontszerű fényforrás milyen távolsága esetén okoz ez a közelítés 1%-os hibát. Azt kapjuk, hogy egy kb. 9 mm széles szenzor esetén a közelítés hibája, azaz $\Delta R/R$ minden 3 cm-nél nagyobb görbületi sugárra kisebb, mint 1%.

Ezen kívül a fény mikrolencséken való terjedésének modellezéséhez geometriai optikai leírást alkalmazunk. A 3.3. ábrán látható geometriai közelítés alapján a fókuszpont és a lencse geometriai középpontja egy olyan egyenesen vannak, amely merőleges a hullámfront lokális érintősíkjára. A fény a gyakorlatban nem egy pontba, hanem egy fókuszfoltba fókuszálódik. A folt középpontja a felhasznált paraxiális közelítés érvényességi tartományán belül megegyezik a geometriai közelítés esetén számolt fókuszponttal.

Ezen kívül feltételezzük a mikrolencse-rács és a CCD pixeleinek egyenletességét, illetve a lencsék fókusztávolságainak egyenlőségét. Elhanyagoljuk a fókusztávolságok hullámhosszfüggését is. A fókusztávolság névleges értékével való egyezésről mérés útján is meggyőződünk, és feltételezhetjük, hogy minden megegyezik az adatlapon feltüntetett értékekkel.

Szükséges még, hogy feltételezzük a mikrolencsék és a CCD síkjainak párhuzamosságát. A mérés során ezt úgy biztosítottam, hogy a mikrolencséket egy tűkörtartóba fogtam be, és az abban található finomállító csavarok segítségével párhuzamosra állítottam be a két síkot.

4 Új eredmények

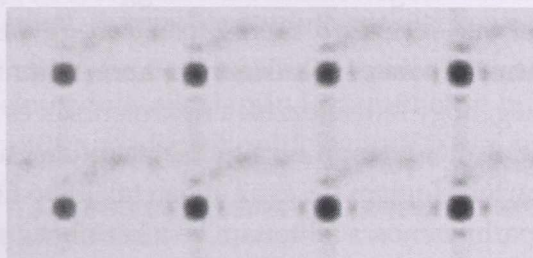
Az általam épített Shack-Hartmann-szenzorhoz először hullámfront-rekonstrukciós szoftvert kellett fejlesztenem, mivel egyedi építésű szenzorokhoz nem érhető el kiértékelő szoftver. A szoftver fejlesztését a folyamat felgyorsítását szem előtt tartva MATLAB környezetben végeztem el (r2014a verzió). A MATLAB környezet előnyös a mátrixműveletek kezelésére, azonban hátránya, hogy a futási sebesség lassú, így a kiértékelő szoftver nem képes valós időben kielemezni a szenzor jeleit.

4.1 Az algoritmusok megvalósítása

4.1.1 Foltkeresés implementációja

A foltkereséshez a LoG [Laplacian of Gaussian] módszert alkalmaztam. A módszer lényege, hogy a képen először egy Gauss-harang segítségével konvolúciót hajtunk végre, majd a kapott adatsoron a Laplace operátort alkalmazzuk. A foltok negatív csúcsokként jelennek meg, így ezeket keressük a szoftver segítségével.

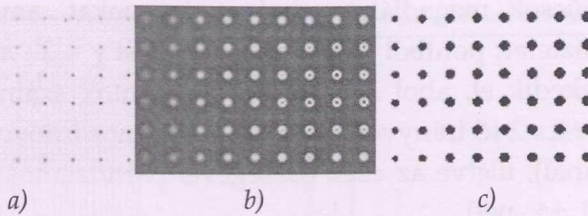
A módszer az elmosás miatt ideális választás, hiszen kiküszöböli a felvett képek zaját, valamint a változó nagyságú háttérbevilágítást, amely a szenzor környezetének fényviszonyaiból fakad. Emellett a mikrolencsék kis apertúrájából és sajátos geometriájából fakadóan a fókuszfoltok körüli kisebb fényességű mellékmaximumokat is elmossa. Ezen jelenségeket jól mutatja a 4.1. ábra.



4.1. ábra: A CCD-n megjelenő foltok háttérbevilágítással és mellékfoltokkal (invertálva) Megfigyelhető a környezet miatti bevilágítás, illetve a foltok körüli mellékmaximumok

A fenti eljárás végrehajtása után a nagy negatív csúcsokat egy küszöbértékkel levágjuk: a küszöb alatt 1-nek, felette 0-nak vesszük a képen az adatpontok értékeit. Ekkor fekete alapon fehér foltok állnak a rendelkezésünkre. A MATLAB beépített, *realcentroids* nevű függvényének segítségével megkeresem ezek középpontjait, majd azokat felhasználva az eredeti felvételen a középpontok környezetében lévő tömb elemeire Gauss-görbét illesztünk. Ezen Gauss-görbék középpontjai lesznek a keresett fókuszpontok.

Shack-Hartmann hullámfront-szenzor építése

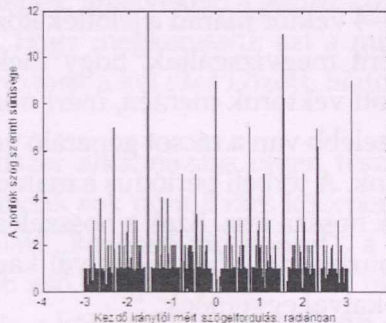


4.2. ábra: A kép feldolgozásának egyes fázisai: nyers kép ((a) invertálva), a kép LoG művelet utáni állapot (b), majd azon foltok, amelyek megmaradtak az elemzést követően (c)

4.1.2 Rács illesztése a pontokra

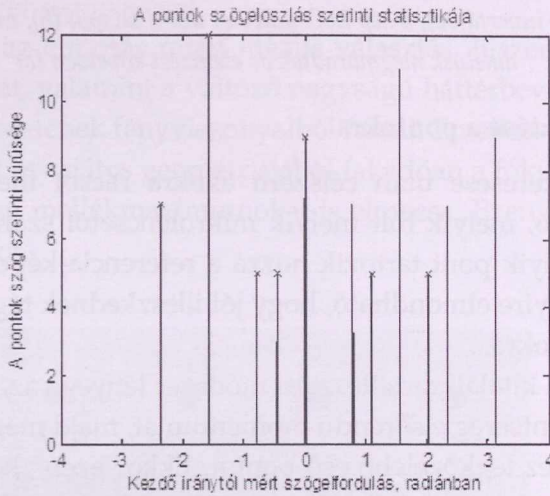
A foltok megkeresése után célszerű azokra rácsot illeszteni, amellyel meghatározható, melyik folt melyik mikrolencsétől származik, valamint az is, hogy melyik pont tartozik hozzá a referencia-képen. A felhasznált képekről többnyire elmondható, hogy jól illeszkednek téglalap elemekből felépíthető rácsokra.

Az általam kitalált rácsillesztési módszer lényege az, hogy megkeresünk az adott pontsereg elsőrendű momentumát, majd megkülönböztetetté tesszük az ehhez legközelebb eső pontot. Ekkor ezen „középpont” körül szögeloszlás szerinti statisztikát készítünk a többi pontról, majd kiválasztjuk a 6–8 legnagyobb csúcsot. Ezzel kiszűrjük a ráctól eltérő, „abnormális” pontok többségét. Ugyanakkor ez az eljárás érzékeny tud lenni képtorzulásokra, mint hordó- vagy párna-torzítás, vagy kóma.



4.3. ábra: A pontok szögeloszlás szerinti statisztikája

Ekkor a csúcok megadják azokat az irányokat, amelyek mentén a megkülönböztetett pontból nézve az adott kicsi $\chi = 2 \cdot \pi / N$ szögben sok pont helyezkedik el, ahol $N+1$ az összes pontok száma. Ilyen irányok tipikusan a rács 2 fő irányvektorával párhuzamos irányok (az ábrán pl. 0 és $-\pi$ radiánnál), illetve az ezek összegével párhuzamos „átlóirányok” (a 4.3. ábrán pl. $\pm\pi/2$ -nél).

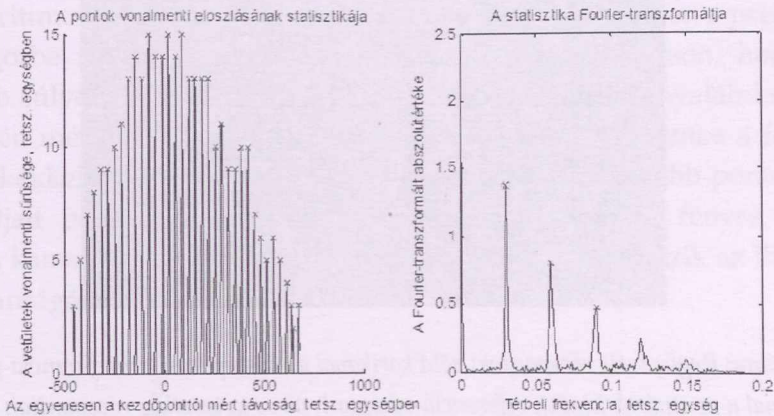


4.4. ábra: Az előző statisztika; a kisebb értékeket szelektálása és az antiparallel irányok kihagyása után

Ez után ezen irányok közül kell kiválasztani, hogy melyek a rács fő irányai. Szűrés után átlagosan 3–4 vektor marad a jelöltek közül.

Következő lépésként megvizsgáljuk, hogy mekkora a pontsokaság térbeli periódusa az adott vektorok mentén, mert minél nagyobb ez a térbeli periódus, annál közelebb van a rácsot generáló vektorok irányához az az irány, amit vizsgáltunk. A térbeli periódus a maradék kettő, a rácsot valóban generáló vektorok hossza lesz. Ezek a hosszak a pontok eloszlásából készített statisztikák Fourier-transzformálásaival kapott függvények első maximumainak reciprokaival egyenlőek.

Shack-Hartmann hullámfront-szenzor építése



4.5. ábra: A pontok vetületének statisztikája térbeli (a) és frekvenciabeli (b) függésben
A zöld karika a kiválasztott térbeli frekvenciát jelöli

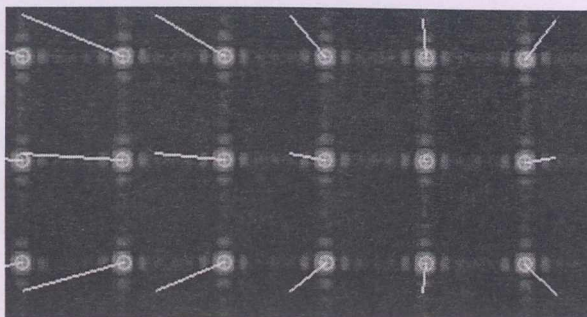
Ezen algoritmus jól működik az általam vizsgált képek nagy részén; azonban például erősen asztigmatikus nyalábok esetén, amelyeket szimuláció segítségével generáltam, nem működik tökéletesen.

4.1.3 Rácsok összeregisztrálása

Erre a feladatra kettő algoritmust is írtam, amelyek közül a program maga választja ki, hogy melyiket használja.

Az első, rácsregisztrációs módszer a <3%-os eltérésű rácsvektorokkal rendelkező rácsok esetén kerül felhasználásra, és olyan tesztképek regisztrálását is lehetővé teszi, amelyekben sok rácspon sötét, mint a *pellicle* pásztázása során felvett képek, amelyeknél a *pellicle* közepe kitakarja a fényt. A módszer lényege az, hogy megkeressük azt a minimális eltolás-rácsvektort, amely átfedést biztosít a két rács között, biztosítva a szoftver további működését.

A második módszer alkalmazása olyan tesztképek esetén célszerű, amelyeknél nem hiányzik sok pont a rács közepéről. Ennek során a tesztképen a fentebb taglalt „középső rácsponot”, a referencia-képen pedig az ehhez legközelebb eső rácsponot keressük meg. Ekkor keressük azt az rács-eltolást, amely a környező pontok között a legközelebbi pontpárt eredményezi. Ennek megtalálása után a mátrixok párosítása indexelés segítségével történik meg.



4.6. ábra: Regisztrált rácspontok: zöld karikával az összepárosított referencia-pontok, vonal a pontpárok között, referencia-rácspont: piros x , tesztkép rácspontjai: kék x

4.1.4 A gradiens-mező kiszámítása

Miután összepárosítottuk a teszt- és referenciaképek egyes foltjait, az (1) képlet segítségével kiszámolva megkapjuk a hullámfront lokális gradiensét (2). Ehhez a pixeleken mért elmozdulásvektort egy pixel méretével kell megszoroznunk, majd elosztanunk a fókusztávolsággal.

4.1.5 Hullámfront visszaállítása gradiensből

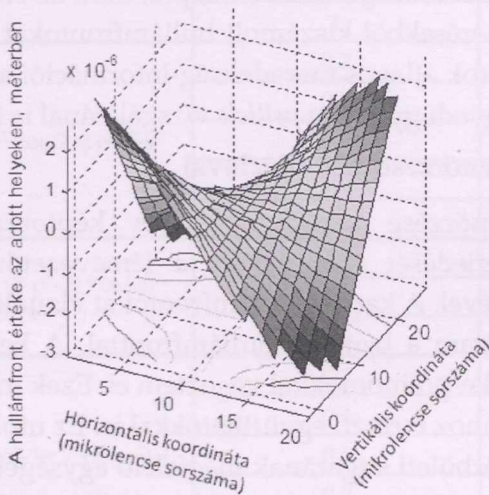
A hullámfront visszaállításához korábban használatos technikák közé sorolandóak az ún. *Poisson-solverek* (5). Ezek használata azonban szisztematikus hibákat eredményezett a visszaállított felületben (6).

Alternatív megközelítést adott a probléma megoldásához Matthew Harker és Paul O'Leary, akik egy véges differencia-módszerekből számolható gradiensmezőnek a mért gradiensmezőtől való eltéréseinek négyzetösszegét minimalizáló eljárást dolgoztak ki (7). Ehhez hasonló algoritmus kerül felhasználásra az általam fejlesztett kiértékelő szoftverben is.

Ez utóbbi olyan gradiensmezőkből tud hullámfrontot kiszámolni, amelyekben a gradiensmező egy téglalap alakú rács néhány pontjában, egy egybefüggő területen ismert. Az algoritmus működése során ugyanazt az F gradienskülönbség négyzetösszeget minimalizálja, mint a Harker-O'Leary algoritmus, csak nincs megkötés az ismert rácspontok síkbeli alakjára nézve. Könnyen alkalmazható tehát az algoritmus kör keresztmetszetű nyalábokra is.

Shack-Hartmann hullámfront-szenzor építése

Az algoritmus kiegészíthető úgy is, hogy egyes pontok esetén a precízebb Gauss-görbe illesztésnek nagyobb jelentőséget tulajdonítson, hozzájuk nagyobb súlyokat rendeljen. Például, amennyiben a lézernyaláb keresztmetszetén mérhető intenzitáseloszlása nem homogén, hasznos a fényesség-értékekkel súlyozni az egyes pontokat, mert a fényesebb pontok középpontjait pontosabban tudjuk meghatározni. Kevésbé fényes foltok esetén a kamera zajának hatása többek között megmutatkozik az illesztés pontatlanságában is.



4.7. ábra: Szimulált asztigmias nyaláb kiszámolt hullámfrontja;
jól látható a tipikus nyeregfelület

Az x - és y -tengelyeken az egyes mikrolencsék sorszámaát jelölő koordináták láthatóak

4.2 Pásztázó üzemmód

A szoftver fejlesztése mellett új implementáció a pásztázó üzemmód is. Az üzemmód lényege, hogy az egyes mérések adatait állítja össze egy adatsorrá, amely olyan, mintha egy mérésből kaptuk volna. Ezután a kapott adatsor alapján készíti el a pásztázott optikai elem hullámfronttorzítását. A pásztázás során az egyszerűség kedvéért az optikai elem mozog, a kamera és a nyaláb állandóan ugyanazon helyzetben van. Referenciaként a vizsgálandó elem betétele előtti nyalábot alkalmazzuk.

Az egyes mérési eredmények összeillesztésére kétféle üzemmódot is alkalmaztam. Az első mód lényege, hogy olyan sok mérési adatunk van, hogy azok az optikai elem minden pontját legalább kétszer-háromszor is lefedik. Ekkor az egyes mérések során a gradiensmezők összeilleszthetőek, amelyek felhasználásával az optikai elem teljes felületén kiszámítható a hullámfronttorzítás.

A második módszer akkor alkalmazható jól, ha az egyes mérések nem fedik le az optikai elem teljes felületét, de még összeérnek a szélükön. Itt nem fogunk olyan minőségű felületet kapni, mint az előző esetben. Ennek során az egyes mérésekből kiszámolt hullámfrontokat illesztjük össze az egyes hullámfrontok átlagos meredekség-információi alapján. A pásztázó üzemmódot az egyedi gyártású *pellicle* vizsgálatánál is felhasználtam.

4.3 A szoftver ellenőrzése szimulációval

A szoftver ellenőrzése során nevezetes képtorzulásokra jellemző hullámfrontok terjedését szimuláltam a témavezetőm által biztosított program segítségével. A kapott hullámfrontokat vizuálisan és számolással is összehasonlítottam a bemenő hullámfronttal. A bemenő hullámfront generálását Zernike-polinomokkal végeztem el. Ezek megtalálhatóak az 1. táblázatban, az ahhoz tartozó együtthatókkal is. Ez utóbbit a hullámhossz és hullámfront görbületi sugarának megfelelő egységekben tüntettem fel, amely esetünkben 800 nm volt. A táblázatban ezen kívül megtalálható még a hullámfront-rekonstrukció mért zaja, hullámhossz egységekben. Ez a számolt és a modellezéshez felhasznált hullámfrontok különbségének standard deviációjának és a felhasznált fény hullámhosszának arányaként kapható meg. A Zernike-polinomok polár- (ρ, φ) és derékszögű-koordinátákban (x, y) is meg vannak adva. A hullámfelületek kiszámításánál 5. fokú polinomokból generáltam a véges differencia formulákat. A modellezés a jelenleg használt elrendezés adatai alapján történt.

Shack-Hartmann hullámfront-szenzor építése

1. táblázat: Az egyes képtorzulások esetén a bemeneti paraméterek és mért zaj-értékek összehasonlítása

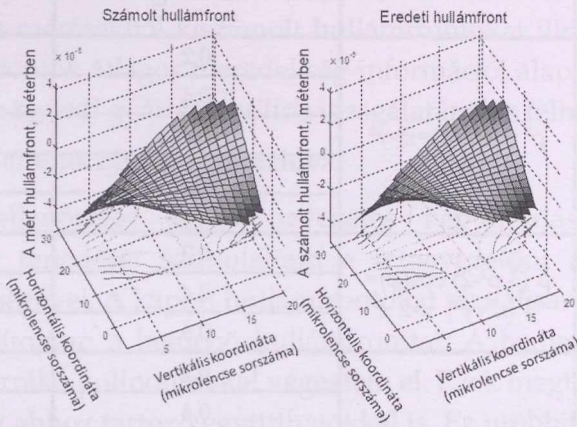
Képtorzulás	Zernike-polinomok	Zernike-polinom együtthatója (λ/r_g egys.)	Mért zaj- (hullámhossz-egységekben)
Dőlés (x tengely mentén)	$\rho \cos(\varphi)=x$	0,2	0,0785
		0,4	0,0806
		0,6	0,0875
		0,8	0,0708
		1	0,0793
Asztigmia (0°)	$\rho^2 \cos(2\varphi)=x^2-y^2$	0,2	0,0762
		0,4	0,0707
		0,6	0,0797
		0,8	0,0862
		1	0,0818
Kóma (x tengely mentén)	$\rho \cdot (3\rho^2-2) \cos(\varphi)=3(x^2+y^2) - x-2x$	0,2	0,0779
		0,4	0,1032
		0,6	0,1327
Defókuszálódás	$2\rho^2-1=2(x^2+y^2)-1$	0,2	0,0700
		0,4	0,0732
		0,6	0,0975
		0,8	0,0896
		1	0,0951

Az 1. táblázat alapján látszik, hogy az eredmények kiválóan egyeznek.

A táblázatból kiolvasható szórás kérdését érdemes körüljárni. A 4.1.5 részben ismertetett algoritmus pontossága ugyanis nagyban függ attól, hogy mekkora a rácsok méretéhez képest a visszaállítani kívánt felület görbületi sugara. A szoftver vizsgálata során azt kaptam, hogy annak a feltétele, hogy egy szinusz-függvényt érdemben, <2%-os hibával tudjunk rekonstruálni, 6-7 mérési pontnak kell esni egy teljes periódusra. Itt egyes helyeken elértük ezt a határt a nagy görbületű hullámfrontok vizsgálata esetén. Ennél több mérési pont/periódus esetén a pontosság drasztikusan megnő, a duplájánál már csak milliomod rész.

A szórás meglétének másik forrása pedig az, hogy a kamera szenzorán meglehetősen sok pixelre jut egy fókuszfolt, ami megnehezítheti azoknak a pontos behatárolását a nem teljesen gaussos intenzitáseloszlás miatt.

A fenti pontatlanság azonban nem szisztematikus, hanem lokális pontatlanságot takar. A hullámfelület alakra megegyezik a vizsgált hullámfronttal, azonban a véges differenciás formulának köszönhetően a számolt felület egy kicsit „hullámzik”. Ez a „hullámzás” okozza a fentebb említett szórást a két hullámfront között.



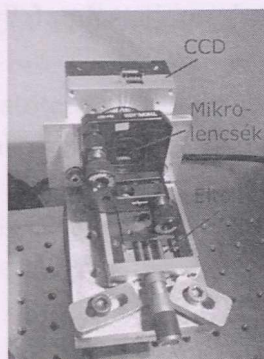
4.8. ábra: A számolt és a bemeneti hullámfrontok összehasonlítása

4.4 Kísérleti összeállítás és mérési eredmények

4.4.1 Kísérleti összeállítás

A felhasznált kamera XIMEA MR285MU-BH típusú, 6,45 μm -es pixelmérettel, 1392 \times 1040 pixeles felbontással és 2/3"-es képszélességgel. A felhasznált mikrolencserács Thorlabs MLA300-14AR(-M) típusú, 300 μm -es oldalhosszú lencsékkel, négyzet alakú rácsformával és 100%-os apertúra-kitöltöttséggel. A lencsék egy tükörtartóban helyezkednek el, amelyet egy eltolóra szereltem fel. A kamera és a lencsék egy közös lapra vannak csavarozva. A tükörtartó finomhangoló csavarjainak és az eltoló segítségével a mikrolencsék helyzete beállítható a szenzorhoz képest. A szenzor a 4.9. ábrán látható.

Shack-Hartmann hullámfront-szenzor építése



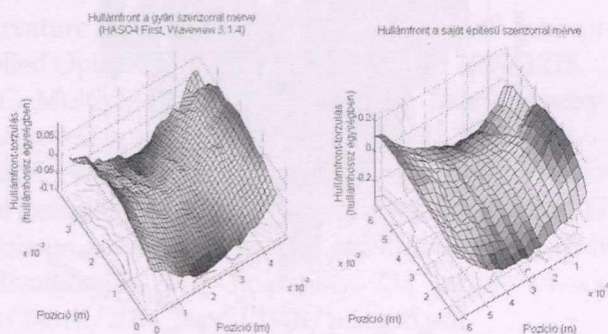
4.9. ábra: Az egyedi gyártású szenzor, előtében a mikrolencsék az eltolóra szerelve

Az összehasonlítás alapjául szolgáló gyári hullámfrontszenzor *Imagine Optic Haso First* típusú, 100 μm -es oldalhosszú lencsékkel, négyzet alakú rácsformával, 7,3 μm -es pixelmérettel.

A mérések elvégzése során fényforrásként egy hélium-neon lézert alkalmaztam, amelynek hullámhossza 632,8 nm.

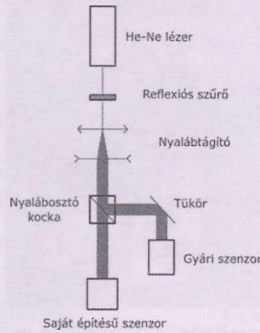
4.4.2 Ellenőrzés gyári SH szenzorral

A gyáriszenzorral való ellenőrzés során megkíséreltem előidézni ugyanazon jelenségeket mind a két szenzor esetén. Ehhez tekintsük a lenti, 4.10. ábra két oldalán látható, asztigmias hullámfrontokat. Az összehasonlítás során érdemes figyelembe venni a szenzorok különböző fizikai méreteiből fakadó különbségeket a hullámfront-torzítások összehasonlítása során.



4.10. ábra: a gyári és a saját hullámfrontszenzor által mért adatok vizuális összehasonlítása

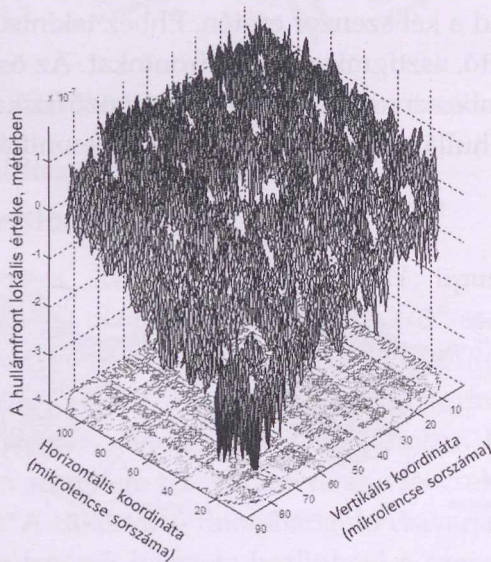
A 4.11. ábra a szenzorok összehasonlításához felhasznált optikai elrendezést mutatja meg.



4.11. ábra: a szenzorok összehasonlításához felhasznált elrendezés

4.4.3 Egyedi gyártású pellicle felületének hullámfronttorzítása

A kutatás során különféle hártya-nyalábosztók, azaz *pellicle*-k hullámfronttorzítását is vizsgáltam az ELI-ALPS munkatársaival. A kérdéses *pellicle*-ket is végigpásztáztam a szenzor segítségével, majd a kapott képeket össze is illesztettem a 4.2 fejezetben leírt második módszer segítségével.



4.12. ábra: Egyedi gyártású pellicle hullámfronttorzítása

A 4.12. ábrán jól látszik, hogy az egyedi gyártású *pellicle* csak a legszélén (a felőlünk lévő sarkán, ebbe bele is vág az apertúra) torzítja a hullámfrontot. A *pellicle* a közepén található erősen reflexív rétegnél viszont nem torzítja a hullámfrontot. Az ábra alapján a *pellicle* csupán néhány tíz nanométerrel, avagy a hullámhossz kb. 3-5%-ával változtatja meg a hullámfrontot. A látható zaj a hullámfront-rekonstrukciós algoritmustól fakad, azonban nem rontja számottevően a megfigyelhető jelenséget.

5 Összefoglalás

Kutatásom során építettem egy Shack-Hartmann szenzort, amellyel optikai elemek által okozott, lézerrendszerekben előforduló hullámfronttorzulásokat vizsgáltam. Független szimulációk és tesztek segítségével demonstráltam az általam fejlesztett kiértékelő szoftver helyes működését. A szenzort össze is hasonlítottam egy kereskedelemben kapható szenzorral. Emellett megvizsgáltam egy egyedi gyártású, nyalábosztásra használt *pellicle* hullámfronttorzítását a teljes felületén. A *pellicle* átmérője egy inches, így ez előrelépés a jelenleg kapható szenzorok néhány milliméter szélességű aktív felületéhet képest.

Irodalomjegyzék

- S.-W. Bahk, P. Rousseau, T. A. Planchon V. Chvykov, G. Kalintchenko, A. Maksimchuk, G. A. Mourou, V. Yanovsky. Generation and characterization of the highest laser intensities (1022 W/cm²). Optics Letters. 2004., Volume 29. kötet, old.: 2837-2839.
- Roddier, F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics. Applied Optics 27. 1988. 7, 271. kötet, old.: 1223-1225.
- Chanteloup, J-C. Multiple-wave lateral shearing interferometry for wave-front sensing. Applied optics. 2005. 9, 44. kötet, old.: 1559-1571.
- Platt, B. C./Shack R. History and Principles of Shack-Hartmann Wavefront Sensing. Journal of Refractive Surgery. 2001. Szeptember/Október, 17. kötet, old.: 573.
- McLean, W. Poisson solvers. Homepage of Northwestern University. [Online] 2004. [Hivatkozva: 2016. november 25.] http://www.cs.northwestern.edu/~jet/Teach/2004_3spr_IBMR/poisson.pdf.
- Harker, M./O'leary, P. Least Squares Surface Reconstruction from Measured Gradient Fields. Computer Vision and Pattern Recognition. 2008.

- Harker, M./O'Leary, P. Least squares surface reconstruction from gradients: Direct algebraic methods with spectral, Tikhonov, and constrained regularization. IEEE Explore. 2011.
- Vohnsen, B./Valente, D. Surface-plasmon-based wavefront sensing. Optica. 2015., 2. kötet.
- M. Pittman, S. Ferré, J.P. Rousseau, L. Notebaert, J.P. Chambaret, G. Chériaux. Design and characterization of a near-diffraction-limited femtosecond 100-TW 10-Hz high-intensity laser system. Applied Physics B. 2002., 74. kötet, old.: 529-535.



X 272088