

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
MECHATRONIKA, OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI INFORMATIKA
TANSZÉK

TDK DOLGOZAT

Deflektometriás felületazonosítás
legkisebb négyzetek módszere segítségével

Készítette: Kocsis Péter
Konzulens: Dr. Antal Ákos

Budapest
2013

Absztrakt

A folyamatosan fejlődő műszaki tudományok terén egyre fontosabb szerepet tölt be az alkatrészek pontossága, így növekvő igény van a roncsolásmentes vizsgálati módszerekre. Ezeknek köszönhetően az alkatrészek paramétereit érintés nélkül határozhatjuk meg, így a mérés előtti és utáni adatok megegyeznek, méréseink precízebbé válnak. Ezen eljárások közül választottam ki munkám témájának a deflektometriás felületvizsgálati módszert. Adott struktúrát tartalmazó ernyőről a vizsgálandó felület képet alkot, amely tartalmazza a felületre jellemző tulajdonságokat. Túlhatározott esetben az eredményt approximációs módszerrel nyerjük. Ez esetben a struktúrát minden képnél adott fázisértékkel toljuk el és ismert matematikai módszerek segítségével az eredeti felületet rekonstruáljuk.

Dolgozatom célja egy olyan rendszer kialakítása, amely gyorsan és pontosan határozza meg az optikai felületek tulajdonságait, mindezt jó automatizáltsági fok mellett. Az irodalomkutatáshoz felhasználtam már meglévő eredményeket referenciának, majd elkészítettem a saját szoftveremet. Ügyeltem az ergonomikus, felhasználóbarát kezelésre, valamint számításba vettem többféle operációs rendszert is. A program futtatásához összeállítottam a modellt és eltérő valós felületeken végeztem el a kísérleteket. A mérési eredményeket összefoglaltam és kiértékeltem. A jó automatizáltság bemutatására elkészítettem saját prototípus konstrukciót, amelyet először Solidworks segítségével lemodelleztem és el is készítettem, majd az ezen végzett kísérletek eredményeit is összevetettem az előzőkkel.

Abstract

The accuracy of the components has increasing importance on the field of the continuously developing technical science, that is why we need non-destructive examination methods. Due to them we can define the parameters of the components without any touch, so the data before and after the measurement are the same, our measurements will be more precise. I chose the deflectometric surface shape method as the subject of my work. From the umbel with given structure the analysed surface produces a picture, which contains the property of the surface. In overdetermined case the result will be count with approximation. In this case we shift the structure with given phase and reconstruct the original surface with the help of mathematic techniques.

The purpose of my research is creating a system, which can define the attributes of optical surfaces in a fast and precise way, while it is also well automatable. I used extant results to the literary research as referencies and I created a software for the experiment's purpose. I took care of the ergonomic and user-friendly handling, and I considered several other operating systems. I created a model to run the program and applied the system to measure real surfaces, then I recapitulated the results and assessed them. For the presentation of the automatableness I created a prototype with Solidworks and made it in reality, then I compared the results of the experiment with the previous ones.

Tartalom

1. Bevezetés.....	5
2. A deflektometria bemutatása.....	6
2.1. Mérési elrendezés	6
2.2. Fázislépéses és a legkisebb négyzetek módszere szerinti algoritmusok összehasonlítása	6
2.3. A legkisebb négyzetek módszerét használó algoritmus alkalmazása.....	7
2.3.1 Általános algoritmus fázis kiemelésére, ismert számú fáziseltolással	8
2.3.1.1. Példa általános algoritmusra négy képpel	9
2.3.2. Inverz algoritmus ismert fáziseloszlásokkal	11
2.3.2.1. Példa inverz algoritmusra négy képpel	12
2.3.3. A random fázisváltás ismétléses eljárása	13
2.4. Felület visszaállítása adott fáziseloszlásból.....	14
2.5 Fázis unwrap.....	16
3. A Szoftver megvalósítása.....	17
3.1. A program felépítése	17
3.1.1. Képek beolvasása.....	17
3.1.2. Iteráció előkészítése	18
3.1.3. Ismétléses eljárás	19
3.1.4. Felület visszaállítása	19
3.2.Szoftver tesztelése	19
4. Mérések leírása, eredmények kiértékelése	22
4.1. Laborbeli, illetve otthoni kísérletek.....	22
4.1.1. Mérés összeállítása.....	22
4.1.2. Aszférikus optikai lencse vizsgálata	23

4.1.3. Görbületi sugár meghatározása számítással.....	26
4.1.4. Görbületi sugár meghatározása méréssel.....	27
4.1.5. Síktükör vizsgálata.....	29
4.2. Mérés prototípussal.....	31
5. Mérések kiértékelése, javítási lehetőségek.....	34
6. Összefoglalás.....	34
Köszönetnyilvánítás	35
A mérés során használt eszközök, szoftverek	35
Irodalomjegyzék.....	36

1. Bevezetés

A mérés technika tudománya évek óta fontos szerepet játszik az iparban a minőségellenőrzés területén. Módszerek és eszközök összessége, amellyel olyan mennyiségekről szerezhethetünk tudomást amit érzékszerveinkkel nem tudunk érzékelni. A mérésekkel meghatározhatunk valamilyen folyamatot jellemző mennyiséget vagy tulajdonságot[1-4].

A növekvő pontosság irányába tendáló fejlődés elengedhetetlenné tette a roncsolásmentes vizsgálatok erősödését[5,6]. A háromdimenziós felületek elemzésénél az optikai felületvizsgálati módszerek számos előnnyel rendelkeznek, mint például a jó automatizálhatóság, gyors eredmény, valamint a roncsolásos vizsgálatokkal szemben, a mérés előtti és utáni értékek megegyeznek, így a hiba értéke minimalizálódik. Mindazonáltal a vizsgálandó felületek gyakran valamilyen speciális tulajdonsággal rendelkeznek, amelyek nehezítik a felületvizsgálati módszerek alkalmazhatóságát, ilyen például a tükröződés.

A diffúzon reflektáló felületek vizsgálatához számos módszert ismertet az irodalom, például a sztereóérzékelés[7] vagy a rácsvetítés[8,9]. Tükröződő felületeknél azonban különösen nehéz feladatot jelent a tetszőleges alakú felszín elemzése, mivel magát a felületet nem látjuk, csak a róla visszavert fényt tudjuk érzékelni. Ilyen felülettel rendelkezők közé sorolhatók a tükrök, szemüveglencsék, aszférikus lencsék, fényszórók, lakkozott alkatrészek, polírozott fém tárgyak és forrasztott kötések.

Előnynek tűnhet, hogy a reflektáló felületek szabad szemmel is elemezhetőek, mivel a felületi hibák eltérő visszaverődést generálnak, így zavaró jelként érzékeli a szemünk. Ez a módszer viszont lassú és pontatlan, így szükségeszerű más, hatékonyabb eljárásokat keresni[10-77]. Ezekre az irodalom számos példát sorakoztat fel, amelyek közül választottam ki az egyik leghatékonyabb eljárást, a deflektometriát.

2. A deflektometria bemutatása

2.1. Mérési elrendezés

A deflektometria egy olyan interferometriai eljárás, amely során szinuszosan változó csíkokat vetítünk a vizsgálandó felületre és ott a felület alakjának megfelelően torzulnak el. A csíkok előállításához Sinus programot használtam, a prototípusnál a Windows képernyőfelvétel funkciója segítségével mentettem le az adott csíkszerkezetet, amelyet aztán a céleszköze továbbítottam. A programban beállítható, a periódusonkénti pixelszám illetve a vonalak eltolása. A laborbeli kísérletek során CRT monitort és LCD monitort is használatba vettem, az otthoni mérésekhez pedig Samsung Tablet kijelzőjét használtam fényforrásnak.

Munkám célja reflektáló felületek vizsgálata, így a mérés tárgyának egy síktükör és egy optikai lencsét választottam. A szinuszos csíkozást célobjektumra vetítettem, ahol a párhuzamos vonalak a felületi görbületnek megfelelően fognak torzulni, majd ezt követően a kamera detektorába jutnak. A laborbeli méréseknél felhasználtam egy képelkapókártyás kamerát, azonban bizonyos görbületi sugár alatt, a szórás nagysága miatt már nem volt képes maximum apertúra mellett sem elég fényt befogni, így a méréshez jobb képalkotó eszközt kerestem. Végül a kamera szerepét egy digitális fényképezőgép töltötte be, az otthoni mérésekhez pedig egy Samsung Galaxy mobiltelefont használtam. Az elkészült fényképeket számítógép segítségével dolgoztam fel.

2.2. Fázislépéses és a legkisebb négyzetek módszere szerinti algoritmusok összehasonlítása

A deflektometriás vizsgálatokon belül is számos módszert ismert az irodalom, amelyekben a matematikai módszerek alkotják a különbséget. Egyes eljárások határozottak, adott képszámmal, adott eltolással, esetleg adott távolságokkal dolgoznak, míg mások kötetlenebbek, így automatizálhatóságuk könnyebben megoldható.

Korábbi években készült már egy TDK a deflektometriás felületleképezésekről, ahol a fázislépéses algoritmus dominált[78]. Az eljárás bár hasznos, a maga módján kezdetleges, sok javítási lehetőség lehetne alkalmazható. Szigorú kötöttségek jellemzik, mint a képek száma, adott fázistolás, melyek időt és energiát vehetnek el a felhasználótól. Az eljárás alapfeltevése

a következő: négy képet készítünk a céltárgyról, minden képnél adott távolsággal toljuk arrébb a csíkokat, majd az így készült négy képet a program beolvassa, majd leképezi a felületet. Ez az eljárás laboratóriumi körülmények között közelítően pontos eredményt hozott, ám ipari környezetben számolni kell azzal, hogy a fáziseltolás nagysága eltérhet a megadottól, esetleg eggyel több vagy kevesebb kép kerül feldolgozásra, így a hiba értéke már nem lesz elfogadható.

Ezekre a problémákra keres megoldást a legkisebb négyzetek módszerét használó iteráló algoritmus[79,80]. Nincs szükség előre definiálni sem a képek számát, sem a fázistolás mértékét, ugyanis az iteráló rész korrigálja az esetleges hibákat, ezáltal a zajjelektől nem mentes ipari környezetbe is átültethető ez az eljárás.

2.3. A legkisebb négyzetek módszerét használó algoritmus alkalmazása

Az előzőleg ismertetett okokból kifolyólag előszeretettel használják a legkisebb négyzetek módszerét használó algoritmust deflektometriás képeknél. Az interferogram intenzitása kifejezhető

$$I_{ij} = A_{ij} + B_{ij} * \cos(\phi_j + \delta_i)$$

módon, ahol

I - az interferogram intenzitása

i - az i-edik fáziseltolás képe

(i=1,2,3...M)

j - az egyes pixelek helye mindegyik képen (j=1,2,...N)

A_{ij} - háttér- vagy átlagintenzitás

B_{ij} - modulációs amplitúdó

Φ_j - fázisszöginformáció

δ_i - gerjesztett fáziseltolás mértéke

A fent említett képletből látszik, hogy $2MN+N+M$ ismeretlenünk van, így közvetlen módon nem lehetséges az ismeretlenek meghatározása, ezért szükséges iterációs algoritmust választanunk. Ez az iteráció minden körben ismeretlenek különböző csoportjait oldja fel, így a feladat megoldható. A módszer alapfeltevése, hogy a becsült elméleti intenzitás és a mért

intenzitás közötti különbségek négyzetösszege egy előre meghatározottan kicsit határértékhez konvergál. A random fáziseltolások ismétléses eljárásához szükséges ismertetni a módszer két fő műveleti elemét: egy általános algoritmust valamint egy inverz algoritmust.

2.3.1 Általános algoritmus fázis kiemelésére, ismert számú fáziseltolással

Az elfogadott fáziseltolási eljárás igényli mind a fáziseltolások mértékét, mind az egyenletes eloszlást, ezért elfogadott a feltevés, hogy a háttérintenzitásoknak és a modulációs amplitúdóknak csak intra-frame (pixeltől pixelig) variációi vannak. Ebből adódóan "i" ismeretével 3M számú ismeretlen kiesésével egyenletünk 3N-re csökkent, így a meglévő MN egyenletünk segítségével a rendszer határozottá vagy túlhatározottá válik, az ismeretlenek könnyen számolhatók.

A hagyományos fáziseltolások algoritmus általános alapelve szerint ha Φ_j ismert és egyenletesen osztott, akkor beszélhetünk a fázismegoszlás explicit megfogalmazásáról. Azonban sok esetben az ismert fáziseltolások mellett az eloszlás véletlen, az explicit megoldás nem célravezető, így megoldást jelenthet a problémára a klasszikus legkisebb négyzetek módszere, amely alkalmazható határozott és határozatlan egyenletrendszeri problémák megoldására is.

Az eljárás alkalmazásához szükségeszerű a változók egy új csoportját definiálni az

$$I_{ij} = a_j + b_j * \cos \delta_i + c_j * \sin \delta_i$$

egyenlet szerint, ahol

$$a_j = A_{ij}$$

$$b_j = B_{ij} * \cos \phi_j$$

$$c_j = -B_{ij} * \sin \phi_j$$

Az elméleti és kísérleti intenzitás közötti hiba meghatározható a legkisebb négyzetek módszerével

$$S_j = \sum_{i=1}^M (I_{ij} - I_{ij}^e)^2 = \sum_{i=1}^M (a_j + b_j * \cos \delta_i + c_j * \sin \delta_i - I_{ij}^e)^2$$

módon, ahol

I_{ij}^e - az interferogram kísérletből mért intenzitása

Az egyenletből látszik, hogy a fent említett változókkal való deriválás értéke zérus

$$\frac{\partial S_j}{\partial a_j} = 0, \frac{\partial S_j}{\partial b_j} = 0, \frac{\partial S_j}{\partial c_j} = 0$$

ami alapján:

$$\begin{bmatrix} M & \sum_{i=1}^M \cos(\delta_i) & \sum_{i=1}^M \sin(\delta_i) \\ \sum_{i=1}^M \cos(\delta_i) & \sum_{i=1}^M \cos^2(\delta_i) & \sum_{i=1}^M \cos(\delta_i) \sin(\delta_i) \\ \sum_{i=1}^M \sin(\delta_i) & \sum_{i=1}^M \cos(\delta_i) \sin(\delta_i) & \sum_{i=1}^M \sin^2(\delta_i) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_j \\ b_j \\ c_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M I_{ij}^e \\ \sum_{i=1}^M I_{ij}^e * \cos(\delta_i) \\ \sum_{i=1}^M I_{ij}^e * \sin(\delta_i) \end{bmatrix}$$

Az egyenlet segítségével az ismeretlenek meghatározhatóak és kifejezhető a fázisszög is, mint

$$\Phi_j = \tan^{-1} \left(\frac{-c_j}{b_j} \right).$$

A fáziseloszlás legkisebb négyzet meghatározásáról a fenti algoritmus gondoskodik, amikor a fáziseltolás mértéke pontosan ismert. Ez a kikötés kiküszöbölhető az univerzális eljárással, ami a hagyományossal szemben nem igényli a fázisok mértékének egyenletes eloszlását, ezenfelül a feldolgozási folyamata megegyezik a hagyományoséval. A következőkben példákon keresztül mutatom be az általános algoritmus működését.

2.3.1.1. Példa általános algoritmusra négy képpel

Az eljáráshoz az előzőleg leírt mátrix szorzás adja a magot, amelyből b_j és c_j meghatározása a célunk. A kezdeti feltételeink szerint a képeink száma $M=4$, N pedig a vizsgált tartomány pixelszáma. Ez az érték megfelelhet a kép x tengely menti pixelek számának, azonban a gyorsabb és biztosabb eljárás érdekében érdemes meghatároznunk x_1

kezdő- és x_2 végértéket, amelyek között helyezkedik el a vizsgálandó intenzitásvektor, vagyis $N=x_2-x_1$. Az I_{ij}^e intenzitásmátrix meghatározására számos mód nyílik, én a gyors számolási eredmények miatt a Matlab-ot preferálom, azonban bármilyen program használható, amivel adott képből kiolvasható a pixelenkénti intenzitásérték. Fontos figyelni arra, hogy a vizsgálandó kép fekete-fehér legyen, ugyanis a színes kép 3 dimenziós mátrixot képez.

Az ismeretlenjeink száma három vektorra csökkent, a feladat megoldása a következőképpen modellezhető, szemléltetés gyanánt tetszőlegesen meghatározott adatok szerint:

$$M=4$$

$$N=100$$

$$\delta_i = \begin{bmatrix} 0,1 \\ 0,2 \\ 0,3 \\ 0,4 \end{bmatrix} [rad]$$

$$I_{ij}^e = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 12 & \dots & 20 \\ 12 & 13 & 13 & \dots & 18 \\ 11 & 13 & 14 & \dots & 18 \\ 12 & 12 & 13 & \dots & 19 \end{bmatrix}$$

I_{ij}^e esetében 4×100 tagú mátrixot kell elképzelni, ahol az egyes sorok pontjait összekötő görbe körülbelül szinuszos alakot vesz fel, a torzulás mértéke a felülettől függ.

Legyen

$$Di = \begin{bmatrix} 4 & \sum_{i=1}^4 \cos(\delta_i) & \sum_{i=1}^4 \sin(\delta_i) \\ \sum_{i=1}^4 \cos(\delta_i) & \sum_{i=1}^4 \cos^2(\delta_i) & \sum_{i=1}^4 \cos(\delta_i) \sin(\delta_i) \\ \sum_{i=1}^4 \sin(\delta_i) & \sum_{i=1}^4 \cos(\delta_i) \sin(\delta_i) & \sum_{i=1}^4 \sin^2(\delta_i) \end{bmatrix}$$

$$Vj = \begin{bmatrix} a_j \\ b_j \\ c_j \end{bmatrix} \quad Ii = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 I_{ij}^e \\ \sum_{i=1}^4 I_{ij}^e * \cos(\delta_i) \\ \sum_{i=1}^4 I_{ij}^e * \sin(\delta_i) \end{bmatrix},$$

ekkor fennáll a $\underline{\underline{Di}} * \underline{\underline{Vj}} = \underline{\underline{Ii}}$, ahonnan $\underline{\underline{Vj}} = inv(\underline{\underline{Di}}) * \underline{\underline{Ii}}$, ami egy háromsoros mátrix, amelyből a második és harmadik sor meghatározásával megkapjuk a_j és b_j változókat és

$$\Phi_j = \tan^{-1} \left(\frac{-c_j}{b_j} \right)$$

módon meghatározható a fázisszöginformáció.

2.3.2. Inverz algoritmus ismert fáziseloszlásokkal

Az általános módszer lehetőséget ad a fáziseloszlások mértékének meghatározására, ezáltal definiálhatunk egy inverz algoritmust a fáziseltolások deklarálására is. Az általános eljáráshoz hasonlóan az inverz módszerben ugyancsak élünk egy elfogadott feltevessel, ami esetünkben megadja, hogy a háttérintenzitások és a modulációs amplitúdók képtől képig variációkkal rendelkeznek, de állandóak minden egyes képen (inter-frame variations), azaz $A_{i1} = A_{i2} = \dots = A_{iN} = A_i$ és $B_{i1} = B_{i2} = \dots = B_{iN} = B_i$ az alapegyenletünkben. Ez a kikötés újabb határozottságot eredményez, így $3M+N$ -re csökken az ismeretlenek száma, ami a fázis ismeretével tovább redukálódik $3M$ -re. A továbbra is fennálló MN felhasználható egyenlettel a rendszer túlhatározottá válik és az előzőhöz hasonlóan legkisebb négyzetek módszere alkalmazható az ismeretlenek meghatározására.

Definiáljuk a változók egy új csoportját minden egyes képre, mint

$$\begin{aligned} a_i' &= A_{ij} \\ b_i' &= B_{ij} * \cos \delta_i \\ c_i' &= -B_{ij} * \sin \delta_i, \end{aligned}$$

amelyekkel az alapegyenletünkéből egyszerűen meghatározható az intenzitás

$$I_{ij} = a_i' + b_i' * \cos \phi_j + c_i' * \sin \phi_j$$

formában.

A legkisebb négyzetek hibája az i -edik kép minden pixeléből halmozódik és leírható mint

$$S_j' = \sum_{i=1}^N (I_{ij} - I_{ij}^e)^2 = \sum_{i=1}^M (a_i' + b_i' * \cos \phi_j + c_i' * \sin \phi_j - I_{ij}^e)^2.$$

Ha ϕ_j ismert, akkor az a_j' , b_j' és c_j' ismeretlenek meghatározhatóak a

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{j=1}^N \cos(\phi_j) & \sum_{j=1}^N \sin(\phi_j) \\ \sum_{j=1}^N \cos(\phi_j) & \sum_{j=1}^N \cos^2(\phi_j) & \sum_{j=1}^N \cos(\phi_i)\sin(\phi_j) \\ \sum_{j=1}^N \sin(\phi_j) & \sum_{j=1}^N \cos(\phi_i)\sin(\phi_j) & \sum_{j=1}^N \sin^2(\phi_j) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_i' \\ b_i' \\ c_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N I_{ij}^e \\ \sum_{j=1}^N I_{ij}^e * \cos(\phi_j) \\ \sum_{j=1}^N I_{ij}^e * \sin(\phi_j) \end{bmatrix}$$

módon, ahonnan

$$\delta_i = \tan^{-1} \left(\frac{-c_i}{b_i} \right).$$

Ez az eljárás tekinthető az univerzális fáziseltolások algoritmus inverz műveletének. A tipikus fáziseltolás elemzésében az inverz algoritmus alkalmazható megerősítésként a fázisváltások mértékéhez és az újonnan észlelt fáziseltolás mértéke felhasználható, hogy azok bemenete alkalmazkodjon az adott analízishez. Ez az eljárás segít a fáziskiemelés pontosságának növelésében. Eképpen definiálható a random fáziseltolás előrehaladott ismétléses eljárása (AIA).

2.3.2.1. Példa inverz algoritmusra négy képpel

Az eljárás nagyon hasonló az általános algoritmusával, célunk b_i' és c_i' , és ezeken keresztül δ_i meghatározása. A képek számának (M), a fázisszögvektornak (ϕ_j) és az intenzitásmátrixnak (I_{ij}^e) ismeretében ismeretlenjeink száma 3 vektorra csökkent, amik a fenti mátrixszorzat átrendezésével könnyen meghatározhatók.

Az adatokat esetünkben szemléltetés céljából tetszőlegesen veszem fel:

$$M=4$$

$$N=100$$

$$\phi_j = [-3,6 \quad -3,7 \quad -4,5 \quad \dots \quad 1,1]$$

$$I_{ij}^e = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 12 & \dots & 20 \\ 12 & 13 & 13 & \dots & 18 \\ 11 & 13 & 14 & \dots & 18 \\ 12 & 12 & 13 & \dots & 19 \end{bmatrix}$$

ϕ_j -t tetszőlegesen adtam meg formai szemléltetés céljából

I_{ij}^e -re az általános algoritmusban leírt feltételek vonatkoznak

Legyen

$$Dj = \begin{bmatrix} 100 & \sum_{j=1}^{100} \cos(\phi_j) & \sum_{j=1}^{100} \sin(\phi_j) \\ \sum_{j=1}^{100} \cos(\phi_j) & \sum_{j=1}^{100} \cos^2(\phi_j) & \sum_{j=1}^{100} \cos(\delta_i) \sin(\phi_j) \\ \sum_{j=1}^{100} \sin(\phi_j) & \sum_{j=1}^{100} \cos(\delta_i) \sin(\phi_j) & \sum_{j=1}^{100} \sin^2(\phi_j) \end{bmatrix}$$

$$Vi = \begin{bmatrix} a_i' \\ b_i' \\ c_i' \end{bmatrix} \quad Ij = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{100} I_{ij}^e \\ \sum_{j=1}^{100} I_{ij}^e * \cos(\phi_j) \\ \sum_{j=1}^{100} I_{ij}^e * \sin(\phi_j) \end{bmatrix},$$

Ekkor $\underline{Dj} * \underline{Vi} = \underline{Ij}$, ahonnan $\underline{Vi} = inv(\underline{Dj}) * \underline{Ij}$, ami ugyancsak egy háromsoros mátrix, amelynek második és harmadik sorát kiemelve megkapjuk b_i' és c_i' változókat és

$$\delta_i = \tan^{-1} \left(\frac{-c_i'}{b_i'} \right)$$

módon meghatározhatjuk a fáziseltolások értékét.

2.3.3. A random fázisváltás ismétléses eljárása

A két algoritmus ismeretében levezethető egy ismétléses eljárás, ami egyidejűleg határozza meg a fáziseloszlásokat és a fáziseltolásokat a véletlenszerűen fáziseltolt interferogramokból. Az AIA három lépést tartalmaz minden egyes iterációs körben. Az általános meghatározáshoz a k-adik ismétlést vezetem le:

1. Lépés - Alkalmazzuk az univerzális fáziseltolási algoritmust, azaz meghatározzuk ϕ_j^{k-1} ($j = 1, 2, 3 \dots N$) fáziseloszlásokat, a δ_i^k ($i = 1, 2, 3 \dots M$) fáziseltolásokon alapulva, amit az előző ismétléses körből kaptunk meg, vagyis (k-1)-ediket. Az első ismétléses körhöz nem szükséges a fáziseltolások kezdeti feltevése, mivel reális kereteken belül bármilyen véletlen értékeket felvehet. A valós értékektől való túlzott eltérés ronthatja az eredményeket, esetenként értelmezhetetlenné tehet az algoritmus során használt matematikai lépéseket.

2. Lépés - Ismert ϕ_j^{k-1} ($j = 1, 2, 3 \dots N$) fáziseloszlásokkal, felhasználva az inverz fáziseltolási algoritmust meghatározzuk a frissített fáziseltolásokat δ_i^k ($i = 1, 2, 3 \dots M$).

3.Lépés - Ellenőrizzük, hogy az ismétlések eredménye vajon kielégíti-e a konvergencia kritériumot. Ez a relatív fáziseltolás értékeivel valósítható meg, ahol a kritérium megadható, mint

$$|(\delta_i^k - \delta_1^k) - (\delta_i^{k-1} - \delta_1^{k-1})| < \varepsilon, \quad i = 2, 3 \dots M,$$

ahol ε a pontosság előre meghatározott küszöbe, vagyis 10^{1-6} . Ha a konvergencia kritérium teljesül, akkor ϕ_j^{k-1} ($j = 1, 2, 3 \dots N$) és δ_i^k ($i = 3, 4, 5 \dots M$) a végleges fáziseloszlási és fáziseltolási értékek. Másrészt az algoritmus ismétlődik amíg a kritérium nem teljesül.

2.4. Felület visszaállítása adott fáziseloszlásból

A felület rekonstruálásához szükségünk van a meredekség meghatározására. Ehhez használjuk fel az iterációs algoritmusból definiált fázisszögvektort. Az 1. ábrából látszik, hogy a fázis és a felület meredeksége között egyértelmű összefüggés áll fenn[24], amit

$$\phi_j = d * \tan(2 * \alpha)$$

módon számolhatunk, ahol

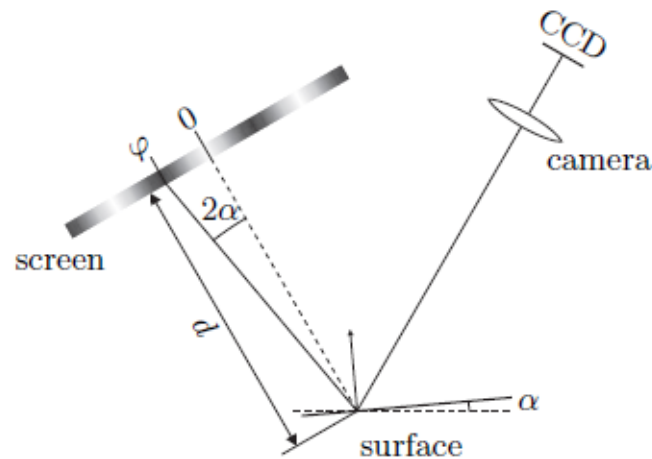
ϕ_j – az interferogram egy pixelének fázisa

d – a képernyő és a felület közötti távolság

α_j – a felület meredeksége egy adott pontban.

A felület meredeksége ebből egy egyszerű átrendezéssel meghatározható, mint

$$\frac{\tan^{-1}\left(\frac{\phi}{d}\right)}{2} = \alpha$$



1.ábra - felület meredekségének meghatározása

A meredekség ismeretében már rekonstruálható a felület, integrálási folyamattal. A meredekséget matematikailag derivált értéknek feleltetjük meg, amelyen numerikus integrálás alkalmazunk[81].

Ehhez az eljáráshoz kézenfekvő a négylépéses Runge-Kutta módszer[82,83]. Ez az eljárás a Runge–Kutta-módszercsalád legelterjedtebb változata, alkalmazásakor a következő kezdetiérték-probléma egy negyedrendű közelítő megoldását adja:

$$\begin{aligned} y'(t) &= f(t, y(t)) \\ y(t_0) &= y_0 \end{aligned}$$

Ez a feltevés annyit jelent, hogy tetszőleges, tipikus esetben kicsi h ($h \in \mathbf{R}^+$) esetén az n -edik lépésben a t_n helyen ($t_n = t_0 + n \cdot h$) a kezdetiérték-probléma egy olyan $y(t_n) \approx y_n$ közelítését adja, amely közelítés hibája negyedrendű. Az $y(t)$ megoldásfüggvény meghatározásához szükséges rögzíteni egy h lépésközt, majd az alábbi rekurziós módszerrel számolni:

$$y_{n+1} = y_n + h \cdot \frac{a_n + 2 \cdot b_n + 2 \cdot c_n + d_n}{6}$$

ahol

$$\begin{aligned}
a_n &= f(t_n, y_n) \\
b_n &= f\left(t_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}h \cdot a_n\right) \\
c_n &= f\left(t_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}h \cdot b_n\right) \\
d_n &= f(t_n + h, y_n + h \cdot c_n)
\end{aligned}$$

A meredekség becslése egy, most nem részletezett matematikai megfontolás alapján súlyozott középértéke az alábbi négy meredekségi becslésnek:

$$\begin{aligned}
a_n &= y'(t_n) \\
b_n &= y'\left(t_n + \frac{h}{2}\right) \\
c_n &= y'\left(t_n + \frac{h}{2}\right) \\
d_n &= y'(t_n + h)
\end{aligned}$$

E négy közelítés átlagolásánál a t_n és t_{n+1} szélekhez képest a $t_{n+0,5}$ felezőnél dupla súlyt alkalmazunk:

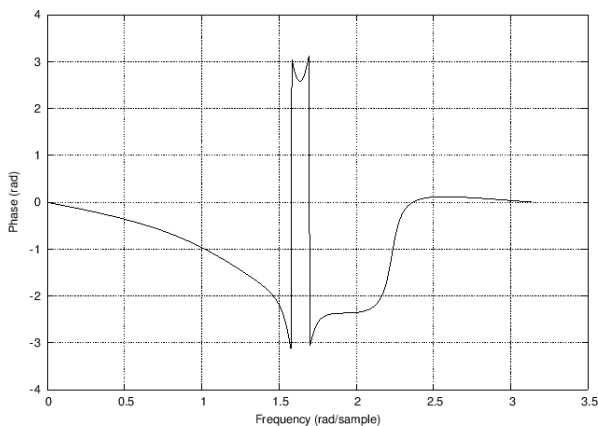
$$y_{n+1} = y_n + \frac{y'(t_n) + 4 * y'\left(t_n + \frac{h}{2}\right) + y'(t_n + h)}{6}$$

A képletbe a meredekség értékeit behelyettesítjük a megfelelő $y'(t_n)$ derivált értékekbe, ezáltal meghatározzuk $y(t_n)$ integrál értékeit, amelyek a vizsgált felület pontjait alkotják.

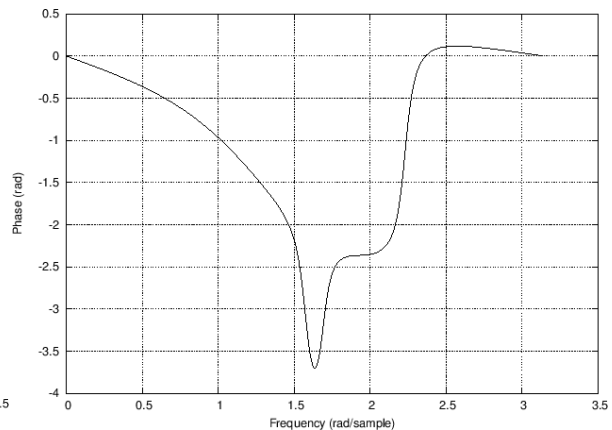
2.5 Fázis unwrap

A fáziseloszlások vizsgálatakor jópár esetben a többitől jelentősen kiugró értékeket figyelhetünk meg, amik a későbbi számolásokban rontják a felületrekonstrukció pontosságát. Ezért fontos a kiugró adatokat csökkenteni, a fázisugrásokat megszüntetni. Megoldást jelenthet erre valamilyen fázis kicsomagoló (Phase Unwrapping) módszer[84,85]. Az eljárás során ellenőrizzük a két egymás után következő pontok különbségét, amennyiben ez meghalad egy adott értéket, akkor az algoritmus lecsökkenti azt, és így a pontok folytonos függvényt fognak alkotni. Ez a határérték alapbeállításként π értékű és a korrekciónál $\pm 2\pi$ többszörösét adja hozzá vagy vonja le a korrigálandó tagból. Az esetek nagy részében

azonban a kiugró értékek π értékénél jelentősen kisebbek, így az adott vektort egy unwrap-szorzóval multiplikálom, ezáltal már beleesnek a keresett tartományba. Az általam kutató eljárásban, ennek a lépésnek jelentős szerepe van, amit majd az aszférikus lencséről alkotott kép elemzésénél fejtek ki részletesebben.



2.ábra - wrapped phase



3.ábra - Unwrapped phase

3. A Szoftver megvalósítása

A programot megvalósításánál fontos volt figyelembe venni, hogy az iterálási lépéseket együttevén, sok matematikai számolást, főleg mátrixműveleteket tartalmaz az eljárás. Ahhoz hogy pontos érték mellett megfelelő időn belül adjon eredményt a szoftver, olyan programot kellett választani, amely kiemelkedik matematikai számolás területén. Több szoftveríró program áttekintése után, választásom a Matlab-ra esett.

3.1. A program felépítése

3.1.1. Képek beolvasása

A eljárás egyik nagy előnye, hogy tetszőleges számú képet képes kezelni, sőt a legkisebb négyzetek módszere annál pontosabb eredményt ad, minél több interferogramot futtat át. Emiatt a szoftver kép-beolvasó részét ergonomikusra kellett terveznem, hogy a felhasználó gyorsan és könnyedén tudja beolvasni az általa kívánt felvételeket. Elsőként a szoftveren belül tudjuk beállítani, hogy az interferogramokon mekkora szakaszon és hol kívánjuk mérni a felületi értékeket, valamint definiáljuk a képernyő és felület távolságát. A Matlab Guide segítségével létrehoztam egy felugró ablakot, amely a program indításakor automatikusan megjelenik, egyértelmű utasításokat szolgáltatva. Két gomb közül választhatunk, egyikkel képeket olvashatunk be (Kép hozzáadása), a másikkal elindíthatjuk a számolást (Tovább). Az előbbi esetben a kattintást követően egy keresőablak segít abban, hogy a megfelelő mappából választhassuk a felvételeket. Az open gomb lenyomásával a szoftver elmenti a fájl elérési útvonalát, amit felhasználva az imread parancshoz, létrehozza annak három dimenziós intenzitásmátrixát, amit aztán két dimenzióssá alakít. Ebből a korábban meghatározott helyen kiemel 10 vektort, amit átlagol, így létrehozva egy képhez tartozó átlagos intenzitásvektort. Ezt az sorvektort hozzáadja a globálisan deklarált I_{ij}^e intenzitásmátrix első sorához. Eközben konstruál egy δ_{ij} fáziseltolási mátrixot, és az első sort feltölti 0,5 radián értékkel. További képek beolvasásánál az i-edik kép átlagos intenzitásvektorát az I_{ij}^e mátrix i-edik sorához adja, valamint a δ_{ij} mátrix i-edik sorát feltölti $i \cdot 0,5$ radián értékkel. Logikusnak tűnhet a feltevés, miszerint δ_{ij} mátrix leírható csupán egy δ_i oszlopvektorral és így csökkenthetjük a memória felhasználást, ám a későbbi számolásoknál kitűnik, hogy a mátrixműveletekhez muszáj $M \times N$ tagú mátrixokat használni, ezért például az i elemű δ_i oszlopvektort δ_{ij} mátrixszá alakítom, úgy, hogy minden i-edik sorban N darab δ_i érték szereljen.

3.1.2. Iteráció előkészítése

A Tovább gomb lenyomásával véglegesítjük a beolvasott képek számát és elindítjuk a számolást. Az előző lépésből meghatározásra került δ_{ij} és I_{ij}^e mátrixok segítségével az előzőekben leírt matematikai eljárással a szoftver meghatározza V_j mátrixot, majd kiemelve a második illetve harmadik sorát definiálja b_j és c_j változókat, valamint ϕ_j vektort, amit δ_i -hez hasonlóan mátrixszá alakít. Ez a lépés felel meg a nulladik iterációs lépésnek: δ_{ij}^0 -hoz tartozó

ϕ_{ij}^0 . Azonban az eljárás megfelelő működéséhez δ_{ij}^k és ϕ_{ij}^{k-1} -re van szükségünk így a tényleges iterációs algoritmus előtt szükség van inverz algoritmussal δ_{ij}^1 meghatározására.

3.1.3. Ismétléses eljárás

A szoftver elindít egy while ciklust, amely az ismétléses eljárást valósítja meg. A ciklus elvégez egy univerzális eljárást, majd egy inverz eljárást, végül ellenőrzi, hogy az ismétlések eredménye kielégíti-e a konvergencia kritériumot. Ehhez létrehoz egy DS mátrixot, amelybe minden k-adik iteráció alkalmával bemásolja az adott állapotbeli δ_i -ből transzponált sorvektort, mint a mátrix k-adik sora. A kész mátrix egy sora meghatározza az adott iterációhoz tartozó fáziseltolásokat. A konvergencia kritérium ellenőrzéséhez DS mátrix k-adik sorának i-edik eleméből kivonja az (i-1)-edik elemét ($i=2,3,\dots,M$), létrehozva ezzel egy (M-1) tagú vektort. Ezt a műveletet megismételi a (k-1)-edik sorral is, és a két vektor különbségének abszolút értékére vizsgálja, hogy adott határérték alatt van-e. Ha nem, akkor az iteráció folytatódik, újabb sorral bővítve DS mátrixot.

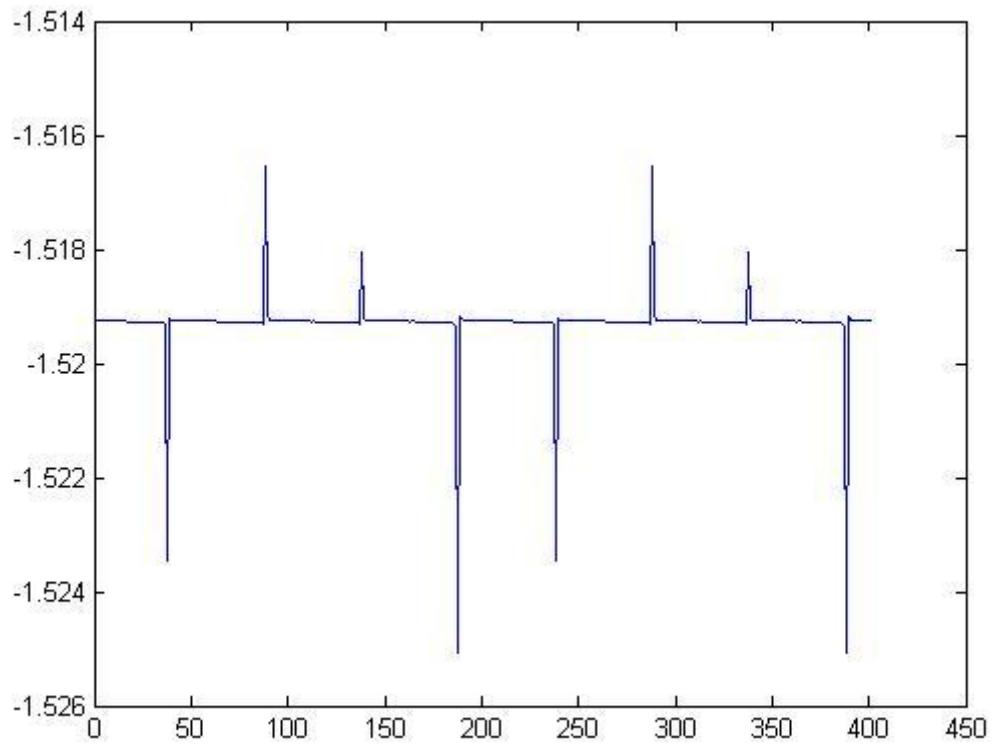
3.1.4. Felület visszaállítása

A határérték elérése után megkapjuk a végleges fáziseloszlásvektort, amivel a szoftver elkezdi a felület rekonstrukcióját. Elsőként végrehajt egy phase unwrap utasítást, amely alapértelmezett parancsként szerepel a Matlabban, majd a fázisugrásmentes eloszlásvektorból meghatározásra kerülnek a felület meredekségi értékei, amelyen újabb unwrap parancsot hajtunk végre, létrehozva ezzel MW vektort. A matematikai módszereknek megfelelően a szoftver a létrehozta MW-ből Runge-Kutta integrállal a felületvektort, amelyet egy "plot()" utasítással kirajzol külön ablakba.

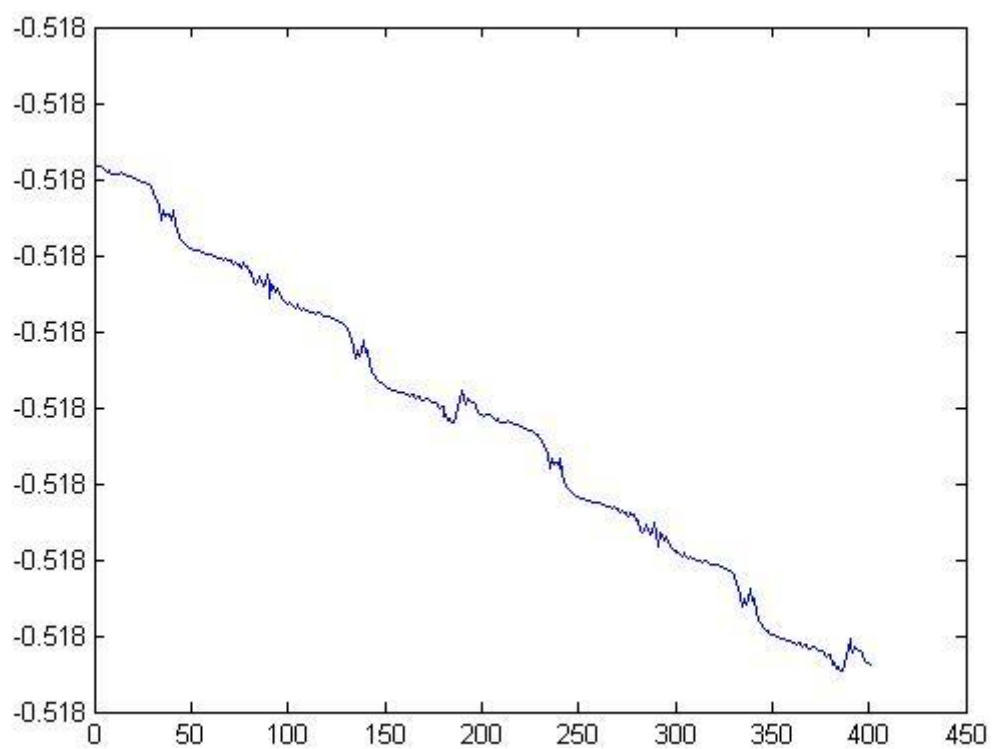
3.2. Szoftver tesztelése

A teszteléshez a csíkokat közvetlenül mentettem le a monitorról, hogy egy tökéletesen sík felületet reprodukáljak, amit nem torzít semmiféle hiba. Az iteráció hibahatárát 10^{-5} -re, a képek számát 10-re, az unwrap szorzót pedig $5 \cdot 10^5$ -re állítottam. Ezek az értékek csak

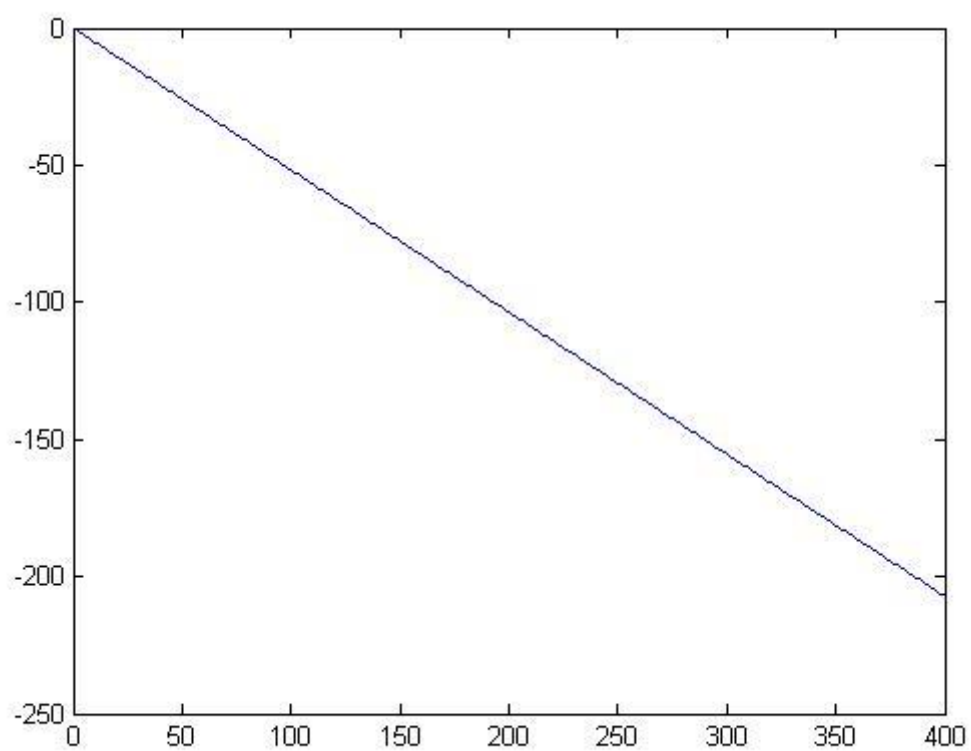
ideális síkfelületnél használhatóak reális időkeretek között, viszont a későbbi szférikus lencséről alkotott képekkel ellentétben itt a fázisvektor kiugrásai jelentősen csökkentettek, a beállításoknak köszönhetően. Az eredményeket az alábbi ábrákon szemléltetem:



4.ábra - Fázisértékek



5.ábra - Meredekség



6.ábra - Felület

4. Mérések leírása, eredmények kiértékelése

4.1. Laborbeli, illetve otthoni kísérletek

4.1.1. Mérés összeállítása

A kísérleteket a BME MOGI tankszék D507-es termében kezdtem, ahol rendelkezésre állt egy képelkapó kártyás kamera, amellyel a interferogramokat automatikusan a számítógépre tudtam átirányítani. Síktükör esetében tökéletesen megfelelt a célnak, de adott értéknél nagyobb sugárral rendelkező lencsénél már legnagyobb apertúra mellett sem volt képes elég fényt befogni, így a kísérletet sikertelennek nyilvánítottam.

Ezek után a kamera szerepét egy Kodak Easyshare M580 digitális fényképezőgép töltötte be. Vetítőeszközöknél összehasonlítottam a laborban lévő CRT monitort és az otthon megtalálható LCD monitort, ám különbség szinte nem volt tapasztalható, így a kísérlet többi részét otthon végeztem el.

A méréseket két különböző optikai felületen hajtottam végre, egyik egy síktükör, másik egy szférikus optikai lencse. Utóbbi esetében célom a görbületi sugár összehasonlítása egy roncsolásos vizsgálat értékével. A kísérlet kezdése előtt irodalmi kutatásban találtam adatokat a optimális elrendezésről, így törekedtem ezt megvalósítani. Először a vizsgálandó objektumot egy stabil felületre helyeztem, aminek a magassága megegyezett a monitor közepével, majd az optikai felületet kicsit elforgattam úgy, hogy a monitor mellé helyezett kamera által befogott képnek a közepén helyezkedjen el a reflexió. A felület és a monitor közötti távolság meghatározása után elkezdtem a képek készítését. Ehhez a csíkok sűrűségét adott értékre állítottam, majd minden képnél adott fázissal eltoltam. A képsorozatokból egy-egy képet az alábbi ábrákon szemléltetek:



7.ábra - síkfelület

8.ábra - aszférikus lencse

További korrekciót jelentett, hogy fényképek helyett videókat készítettem a felületről, miközben növeltem a fáziseltolást, majd a videóból lementettem az adott képsorozatot. Ez a lépés azért volt fontos, hogy elkerüljem az emberi tényező negatív hatását, ami eltérést okozhat a képek elhelyezkedése között, a fényképezőgéphez érés miatt.

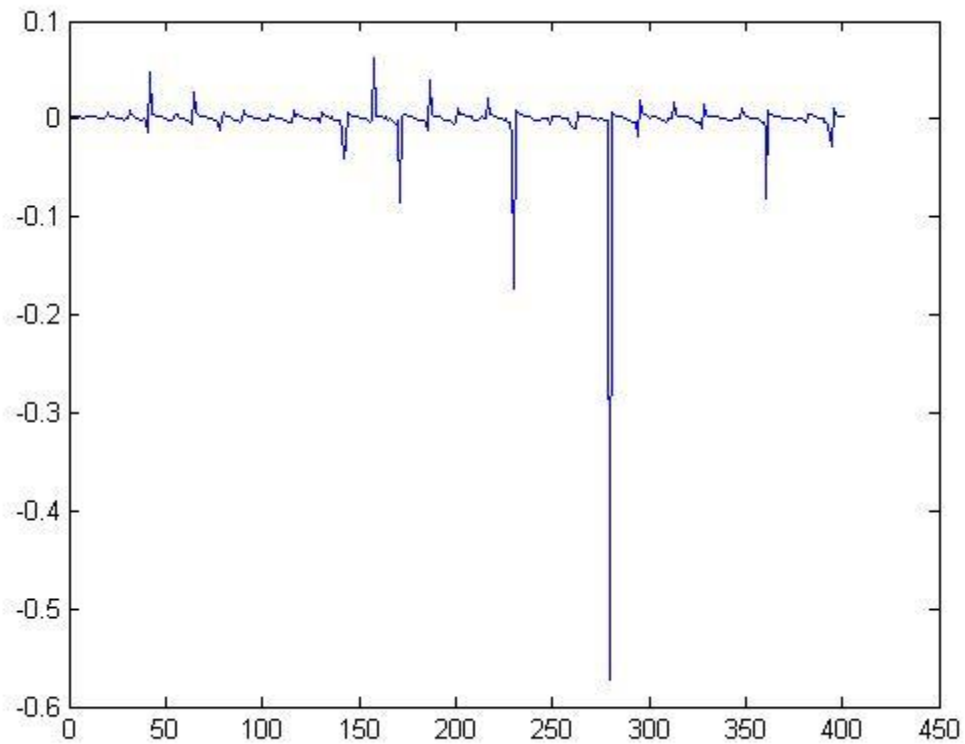
4.1.2. Aszférikus optikai lencse vizsgálata

Miután a képsorozatot elkészítettem a fentiekben leírtak alapján, beolvastattam őket a szoftverrel. Számos futtatás után a következő következtetésekre jutottam:

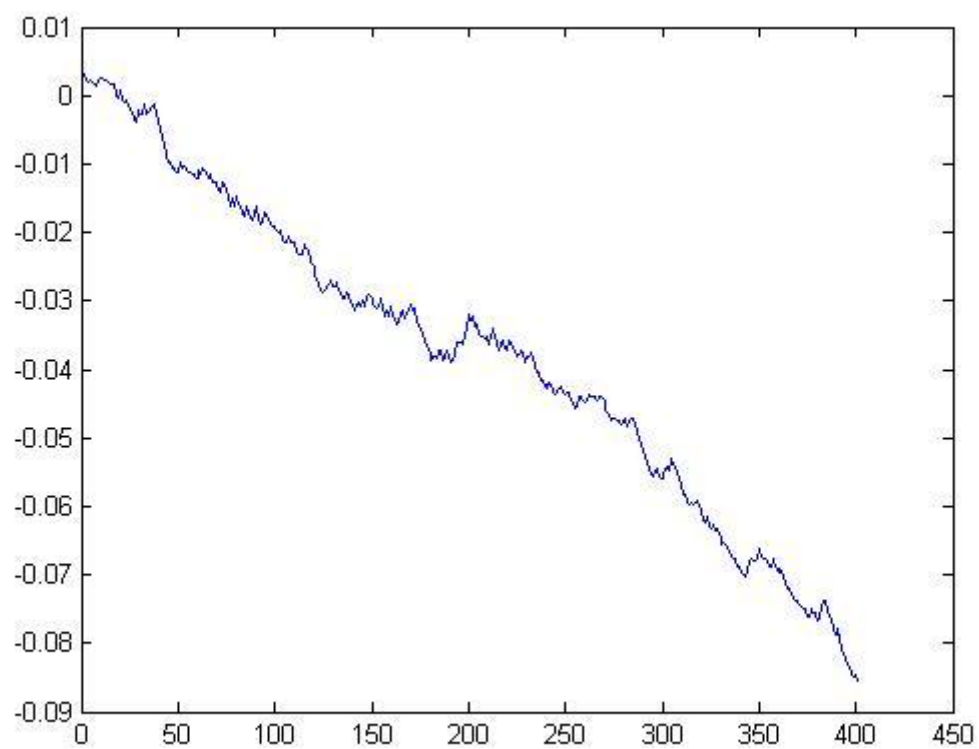
1. A tükrözéssel járó zajszint jelentősen befolyásolja a szoftver lefutásának időigényét, így érdemes lehetőleg sötét szobában végezni a mérést, ahol a zajintenzitás minimális
2. Az iterációs algoritmus ellenőrző értékének csökkentésével nő a számolási igény, viszont a fázis kilengései jelentősen csökkennek
3. A képek számának növelése az ellenőrző értékhez hasonlóan javítja az eredményt, de lassítja a számítási folyamatot.

Korábban említésre került az unwrap algoritmus, amely képes a jelentősen eltérő értékek csökkentésére. Azonban tapasztalatok alapján relatív, hogy mekkora érték számít jelentősen eltérőnek: a fázis kilengését csökkentő lépésekkel párhuzamosan muszáj növelni az unwrap-szorozót, hogy nyomon kövessük a csökkenő kilengéseket. Ám fontos, hogy ne adjunk sokkal nagyobb szorzót a kicsomagoló eljárásához, mert az a túl kicsihez hasonlóan hamis értéket ad vissza. A leírtakból adódik, hogy minden képsorozathoz, meghatározott kép és ellenőrző érték mellett, találunk egy optimális unwrap-szorozót.

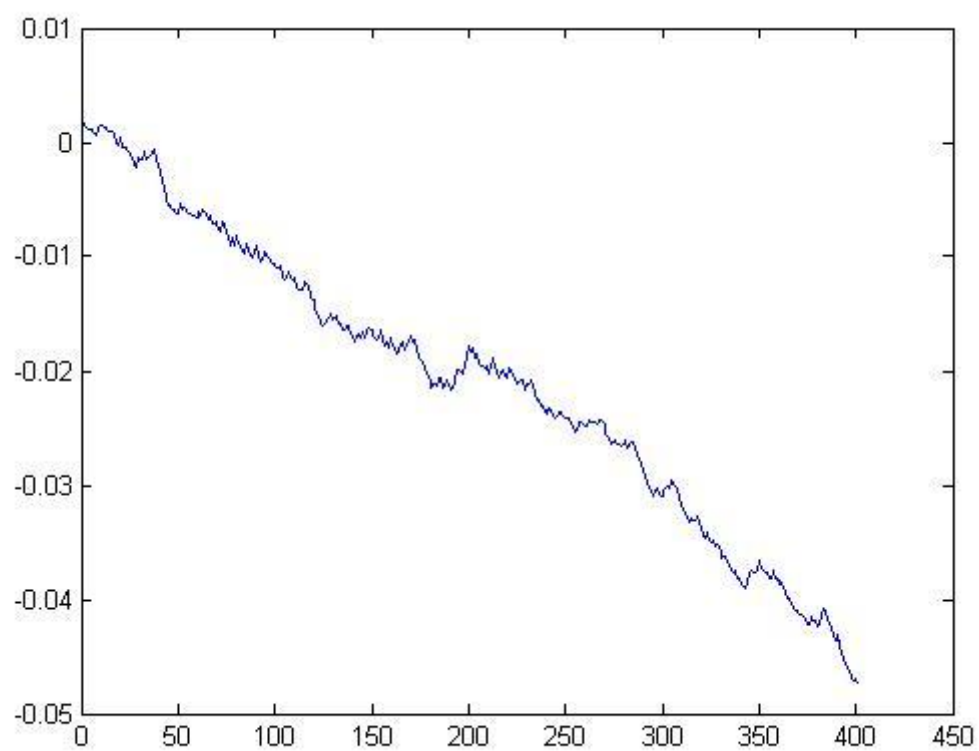
A tesztelések során próbáltam a legjobb értékeket elérni a képsorozatombhoz, végül 10 képhez, 10^{-2} ellenőrző érték mellett 2000-es unwrap-szorzó bizonyult a legideálisabbnak. Az így kapott eredményeket az alábbi ábrákon szemléltetem:



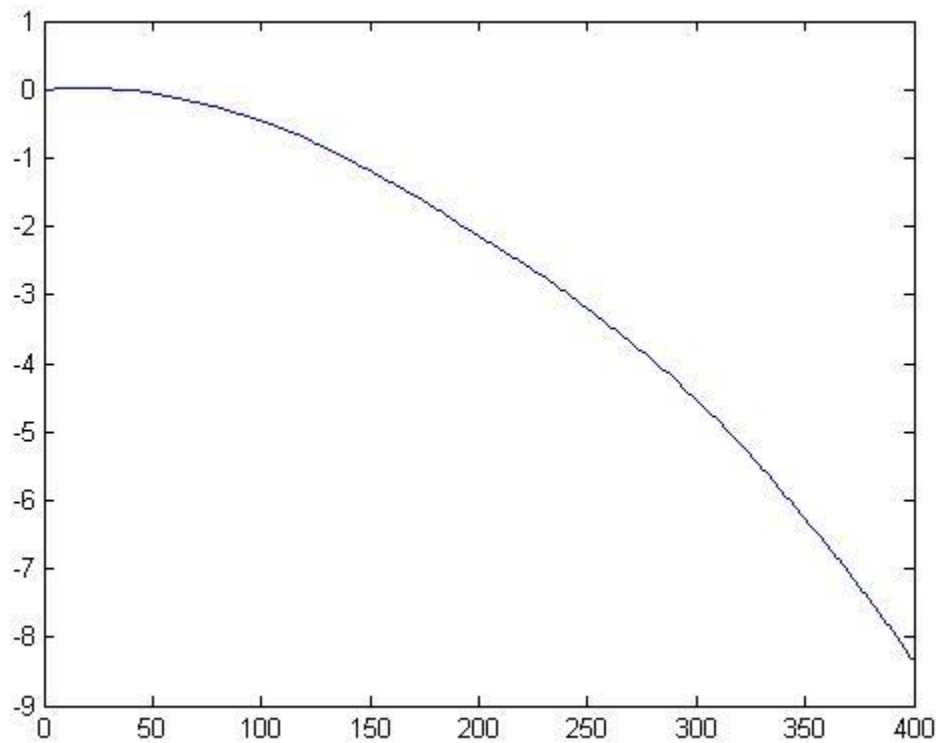
9.ábra - Aszférikus lencse fázisértékei



10.ábra - Ugrásmentes fázisértékek



11.ábra - Aszférikus lencse meredeksége



12.ábra - Aszférikus lencse rekonstruált felülete

4.1.3. Görbületi sugár meghatározása számítással

A felületi értékek meghatározása után, a számolást Microsoft Excel segítségével folytattam. A görbületi sugár meghatározásához a következő matematikai módszer segítségével kört illesztettem a rekonstruált felületre [86,87]:

$$\sum \alpha = 2 * \left[\left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 - N * \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) \right] = -66666250$$

$$\sum \beta = 2 * \left[\left(\sum_{i=1}^N x_i \right) * \left(\sum_{i=1}^N y_i \right) - N * \left(\sum_{i=1}^N x_i * y_i \right) \right] = -11023036$$

$$\sum \gamma = 2 * \left[\left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 - N * \left(\sum_{i=1}^N y_i^2 \right) \right] = -1941011$$

$$\sum \delta = \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) * \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) - N * \left(\sum_{i=1}^N x_i^3 \right) + \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i^2 \right) - N * \left(\sum_{i=1}^N x_i * y_i^2 \right)$$

$$= -1707029964$$

$$\sum \varepsilon = \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) * \left(\sum_{i=1}^N y_i \right) - N * \left(\sum_{i=1}^N y_i^3 \right) + \left(\sum_{i=1}^N y_i \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i^2 \right) - N * \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 * y_i \right)$$

$$= -301173938$$

x_i - az i-edik függvényérték x koordinátája

y_i - az i-edik függvényérték y koordinátája

N - függvényértékek száma

Ezek segítségével meghatározható a felületre illesztett kör középpontja:

$$A = \frac{\sum \delta \sum \gamma - \sum \varepsilon \sum \beta}{\sum \alpha \sum \gamma - \sum \beta \sum \beta} = -0,05013$$

$$B = \frac{\sum \alpha \sum \varepsilon - \sum \beta \sum \delta}{\sum \alpha \sum \gamma - \sum \beta \sum \beta} = 159,83087$$

Ahol A a kör középpontjának x, B pedig az y koordinátája.

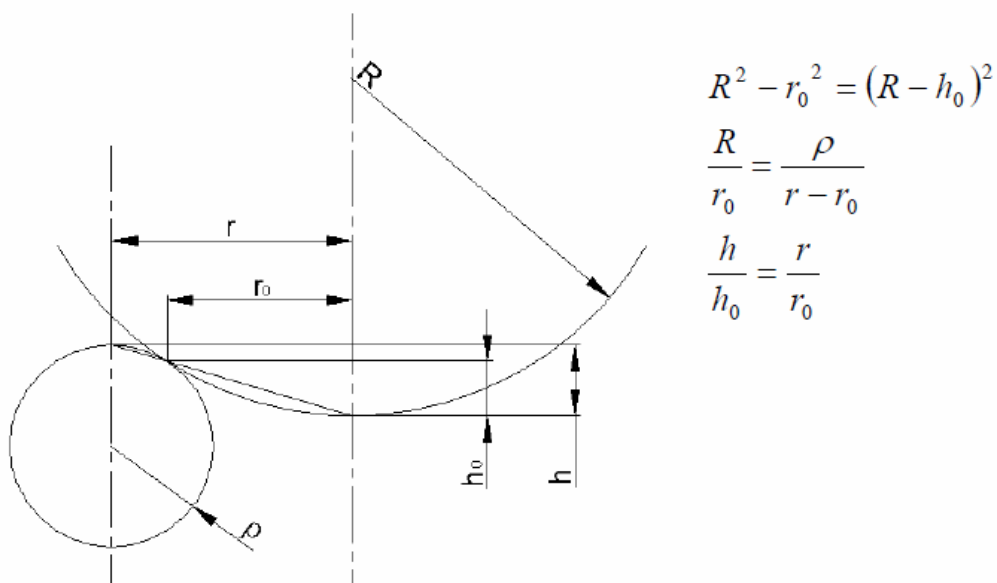
Ezekből már adódik a görbületi sugár négyzete:

$$R^2 = A^2 + B^2 + \frac{1}{N} * \left[\sum_{i=1}^N x_i^2 - 2A \sum_{i=1}^N x_i + \sum_{i=1}^N y_i^2 - 2B \sum_{i=1}^N y_i \right] = 16424,47955$$

$$R = 128,158 [mm]$$

4.1.4. Görbületi sugár meghatározása méréssel

Mérési referenciának egy roncsolásos felületvizsgálati módszert választottam, amely segítségével meghatároztam méréssel az előzőekben taglalt lencse görbületi sugarát. Ehhez a MOGI tankszék D507-es laborban található golyós szferométert vettem igénybe. A mérést a MOGI tankszék honlapján megtalálható segédlet alapján végeztem[88].



13.ábra - golyós szferométer elvi működése

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} + \rho, \text{ Ahol}$$

R - a lencse görbületi sugara [mm]

r - a golyók által meghatározott kör sugara [mm]

r_0 - a golyók és a mérendő gömbfelület érintési pontja által meghatározott kör sugara [mm]

ρ - a golyók sugara [mm]

h - a mért húrmagasság [mm]

h_0 - a tényleges húrmagasság [mm]

A méréshez a 4-es gyűrűt használtam, ahol

$$r=21,2842 \text{ [mm]}$$

$$\rho=3,17 \text{ [mm]}$$

A mért adatokat az alábbi táblázat tartalmazza:

Sorszám	Síküveglap [mm]	Szférikus felület [mm]
1	14,3953	12,5968
2	14,3949	12,5967
3	14,3948	12,5962
4	14,3952	12,5965
5	14,395	12,5958
6	14,3953	12,596
7	14,3952	12,5957

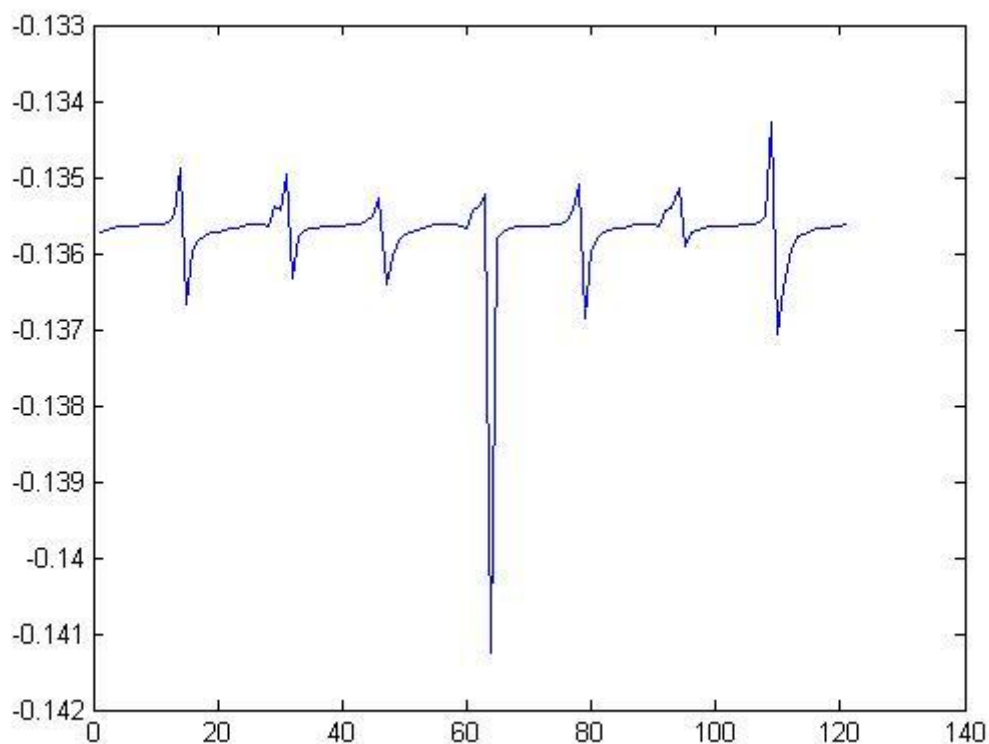
A mért értékeket átlagolva kiszámolható az átlagos húrmagasság, amit az alapegyenletünkbe helyettesítve meghatározzuk a görbületi sugarat:

$$\bar{h} = 1,7989 \text{ [mm]}$$

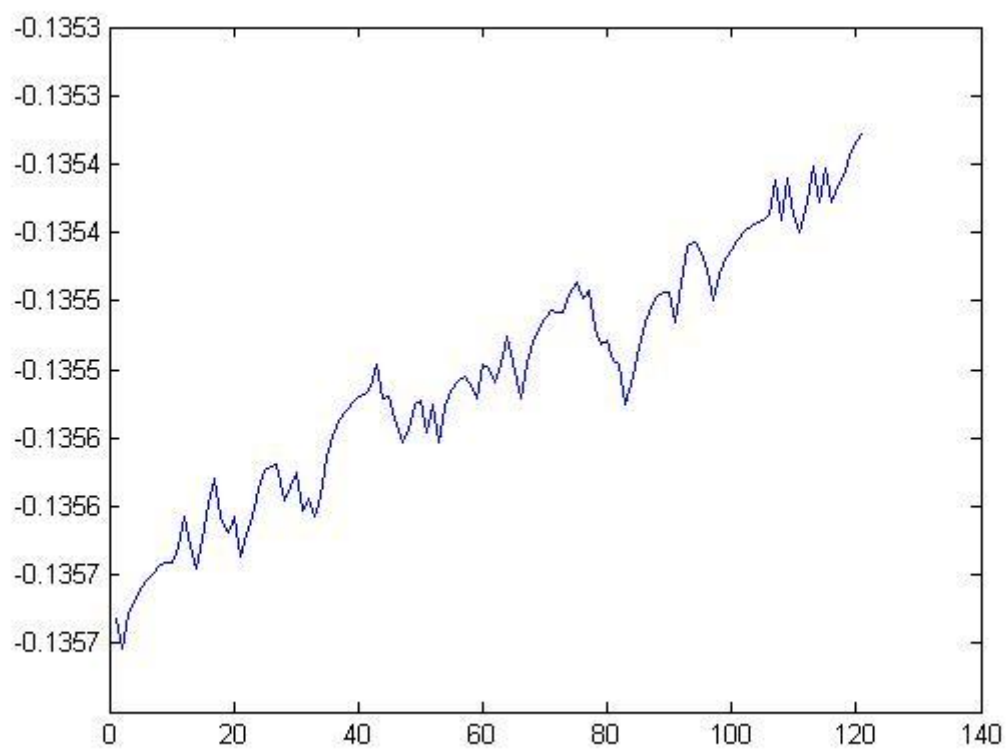
$$R=129,9875 \text{ [mm]}$$

4.1.5. Síktükör vizsgálata

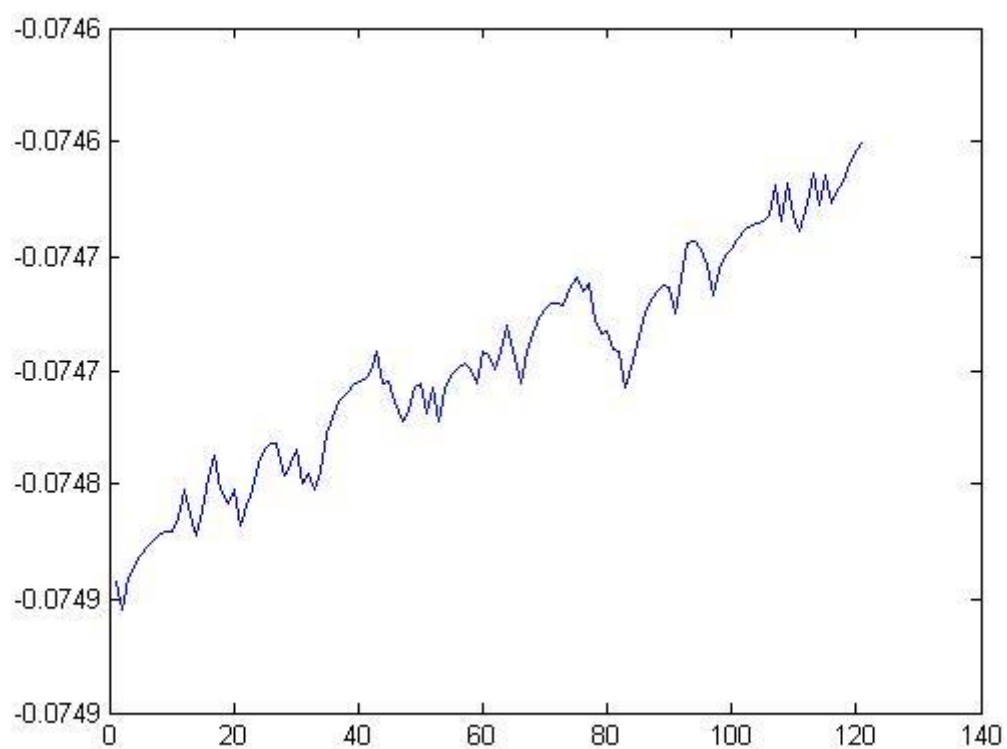
Síktükör esetében is alkalmazzuk a már definiált összefüggéseket, a szoftver futtatása után, 5 képpel, 10^{-4} ellenőrző érték mellett, 10^5 unwrap-szorzóval az alábbi eredményeket kaptam:



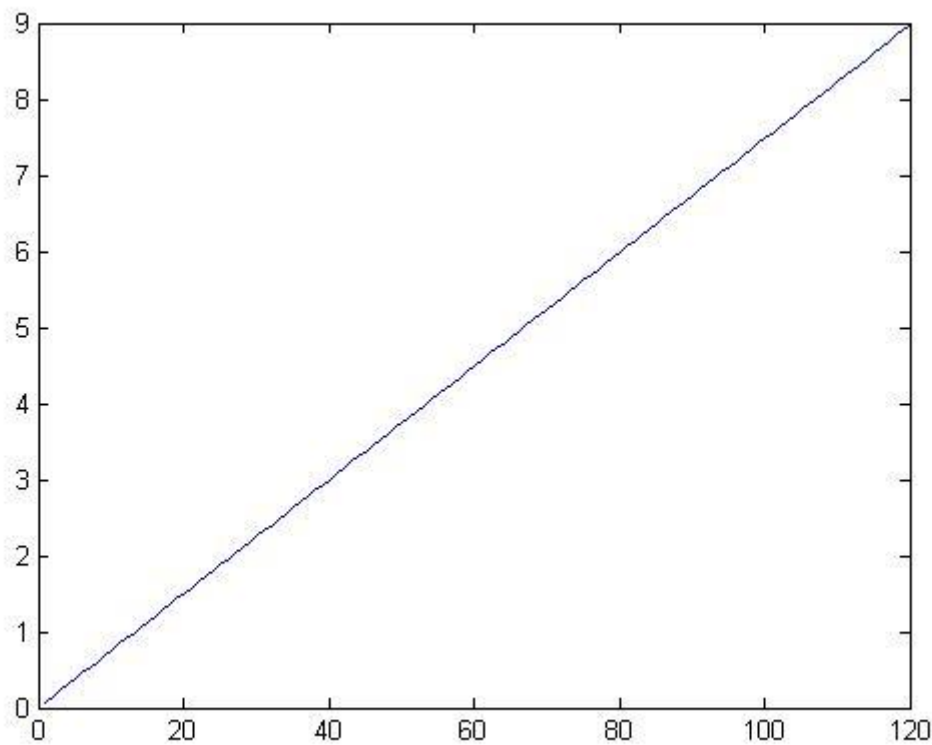
14.ábra - Síkfelület fázisértékei



15.ábra - Ugrásmentes fázisértékek



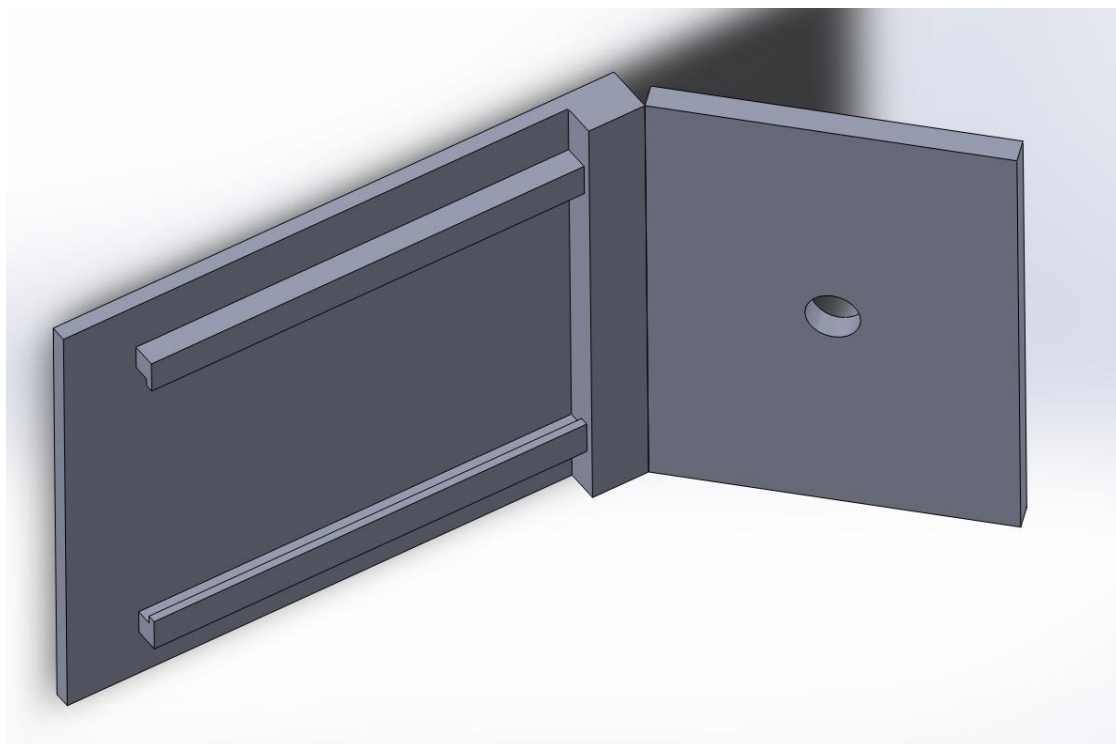
16.ábra - Síkfelület meredeksége



17.ábra - Síkfelület rekonstruált felülete

4.2. Mérés prototípussal

Ez az eljárás jó automatizáltsági tulajdonságokkal rendelkezik, ezért modelleztem, majd kiviteleztem egy hordozható prototípust ennek szemléltetésére. Az alapelgondolás szerint az ábrán látható egyik oldallapon lévő résekbe csúsztatom be vetítő szerepét betöltő tabletet, amire előzetesen feltöltöttem csíkozásokból álló képsorozatot. Ezután a másik lap hátuljára felerősítem a kamerás mobiltelefont, aminek a kamerája tökéletesen keresztüllát a kifűrt lyukon. Ezután a lencsét megfelelő magasságba és távolságba helyezem, és elkészítem a fényképsorozatot a vizsgálandó felületről. A modellezett prototípust és az az alapján elkészített végleges modellt a következő képek mutatják:



18.ábra - Prototípus modell Solidworks használatával

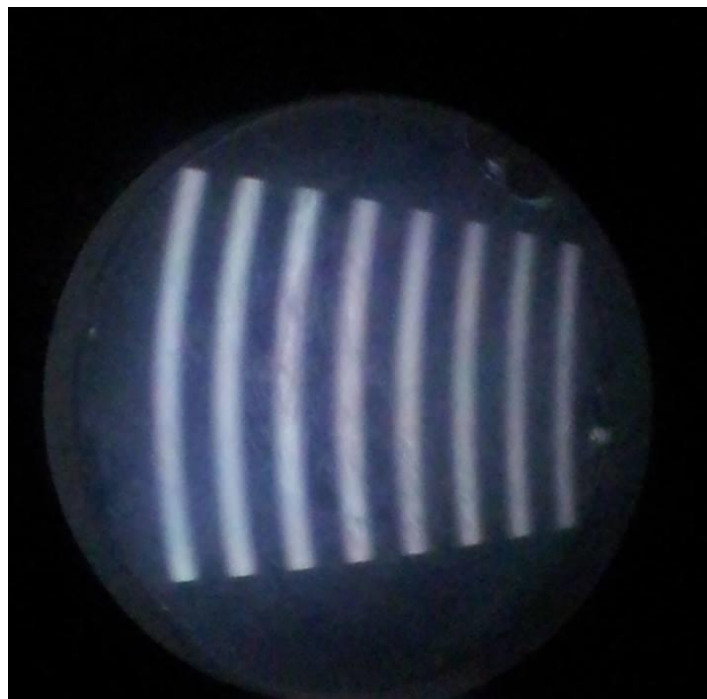


19.ábra - Prototípus modell megvalósítása



20.ábra - Prototípus modell hordozható állapotban

A prototípus alkalmas hasonló vagy akár jobb minőségű képsorozatok alkotására is, függ a mobiltelefon fényképezőképességétől, a kontraszttól, valamint a kész sorozatot is tovább finomíthatjuk a korábban leírt módokon (több kép, alacsonyabb ellenőrző érték). Szemléltetés céljából az alábbi ábra mutat egy prototípussal készült képet.



21.ábra - prototípussal készített kép

5. Mérések kiértékelése, javítási lehetőségek

A mérésekből látszik, hogy a szoftver megfelel az elvárásoknak, hiszen az aszférikus lencse görbületének két különböző módon mért értéke között körülbelül 1% eltérés van. Ez az eltérés adódhat mechanikai okból, például a kamera elmozdulása két kép között vagy a felület tisztasága, adódhat számolásból, mint a kerekítések, vagy lehet pusztán zajhiba is, mint a parazita reflexió[89]. Utóbbi esetében a nem csak a lencse első felületéről, hanem a hátsó felületéről is visszaverődnek a csíkok, torzítva az alkotott képet.

A minőség javítása érdekében két fő dolgot lehet tenni: a hibák mértékét csökkentjük vagy az algoritmusból származó előnyöket használjuk ki. Ilyen előny például, hogy minél több képet olvasunk be, annál jobb értéket kapunk - feltéve, hogy a képsorozat ideális - valamint az iterációs algoritmus korlátját is csökkenthetjük, mérsékelve ezzel a fázisértékek kilengését.

6. Összefoglalás

Kutatásom célja egy olyan rendszer megalkotása volt, amely gyorsan és pontosan határozza meg az optikai felületek tulajdonságait, mindezt jó automatizáltsági fok mellett. A rendszer pontosságát, számos módon lehet növelni az idő és memória kárára, de akár gyorsíthatunk is a procedúrán időt és memóriát takarítva meg, a minőség rovására. Ennek a rugalmasságnak köszönhetően alkalmas beépíteni bármely automatizált rendszerbe, ahol a kezelő beállíthatja az igényeinek megfelelő értékeket.

Hátránya, hogy az igénynek leginkább megfelelő értékeket precízen, tesztfuttatások mellett lehet optimalizálni, így nem a legmegfelelőbb kis darabszámú mérés esetén. Azonban nagyszámú automatizált mérésnél, helyes kezdeti beállításokkal különösen hatékonyá válik ez a roncsolásmentes felületvizsgálati módszer.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm konzulensemnek, dr. Antal Ákosnak, hogy dolgozatom készítése alatt tanácsaival látott el valamint, hogy rendelkezésemre bocsájtotta a kutatáshoz szükséges eszközöket. Ezenfelül köszönöm a MOGI tanszéknek, hogy méréseimhez használhattam az optikai laboratóriumokat.

A mérés során használt eszközök, szoftverek

CRT monitor:

LG Flatron F900B

Sorszám: 307KP11809

LCD monitor:

Samsung S24B300HL

Sorszám: 0213H4MCA01074V

Tablet:

Samsung 10.1

Sorszám: 0168

Digitális fényképezőgép:

Kodak EasyShare M580

Sorszám: KCTMT02421346

Okostelefon:

Samsung Galaxy S2

Modellszám: GT-I9100

Golyós szferométer:

IZSZ-7

Sorszám: 600-120

Leltári szám: 123-029400

Szoftverek:

Matlab

Microsoft Office Excel, Word 2007

Sinus

Irodalomjegyzék

- [1] E.O. Doebelin: Measurement Systems, McGraw-Hill, 1990. ISBN 0-07-017338-9
- [2] Váradiné dr. Szarka Angéla , Dr. Hegedűs János , Bátorfi Richárd , Unhauzer Attila: MÉRÉSTECHNIKA 0917-06, SzT-021-50
- [3] J. G. Webster: The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRC Press LLC, 1999. ISBN 3-540-64830-5
- [4] Horváth Elek: Méréstechnika, KKMF-1161. 1997.
- [5] Dr. Palotás Béla - Dr. Éva András - Dr. Mészáros István: Roncsolásmentes anyagvizsgálat, 2012.
- [6] <http://www.matradiagnosztika.hu/anyagvizsgalat/roncsolasmentes+vizsgalatok/>
- [7] B. Jähne, H. Haußecker, and P. Geißler, eds., Handbook of Computer Vision and Applications., vol. 1. Sensors and Imaging, Academic Press, Boston, 1999.
- [8] R. Furutani, H. Asano, K. Takamasu, and S. Ozono, “3D profile measurement using multi-gray scale compared with reference projections,” Measurement, vol. 20, no. 2, pp. 129–134, 1997.
- [9] X. Y. Su, W. Zhou, G. von Bally, and D. Vukicevik, “Automated phasemeasuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating,” Opt. Commun., vol. 94, no. 6, pp. 561–573, Dec. 1992.
- [10] M. Beyerlein, N. Lindlein, and J. Schwider, “Dual-wave-front computer-generated holograms for quasiabsolute testing of aspherics,” Applied Optics 41, pp. 2440–7, May 2002.
- [11] H. Tiziani, S. Reichelt, C. Pruss, M. Rocktaschel, and U. Hofbauer, “Testing of aspheric surfaces,” in Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication. 29-30 July 2001 San Diego, CA, USA, Proceedings of SPIE 4440, pp. 109–19, July 2001.
- [12] J. Pfund, N. Lindlein, J. Schwider, R. Burow, T. Blumel, and K.-E. Elssner, “Absolute sphericity measurement: a comparative study of the use of interferometry and a shackhartmann sensor,” Optics Letters 23, pp. 742–4, May 1998.
- [13] Born M., and Wolf E.: Fundamentals of optics, Moscow: Nauka, pp. 242-340, 1973.

- [14] R. Ritter and R. Hahn, "Contribution to analysis of the reflection grating method," *Optics and Lasers in Engineering* 4(1), pp. 13–24, 1983.
- [15] D. P'érard and J. Beyerer, "Three-dimensional measurement of specular free-form surfaces with a structured lighting reflection technique," in *Three-Dimensional Imaging and Laser-based Systems for Metrology and Inspection III*, Pittsburgh, PA, USA, Proceedings of the SPIE 3204, pp. 74–80, October 1997.
- [16] M. Petz and R. Tutsch, "Measurement of optically effective surfaces by imaging of gratings," in *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection II*, Munich, Germany, Proceedings of the SPIE 5144, pp. 288–94, June 2003.
- [17] S. Kammel, "Deflectometry for quality control of specular surfaces," *Technisches Messen* 70, pp. 193–8, April 2003.
- [18] K. Creath and J. C. Wyant, "Moire and fringe projection techniques," in *Optical Shop Testing*, D. Malacara, ed. Wiley, pp. 668-671 (1992).
- [19] Gasvik. K. J., "Optical Metrology", New York: Wiley (1987).
- [20] Tiziani, H. J., "Optical Methods for Precision Measurements", *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 21, pp. 253-282 (1989).
- [21] Wieland, P. and H. J. Tiziani, "Rechnerunterstutzte Lasermesstechnik", *Tech. Messen*, Vol. 54, pp. 221-225 (1987).
- [22] J.J. Aguilar, F. Torres and M.A. Lope, "Stereo vision measurement: Accuracy analysis, calibration and industrial applications", *Measurement* 184, pp. 193–200 (1996).
- [23] B. K. P. Horn, M. J. Brooks, "Obtaining shape from shading information", *Shape from Shading*, MIT Press, Cambridge, Mass. (1989).
- [24] Knauer M. C., Kaminski J., and Häusler G.: Phase Measuring Deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces, *Optical Metrology in Production Engineering*, Proceedings of SPIE 5457, pp. 366–376, April 2004.
- [25] Lowitzsch S., Kaminski J., Knauer M. C., and Häusler G.: Vision and Modeling of Specular Surfaces, *Proceedings VMV 2005*, pp. 479–486, 2005.
- [26] Kammel S., and León F. P.: Deflectometric Measurement of Specular Surfaces, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 4, pp. 763–769, April 2008.
- [27] Tang Y., Su X., Wu F., and Liu Y.: A novel phase measuring deflectometry for aspheric mirror test, *Optics Express*, Vol. 17, No. 22, pp. 19778–19784, 2009.
- [28] Balzer J., and Werling S.: Principles of Shape from Specular Reflection, *Measurement*, vol. 43, pp. 1305–1317, 2010.
- [29] Stoilov G., Dragostinov T.: Phase-stepping Interferometry: Five-frame Algorithm

with an Arbitrary Step, Optics and Lasers in Engineering 28, pp. 61-69, 1997.

[30] Deininger M., Wang L., Gerstner K., and Tschudi T.: Optical phase step method for absolute ranging interferometry using computer-generated holograms, Applied Optics, Vol. 34, No. 25, pp. 5620-5623, September 1995.

[31] Huang P. S., and Zhang S.: Fast three-step phase-shifting algorithm, Applied Optics, Vol. 45, No. 21, pp. 5086-5091, July 2006.

[32] Hong D., Park H., and Cho H.: Design of a Multi-Screen Deflectometer for Shape Measurement of Solder Joints on a PCB, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009), Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea July 5-8 2009.

[33] Wedowski R. D., Atkinson G. A., Smith M. L., and Smith L. N.: Dynamic deflectometry: A novel approach for the on-line reconstruction of specular freeform surfaces, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 50, pp. 1765-1778, 2012.

[34] Huang L., Seng C., and Asudi A. K.: Dynamic three-dimensional sensing for specular surface with monoscopic fringe reflectometry, Optics Express, Vol. 19, No. 13, pp. 12809-12814, 20 June 2011.

[35] Liu Y., Lehtonen P., and Su X.: High-accuracy measurement for small scale specular objects based on PMD with illuminated film, Optics & Laser Technology, Vol. 44, pp. 459-462, 2012.

[36] Guo H., Feng P., and Tao T.: Specular surface measurement by using least squares light tracking technique, Optics and Lasers in Engineering, Vol 48, pp. 166-171, 2010.

[37] Werling S., Mai M., Heizmann M., and Beyerer J.: Inspection of Specular and Partially Specular Surfaces, Metrology and Measurement Systems, Vol. 16, No. 3, pp. 415-431, 2009.

[38] Lellmann J., Balzer J., Rieder A., and Beyerer J.: Shape from Specular Reflection and Optical Flow, International Journal of Computer Vision, Vol. 80, No. 2, pp. 226-241, November 2008.

[39] Balzer J., and Werling S.: Principles of Shape from Specular Reflection, Measurement, Vol. 43, pp. 1305-1317, 2010.

[40] S. Ettl, J. Kaminski, M.C. Knauer, G. Häusler: Shape reconstruction from gradient data. Applied Optics, Vol. 47, No. 12, pp. 2091-2097, 2008.

[41] S. Ettl, J. Kaminski, E. Olesch, H. Strauß, G. Häusler: Fast and robust 3d shape reconstruction from gradient data. DGaO Proceedings, 2007.

[42] Antal Á.: Felületazonosítás moiré módszerrel,
<http://goliat.eik.bme.hu/~antala/docs/projmoire.pdf>
(letöltve: 2012. október)

- [43] Scammarella. C.: The Moire Method-A Review, *Experimental Mechanics*, Vol. 22, No. 11, pp. 418-433, 1982.
- [44] Stricker J.: Analysis of 3-D phase objects by moire deflectometry, *Applied Optics*, Vol. 23, No. 20, pp. 3657-3659, October 1984.
- [45] Xu D., and Liechti K. M.: Bulge Testing Transparent Thin Films with Moiré Deflectometry, *Experimental Mechanics*, Vol. 50, pp. 217-225, 2010.
- [46] Han C., and Han B.: Error analysis of the phase-shifting technique when applied to shadow moiré, *Applied Optics*, Vol. 45, No. 6, pp. 1124-1133, February 2006.
- [47] Canabal H., Quiroga J. A., and Bernabeu E.: Improved phase-shifting method for automatic processing of moiré deflectograms, *Applied Optics*, Vol. 37, No. 26, pp. 6227-6233, September 1998.
- [48] Hariharan, P., "Optical Holography", London: Cambridge University Press., Chapter 7, pp. 88-115 (1985).
- [49] Gabor, D. "A New Microscopic Principle", *Nature*, Vol. 161, pp.777-778 (1948).
- [50] Jones SA, Neal DR, Gruetzner JK, Houser RM, Edgar RM. VSHOT: a tool for characterizing large, imprecise reflectors. SAND-96-2272C, 1996, pp. 1–11.
- [51] Wendelin TJ, Jorgensen GJ, Wood RL. SHOT: a method for characterizing the surface figure and optical performance of point focus solar concentrators. *Solar engineering*. New York: American Society of Mechanical Engineers; 1991. pp. 555–560.
- [52] Jones SA, Gruetzner JK, Houser RM, Edgar RM. VSHOT measurement uncertainty and experimental sensitivity study. In: *Energy Conversion Engineering Conference, IECEC-97. Proceedings of the 32nd Intersociety*, vol. 3. 1997. pp. 1877–1882.
- [53] Scheele I., Krey S., and Heinisch J.: Measurement of Aspheric Surfaces with 3DDeflectometry, *DGaO Proceedings*, 2005.
- [54] Hao Q., Zhu Q., and Wang Y.: Deflectometer with synthetically generated reference circle for aspheric surface testing, *Optics & Laser Technology*, Vol. 37, pp. 375-380, 2005.
- [55] T. Kohno, N. Ozawa, K. Miyamoto, T. Musha: High precision optical surface sensor, *Applied Optics*, 27, pp. 103-108, 1988.
- [56] F. Lo, M. Shell, Intel passes milestones toward production-level EUV Lithography, *Technology Intel Magazine*, pp. 1-5, September 2004.
- [57] R. Boerhof, J.C.J. van Vliet, Deflectometer voor vlakheidmeting van optische spiegels, graduation report, Hogeschool van Utrecht, 1998.
- [58] Z. Zhou, T. Zhang, W. Zhou, Laser profiling for on-line measurement of superfine

surfaces, *Applied Optics*, 41, 125-129 (2002)

[59] A.E. Ennos, M.S. Virdee, High accuracy profile measurement of quasi-conical mirror surfaces by laser autocollimation, *Precision Engineering*, 4, 5-8 (1982)

[60] M.S. Virdee, Nanometrology of optical flats by laser autocollimation, *Surface Topography* 1, 415-425 (1988)

[61] M.S. Virdee, A new approach for establishing a reference plane for absolute measurement of shape and flatness with nanometer precision, National Physical Laboratory report, MOM 114 (1993)

[62] I. Weingärtner, M. Schultz, C. Elster, Novel scanning technique for ultra precise measurement of topography, *Proc SPIE* 3782, 306-317 (1999)

[63] I. Weingärtner, M. Schultz, Novel scanning technique for ultraprecise measurement of slope and topography of flats, aspheres, and complex surfaces, *Proc. SPIE* 3739, 274-282 (1999)

[64] R.D. Geckeler, I. Weingärtner, Sub-nm topography measurement by deflectometry: flatness standard and wafer nanotopography, *Proc. SPIE* 4779, 1-12 (2002)

[65] L. E. Schmutz, M. Levine, Hartman sensors detect optical fabrication errors, *Laser Focus World*, 111-117, (April 1996)

[66] J. Ares, T. Mancebo, S. Bara, Position and displacement sensing with Shack-Hartman wave front sensors, *Applied Optics*, 39, 1511-1520 (2000)

[67] Xiao M., Jujo S., Takahashi S., and Takamasu K.: Nanometer profile measurement of large aspheric optical surface by scanning deflectometry with rotatable devices: Uncertainty propagation analysis and experiments, *Precision Engineering*, Vol. 36, pp. 91-96, 2012.

[68] Ulmer, S., Heller, P. & Reinalter, W. (2008), 'Slope measurements of parabolic dish concentrators using color-coded targets', *Journal of Solar Energy Engineering* 130.

[69] Scott P. M., and Burgess G.: Measurement of mirror panels using coloured pattern deflectometry, *Proceedings of SolarPACES 2010*, Perpignan, France, September 2010.

[70] Grédiac, M. and Vautrin, A. (1993) Mechanical characterization of anisotropic plates: experiments and results. *Eur. J. Mech./A Solids* 12, 819–838.

[71] SICOMIN. Surf Clear Instruction and Material Safety Data Sheet. (Available at <http://www.sicomin.com>)

[72] Kim J.-H., Pierron F., Grediac M., and Wisnom M. R.: A Procedure for Producing Reflective Coatings on Plates to be Used for Full-Field Slope Measurements by a Deflectometry Technique, *Strain*, Vol. 43, No. 2, pp. 138–144, 2007.

[73] Sárosi Z., Knapp W., Kunz A., and Wegener K.: Detection of surface defects on sheet

metal parts by using one-shot deflectometry in the infrared range, Proceedings of InfraMation 2010, 210-160-Sarosi, 2010.

[74] Putz V., and Zagar B. G.: Design of an Automated Inspection System for Large Scale Convex Surfaces, Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE, pp. 1014-1019, 3-6 May 2010.

[75] Liu Y., Su X., and Zhang Q.: Precision Displacement Measurement based on Phase Measuring Deflectometry, International Conference on Advanced Phase Measurement Methods in Optics and Imaging, AIP Conference Proceedings, Vol. 1236, pp. 459-463, 2010.

[76] Giraudeau A., Guo B., and Pierron F.: Stiffness and Damping Identification from Full Field Measurements on Vibrating Plates, Experimental Mechanics, Vol. 46, 2006.

[77] Devivier C., Pierron F., Wisnom M. R.: Damage detection in composite materials using deflectometry, a full-field slope measurement technique, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 43, No. 10, pp. 1650-1666, 2011.

[78] Nagy Vendel: Optikai felületek deflektometriás vizsgálat, TDK 2012.

[79] Andu Nguyen: Theory of Random Phase Shifting Technique, 2009.

[80] Zhaoyang Wang, Bongtae Han: Enhanced Random Phase Shifting Technique

[81] K. Schlüns and R. Klette, "Local and global integration of discrete vector fields," in Advances in Computer Vision, 8th TFCV workshop, Dagstuhl, Springer, 1996.

[82] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Runge%E2%80%93Kutta-m%C3%B3dszer>

[83] J. C. Butcher: Coefficients for the study of Runge-Kutta integration process, 1982.

[84] Venema T. M., and Schmidt J. D.: Optical phase unwrapping in the presence of branch points, Optics Express, Vol. 16, No. 10, pp. 6985-6998, 12 May 2008.

[85] Dardyk G., and Yavneh I.: A Multigrid Approach to Two-Dimensional Phase Unwrapping, Numerical Linear Algebra with Applications, Vol. 11, No. 2-3, pp. 241-259, March-April 2004.

[86] I. Kasa, "A circle fitting procedure and its error analysis," IEEE Trans. Instrum. Meas. , 8–14, March 1976.

[87] Rusu C., Tico M., Kuosmanen P., and Delp E. J.: Classical geometrical approach to circle fitting — review and new developments, Journal of Electronic Imaging, Vol. 12, No. 1, pp. 179-193, January 2003.

[88] OM4-Görbületi sugar meghatározása golyós szferométerrel (mérési segédlet)
http://canopus.mogi.bme.hu/letoltes/OPTIKA%20ES%20LATORENDSZEREK/OM4_gorbuleti_sugar_meghatározása_golyos_szferometerrel.pdf

[89] Faber C., Knauer M. C., and Häusler G.: Can Deflectometry Work in Presence of

Parasitic Reflections?, Institute of Optics, Information and Photonics, University of Erlangen-Nuremberg, DGaO Proceedings 2009.