

ORTOPÉDIAI CÉLÚ DEFLEKTOMETRIAI KÉPEK FOURIER-MÓDSZERES FELDOLGOZÁSA

Nochta Gergő, Antal Ákos

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék

gergo.nochta@gmail.com

DOI: 10.17489/biohun/2016/1/01

Absztrakt

Az orvostechnikai képalkotási eljárások között az érintésmentes vizsgálatok felhasználási köre egyre bővül, a mélységmérétek meghatározására számtalan módszer ismert. Ezeket az ortopédiai gyakorlatban emberi testrészek alakjának meghatározására, alsó háti deformációk elemzésére, gerincferdülés szűrésére és utánkövetésére alkalmazzák. Módszerüket tekintve speciális struktúrák leképezésén alapulnak. Az alábbiakban példát mutatunk a műszaki gyakorlatban is alkalmazott profilometriás felvételek, felület visszaállítás céljából történő Fourier-módszeres feldolgozására és a mélységi információ pszeudo-moiré képekké való alakítására.

Kulcsszavak: deformáció, 3D, képfeldolgozás, Fourier transzformáció, moiré

Processing of orthopaedic images by Fourier-transform

Abstract

Optical non-contact measurement methods are more and more widely used in medicine. Nowadays there are numerous techniques to get the depth information of an object. These are suitable in orthopaedic practice. With this procedure we will be able to examine the lower back deformities, we can analyse the state of scoliosis and the changes over time. Most of the methods are based on structural pattern projection technique. In this paper we present a method which uses Fourier-transform to extract the height information. From this data we are able to generate pseudo-moiré images.

Keywords: deformation, 3D, image processing, Fourier transformation, moiré

Bevezetés

Manapság a legkorszerűbb mérés-technikai eljárások optikai elvre épülnek. Előnyük az érintésmentesség, gyorsaság és a valós idejű feldolgozhatóság. A háromdimenziós technikák a fénykorukat élik, terjedésük dinamikus. A profilometria is egy térbeli rekonstrukciós eljárás. A mérés segítségével az egész kisméretű felületektől, akár több négyzetméteres térbeli, diffúzan visszaverő felületekig azok geometriája rekonstruálható anélkül, hogy a felületeket bármi módon meg kellene érinteni.

A térbeli képek előállítása és feldolgozása előszeretettel alkalmazott módszer a gépi látásban, az intelligens robotirányításban, az ipari feldolgozásban, a gyógyászatban és még számos területen. A leggyakrabban alkalmazott módszerek a strukturált fényes megvilágítások csoportjába tartoznak. A legismertebbek a moiré-technika, a fázismérésen alapuló profilometria (PMP), a Fourier-transzformációs profilometria (FTP) és a moduláció mérésen alapuló profilometria (MMP). A számítógépes képfeldolgozás fejlődésével újabb megoldások jelentek meg, ilyen a vivőfrekven-

cia érzékelős (SPD) és a lézer háromszögeléses mérés, valamint a színes mintavetítésen alapuló profilometria.

A legtöbb térbeli megoldásnál egy periodikus csíkozatot vetítenek a rekonstruálandó felületre, majd ezt detektálják és dolgozzák fel. A referenciaként szolgáló és a deformált mintázatból számítható a kettő közti fáziskülönbség az adott pontban. A Fourier-transzformáció segítségével megvalósított eljárást először 1982-ban M. Takeda^{1,2} publikálta. Az ő első technikája 1D Fourier-transzformációs elvre épült. Rajta kívül még Macy,³ Womack,⁴ Nugent⁵ is behatóan foglalkozott ezzel a megoldással. A kétdimenziós változat gyakorlati alkalmazására először 1986-ban került sor Bone,⁶ majd Roddier⁷ által. A módszer fejlődését és gyakorlati alkalmazását lényegében Takeda, Macy és Bone eredményei indították el.

A Fourier-transzformációs megoldás egyik nagy előnye a korábban említettekhez képest, hogy a teljes térbeli feldolgozáshoz egyetlen kép elegendő. A Moiré-topográfiahoz képest előny az is, hogy FTP-vel a negatív és pozitív domborzat jól elkülöníthető, nem igényel egyéb interpolációs algoritmusokat. A fázisléptetéses (PMP) és a moduláció méréses (PMP) megoldásoktól eltérően itt elég egyetlen kép, aminek köszönhetően valós idejű és dinamikus mérésre is felhasználható.

A kezdetben alkalmazott egyszerű Fourier-transzformációs módszer hátránya, hogy az objektum maximálisan mérhető meredekségét nagymértékben korlátozza a vetítő és a detektáló egység geometriai elhelyezkedése. Takeda publikációjának megjelenése után az FTP eljárás széles körben kutatóvá vált. 1989-ban négy kínai kutató ötvözte az úgynevezett kvázi-szinuszos és a π -fázistolásos technikát.⁸ Ilyenkor két képet készítenek, egyik felvételen nulla, másikon pedig π -vel eltolt a vetített csíkozatot, a rendszer minden más egyéb para-

métere állandó marad. Ezután képezik a két minta különbségét, ezáltal a nullafrekvenciás komponens is eliminálható. A módszer előnye a korábbihoz képest, hogy a mérhető maximális meredekség a háromszorosára nőtt, köszönhetően az egyenáramú összetevő eltávolításának.

Lin és Su⁹ 1995-ben megvalósítottak egy olyan mérést, ami lehetővé tette a szakadásokkal rendelkező felületek azonosítását. Így a mintán keletkező különböző folszerű zajok is könnyen kiszűrhetők voltak. A módszerük lényege, hogy a Fourier-transzformációból kapott spektrumot egy speciális szűrővel úgy módosították, hogy az alapharmonikus melletti frekvenciákat erősítették, a többi pedig gyengítették. Ezután inverz transzformációval meghatározható volt a fázis.

A CCD-k fejlődésével megjelentek a nagysebességű, úgynevezett TDI (Time Delay Integration) kamerák. Su, Saján és Asundi¹⁰ egy 360° -ban körbeforgó tárgyat térképezett le úgy, hogy az objektumra egyetlen vonalat vetített, majd forgatás közben a kamera rögzítette a deformált csíkokat. Ezután a felvett képre kétdimenziós Fourier-transzformációt alkalmazva meghatározható volt a geometria.

Az utóbb három évtizedben rengetegen foglalkoztak és jelenleg is foglalkoznak a kérdéssel, ennek köszönhetően sok más számítási módszer is született. Ezek nagy részét Gorthi foglalta össze publikációjában.¹¹

Módszerek

Egy tipikus vetítő egységet (1), detektort (2) és a feldolgozást végző számítógépet (3) integráló profilometriai elrendezés látható az 1. ábrán.

A profilometriai mérés során egy periodikus struktúra vetül a felületre. A felszíni egyenletlenség által deformált, visszavert mintát rögzítik.

zítik. Egy adott módszerrel (például a Fourier-transzformáció segítségével) elvégzik a felvételek feldolgozását és a fázis-moduláció számítását. A kapott fázist kicsomagolják, ami azt jelenti, hogy a $0-2\pi$ korlátosságából adódó szakadós fázisképet folytonossá teszik, ami ez által lesz arányos a felület geometriájával. A rendszert kalibrálják, és a kapott értékeket átszámítják a valós, háromdimenziós térbe. A teljes folyamat a 2. ábrán látható.

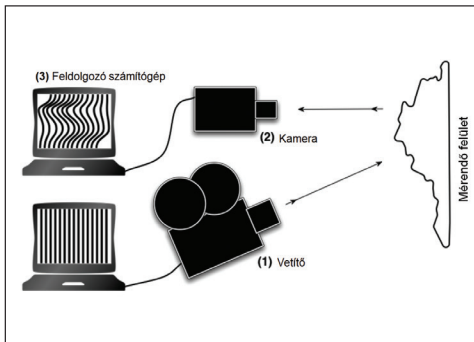
Mintázat vetítésére a legelterjedtebbek a DLP és LCD projektorok. Korábban léteztek egyéb megoldások, mint például a hagyományos interferometrikus elvű, vagy lézerdiódás vetítés. A deformált mintát felépítő harmonikus frekvenciák meghatározásának első és az egyik legelterjedtebb módszere a Fourier-transzformáció (FTP), de a teljesítmény és pontosság

javítása érdekében, és a számítástechnika fejlődésének köszönhetően ennek mára rengeteg módosított, kiegészített változata létezik. Ilyen például az Interpolált Fourier-transzformáció,¹² és az ablakozott Fourier-transzformáció.¹³ A Fourier-transzformáció mellett alkalmazzák még az egy- és a kétdimenziós wavelet-transzformációt^{14,15} is, vagy a fázisléptetéses (PSP) módszert. A mérés egyik kulcsfolyamata, a csíkozat feldolgozás, nagymértékben befolyásolja a feldolgozás sebességét. Az utóbbi három évtizedben több módszer fejlődött ki, melyek térbeli és időbeli kategóriába sorolhatók. Térbeli módszernél egy vetített kép is elegendő, a pontosság a frekvencia növelésével javítható, de a frekvencia növelése miatt a kép felbontását is növelni kell, ami viszont a teljesítmény-igényt növeli. Időbeli módszernél több különböző fázisú képre van szükség, ami miatt ez csak statikus tárgyak mérésére alkalmazható.

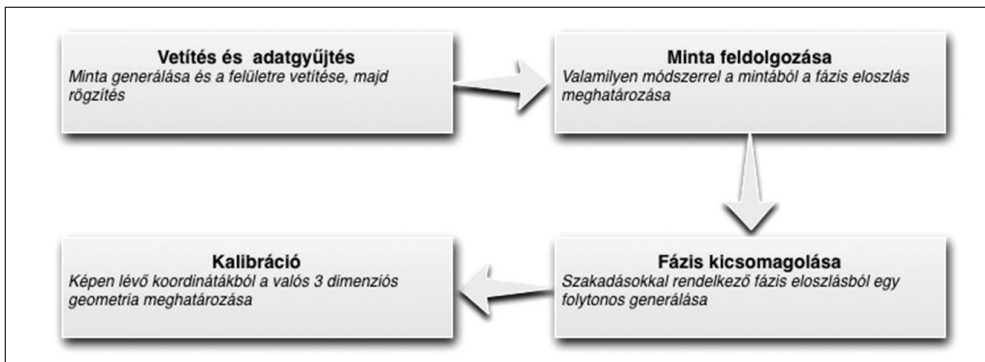
Térbeli kategóriába sorolható a Fourier-transzformációs módszer (FTP). Ilyenkor a deformált $g(x,y)$ és a síkra vetített referencia $g_0(x,y)$ minta matematikailag komplex számok összegeként modellezhető.

$$g(x,y) = r(x,y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{j(2\pi f_0 x + n\phi(x,y))} \quad (1)$$

$$g_0(x,y) = r_0(x,y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{j(2\pi f_0 x + n\phi_0(x,y))} \quad (2)$$



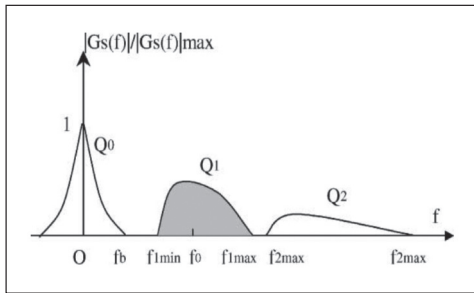
1. ábra. Profilometriás mérési elrendezés



2. ábra. A profilometriai mérési folyamat végrehajtásának lépései

(1) és (2) kifejezésekben az $r(x,y)$ és $r_0(x,y)$ megadja a felület nem egyenletes visszaveréséből adódó nullafrekvenciás egyenáramú összetevőt. A_n a súlyfaktor, f_0 a mintázat vivőfrekvenciája. $\varphi(x,y)$ és $\varphi_0(x,y)$ pedig a fázis szög x és y képkoordinátrák függvényében. A fenti komplex összegnek képezve a Fourier transzformáltját megkapható a spektrum, amiből a megfelelő frekvencián áteresztő szűrő segítségével lesűrízhető a szükséges komponens.

A 3. ábra mutatja a Fourier kép egy szeletét, szűrővel pedig a számunkra szükséges frekvencia összetevők láthatók.



3. ábra. A Fourier transzformált kép egy sora. Szűrővel jelölve a számunkra szükséges frekvencia tartomány¹⁶

A szűrt spektrumra inverz transzformációt alkalmazva kapjuk:

$$\hat{g}(x,y) = A_1 r(x,y) e^{j(2\pi f_0 x + \varphi(x,y))} \quad (3)$$

$$\hat{g}_0(x,y) = A_1 r_0(x,y) e^{j(2\pi f_0 x + \varphi_0(x,y))} \quad (4)$$

Matematikai átalakítások felhasználásával adódik a referencia és a modulált jel között lévő fáziskülönbség.

$$\overline{g}(x,y) \overline{g}_0^*(x,y) = A_1^2 r(x,y) r_0(x,y) e^{j(\varphi(x,y) - \varphi_0(x,y))} \quad (5)$$

$$\Delta\varphi(x,y) = \text{Im}(\ln[\overline{g}(x,y) \overline{g}_0^*(x,y)]) \quad (6)$$

Ahol $\overline{g}_0^*(x,y)$ a referencia mintázat komplex konjugáltja. $\Delta\varphi(x,y)$ pedig a fázistolás a két jel között, ami tartalmazza a tárgy geometriáját.

Időbeli kategóriába tartozik a fázisléptetéses technika. Ilyenkor négy, egymáshoz képest 0° - 90° - 180° - 270° -kal eltolt szinuszos mintát vetítünk a felületre, majd ezen mintákból egyszerű matematikai megfontolások alapján megkapható a fázistolás.¹⁷ Előnye, hogy jóval kevesebb számítást igényel, mint az FTP.

$$I_{0n}(x,y) = I_0(x,y) + I_m(x,y) \cos\left(2\pi f_0 y + \varphi_0(x,y) + \frac{n\pi}{2}\right) \quad (7)$$

$$I_n(x,y) = I_0(x,y) + I_m(x,y) \cos\left(2\pi f_0 y + \varphi(x,y) + \frac{n\pi}{2}\right) \quad (8)$$

$n = 0, 1, 2, 3$ (9)

$$\varphi_0(x,y) = \arctan\left[\frac{I_{03}(x,y) - I_{01}(x,y)}{I_{00}(x,y) - I_{02}(x,y)}\right] \quad (10)$$

$$\varphi(x,y) = \arctan\left[\frac{I_3(x,y) - I_1(x,y)}{I_0(x,y) - I_2(x,y)}\right] \quad (11)$$

$$\Delta\varphi(x,y) = \varphi(x,y) - \varphi_0(x,y) \quad (12)$$

Ahol az $n=90^\circ$ -kal eltolt $I_{0n}(x,y)$ a vetített referencia minta intenzitás változása, $I_n(x,y)$ a deformált kép intenzitása. f_0 a mintázat vivőfrekvenciája $\varphi_0(x,y) + n\pi/2$ és $\varphi(x,y) + n\pi/2$ pedig a fázis változás. $\Delta\varphi(x,y)$ a két jel közötti fáziseltérés.

Fázis számítása a deformált csíkozathól az említett módszerek segítségével az $\arctg()$ függvény miatt csak a $-\pi$ és $+\pi$ intervallumok között lehetséges. Általában a valós fázisváltozás ennél a 2π intervallumnál nagyobb, ezért a függvényből kapott értékek szakadásokat tartalmaznak, azonban a szakadásos függvény folytonossá tehető, ha a szakadás helyén a minimum és a maximum érték között létrejövő 2π a különbséget a változás irányának függvényében $\pm 2\pi$ -vel korrigáljuk. A feladat triviálisnak tűnik, de megvalósítása nem mindig egyszerű az árnyékok, a felületi szakadások és a zajok miatt. Több ismert algoritmus létezik, mely a sötét részek felismerésével, majd elhanyagolásával, vagy adott sorrendű kibontásával valósítja meg a szakadásokkal rendelkező fázis megfelelő helyreállítását.¹⁸

A mérési folyamat utolsó, bár nem mindig létfontosságú lépése a kalibrálás. Ebben a lépésben a fázisból kapott térbeli koordinátákat konvertálják át valós, háromdimenziós koordinátákká. Alkalmazható a korábban már említett háromszögeléses technika is. Ehhez szükség van a vetítő és a rögzítő berendezés belső és külső geometriai paramétereinek meghatározására, melyek megadása bonyolult vagy sokszor egyáltalán nem lehetséges, ezért célirányos kalibrálási technikákat dolgoztak ki. Két alapvető fajtájuk ismert, a lineáris és a nem lineáris kalibráció, melyekkel néhány felvételtől meghatározhatók a szükséges paraméterek. Speciális alkalmazások esetén, mint például különböző alakzatok vagy arc felismerése, egy opcionális, de gyakran alkalmazott befejező lépés a textúra illesztése.¹⁹ A mérés típusától függ, hogy lehetséges-e az objektumról csíkozott mentes kép rögzítése. Ez statikus méréseknél általában megvalósítható, de dinamikus folyamatoknál erre nincs idő. Ilyenkor a csíkosan rögzített képből kell visszanyerni a képi információt, melyhez gyakran egy aluláteresztő szűrőt alkalmaznak.

Árnyékok és szakadások a mintában szintén komoly problémát jelentenek a fázis változás folytonossá tétele szempontjából. Több projektor használatával megoldható néhány, a profilometriát terhelő komoly probléma. Eltüntethetők a pontos mérést meghiúsító helyi árnyékok, vagy az optikailag nem minden szögből belátható régiók.²⁰

A fázisléptetéses technika (PSP) előnye a térbeli elvhez képest, hogy jó minőségben, nagy felbontásban rekonstruálhatók a háromdimenziós felületek. Azonban ez legalább három képet igényel, ezért dinamikus mérések esetén nem alkalmazható. A többcsatornás megközelítés megoldás a problémára; Huang²¹ bemutatott egy megoldást, amelyben egyetlen képből valósította meg a fázisléptetéses technikát. A három fázisban, a különböző mintát

RGB komponensekben kódolta. A mintát számítógéppel generálta és digitális projektorral vetítette a felületre. Ezt egy CCD kamerával rögzítette, majd ezt választotta szét RGB összetevőkre, és így generálta a három fázisban a különböző képeket. Mivel a színinformáció hordozza a fázisban eltolt mintát, a CCD felépítéséből adódóan a színek között egymásra hatás jön létre, ami jelentősen befolyásolja a mérés eredményét.²² Ennek kiküszöbölésére speciális megoldásokat^{23,24} dolgoztak ki.

A szakadásokat és optikailag izolált területeket tartalmazó felületek profilometriával történő mérése nagy nehézséget okoz, azonban ilyenkor a fázisszakadás nem az $\arctg()$ függvény korlátossága miatt következik be. A probléma kiküszöbölésére több megoldás létezik, de általában ezekhez egy kép nem elegendő. Az egyik megoldást a színes (RGB) csíkokat vetítő strukturált megvilágításos technika jelentette,^{25,26} de ezzel kis mélységi tartományok határozhatók csak meg. Egy másik lehetséges módszer, amivel a háromdimenziós nagyfelbontású mérés elvégezhető HLS (színezet, telítettség, intenzitás) színteret használt, és ezt kombinálja a szinuszos csíkokkal.^{27,28} Ezzel a módszerrel már valós idejű pontos mérések is végezhetők.

Napjainkban az érintésmentes vizsgálatoknál a profilometriát széles körben alkalmazzák. Biológiai és orvostudományi területeken, mint például az emberi test alakjának meghatározása, vagy a radioterápiás kezelés,²⁹ alsó háti deformációk elemzésére,³⁰ gerincferdülés detektálására és elemzésére³¹ terjedt el.

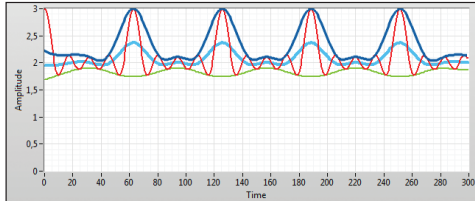
Műszaki, ipari felhasználása szintén széleskörű, rezgéselemzés,³² refraktometria,³³ reverse engineering,³⁴ nyomtatott áramkörök minőség ellenőrzésére,³⁵ valamint kinematikai vizsgálatoknál, a pozíció meghatározására.³⁶ Biztonságtechnikában az arc felismerés egyik fontos eszköze.³⁷

Eredmények

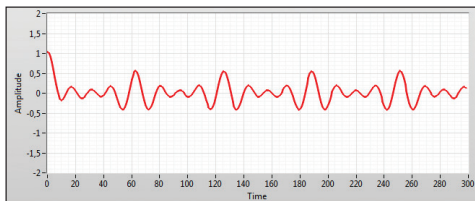
A periodikus minta és a képek feldolgozását végző algoritmust LabVIEW környezetben fejlesztettük. A nullafrekvenciás komponens eltávolítását, Fourier-transzformációt, a komplex kép szűrését és a fázis kicsomagolását is algoritmusunk végezte.

A programban lehetőség van a minta periódus számát és fázistolását beállítani, valamint egy kapcsoló segítségével váltani, hogy a generálás után teljes képernyős vagy csak adott méretű ablakban legyenek láthatók a csíkozatok.

Az egyenáramú komponens eltávolításához szükséges programrészben a jel középvértékének eltolása egy úgynevezett Empirical Mode Decomposition nevű algoritmus szerint valósul meg. Ez úgy történik, hogy a program a bemenő jelnek megkeresi minden egyes maximum pontját, ezen pontokra egy spline görbét illeszt. Ugyanez történik a minimum pontok-



4. ábra. Eredeti jel (piros), maximumok burkoló görbéje (sötétkék), minimumok burkoló görbéje (zöld), burkológörbék átlaga (világoskék)



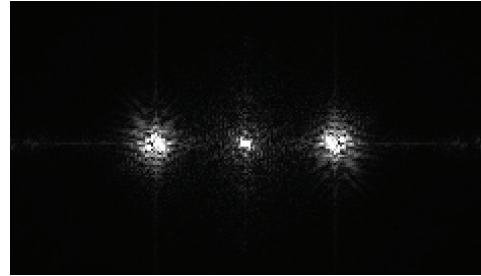
5. ábra. „0” középvértékbe elolt jel

kal is. A két spline görbe összegét és elosztva kettővel, a kapott középvértéket kivonhatjuk minden egyes jel értékéből. Ennek hatására a jel offset értéke eltolódik a 0 szint irányába.

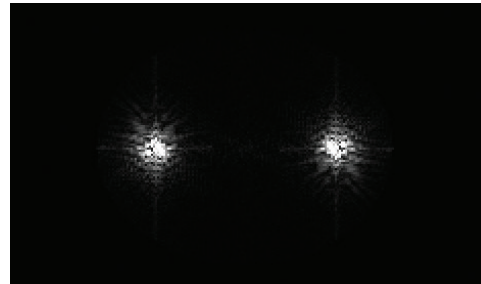
Az 4. ábrán látható pirossal az eredeti jel, offset értéke kettő. Ezen jelnek maximumaira illesztette a sötétkék görbét, minimumaira pedig a zöldet. A két illesztett görbe középvértéke látható világoskék színnel. Az 5. ábrán pedig az adott számú iteráció után elolt jel látható.

A nullafrekvenciás (egyenáramú) összetevő eltávolítása a kép Fourier-transzformáltján is jól látható (6. és 7. ábra). A fázisváltozás szakadásainak megszüntetésére a LabVIEW beépített phase unwrap algoritmusra került felhasználásra.

Valós képeken végzett vizsgálatok esetén min-



6. ábra. Adott kép Fourier-transzformáltja, ami még tartalmazza a DC komponenst



7. ábra. A 6. ábrán látható komplex kép szűrt állapotban

den képen egyedileg kell beállítani a szűréshez szükséges paramétereket. De megfelelő beállítások megválasztása után a folyamat jól alkalmazható. A következő ábrákon láthatók a rögzített, komplex és szűrt komplex, fázisváltozást bemutató képek, valamint a háromdimenziós felületek.

A 8. ábrán egy ortopédiai célú felvétel található; a hát felületére periodikus struktúra lett vetítve. Ugyanezen felvétel egy elektronikus moiré-berendezés^{38,39} bementi adata; a háton deformált struktúra egy egyenközűvel mintavételezve moiré-jelenséget eredményez. Ez látható a 8.c ábrán. Az ilyen módszerrel rögzített moiré-felvételeket elsősorban gerincferdüléssel betegek kezelése során, utánkövetés céljából

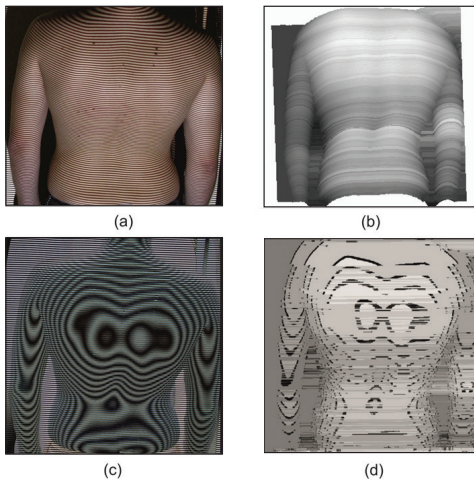
készítik. A moiré-képek idősorozatából jól követhető a kezelés hatékonysága, a gerinc alakjának időbeli változása.

A 8.b ábrán látható felület a deflektometriás kép Fourier-transzformációs feldolgozásával lett visszaállítva. A számítás során kapott pont-halmaz három dimenzióban van ábrázolva, és kissé meg van döntve, ezért tér el a többi képtől. A 8.d ábra pedig egy – a deflektometriás kép segítségével generált – pszeudo-moiré felvétel. Készítése során a visszaállított háromdimenziós felület adataiból egy kiválasztott referenciafelületről egyenlő távolságra lévőkk lettek összekötve, melyek a moiré-csíkoknak felelnek meg.

Értékelés

A kísérleti eredményekből jól látható, hogy a bemutatott eljárás működőképes valós képek esetében. Fourier-transzformációval egy deformált és egy referencia mintázatból létrehozható a felület. Az alkalmazott algoritmus segítségével eltávolítható a nullafrekvenciás összetevő, a nagyobb frekvenciák szűrése pedig komplex és idő tartományban is megvalósítható. A visszaállított háromdimenziós információ alapján pszeudo-moiré képek generálhatók.

A továbbfejlesztési lehetőség egy olyan fázis kibontó algoritmus fejlesztése, ami a bizonytalan – elsősorban árnyékos – helyeken nem veszi figyelembe a fáziskülönbség változását. Mivel jelenleg a szűrési paramétereket a felhasználónak magának kell minden képen beállítania, ezért indokolt egy olyan adaptív szűrő fejlesztése, ami a szűretlen Fourier transzformált kép alapján az algoritmus-paramétereit illeszti a feldolgozandó képhez.



8. ábra. Valós felületről készült felvétel feldolgozása

- ortopédiai célú profilometriás felvétel
- a profilometriás felvétel alapján rekonstruált háromdimenziós felület alakja
- a vizsgálat tárgyát képező felületről készült ortopédiai célú elektronikus moiré-felvétel
- a profilometriás módszerrel visszaállított felület alapján készült pszeudo-moiré felvétel

IRODALOM

1. *Takeeda M, Ina H, Kobayashi S.* Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *Journal of the Optical Society of America* 1982;72(1):156-60. DOI: 10.1364/JOSA.72.000156.
2. *Takeeda M, Mutoh K.* Fourier-transform profilometry for the automatic-measurement of 3-d object shapes. *Applied Optics* 1983;22(24):3977-82. DOI: 10.1364/AO.22.003977
3. *Macy WW.* Two-dimensional fringe-pattern analysis. *Applied Optics* 1983;22(23):3898-01. DOI: 10.1364/AO.22.003898.
4. *Womack KH.* Frequency domain description of interferogram analysis. *Optical Engineering* 1984;23(4):234396-6. DOI: 10.1117/12.7973307.
5. *Nugent KA.* Interferogram analysis using an accurate fully-automatic algorithm. *Applied Optics* 1985;24(18):3101-5. DOI: 10.1364/AO.24.003101.
6. *Bone DJ, Bachor HA, Sandeman RJ.* Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier-transform. *Applied Optics* 1986;25(10):1653-60. DOI: 10.1364/AO.25.001653.
7. *Roddiar C, Roddiar F.* Interferogram analysis using Fourier-transform techniques. *Applied Optics* 1987;26(9):1668-73. DOI: 10.1364/AO.26.001668.
8. *Su X.* An improved Fourier-transform profilometry. *SPIE Proceedings* 1989;0954:5.
9. *Lin JF, Su XY.* 2-dimensional Fourier-transform profilometry for the automatic-measurement of 3-dimensional object shapes. *Optical Engineering* 2005;34(11):3297-302. DOI: 10.1117/12.212911.
10. *Su XY, Sajan MR, Asundi A.* Fourier-transform profilometry for 360 degrees shape using TDI camera. In: Chau FS Lim CT ed. *International Conference on Experimental Mechanics: Advances and Applications*, Vol. 2921. Bellingham: Spie 1997; p. 552-6. DOI: 10.1117/12.269875.
11. *Gorthi SS, Rastogi P.* Fringe projection techniques: Whether we are? *Optics and Lasers in Engineering* 2010;48(2):133-40. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.09.001.
12. *Vanlanduit S, et al.* Fourier fringe processing by use of an interpolated Fourier-transform technique. *Applied Optics* 2004;43(27):5206-13. DOI: 10.1364/AO.43.005206.
13. *Kemao Q.* Windowed Fourier-transform for fringe pattern analysis. *Applied Optics* 2004; 43(13):2695-702. DOI: 10.1364/AO.43.002695.
14. *Zhong JG, JW Weng.* Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry. *Applied Optics* 2004;43(26):4993-8. DOI: 10.1364/AO.43.004993.
15. *Liu CY, Zhou B, Zhao XM.* A modified wavelet transform profilometry. *Frontier in Funct Manufact Techn* 2010;136:140-3. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.136.140.
16. *Su X, Chen W.* Fourier-transform profilometry: a review. *Optics and Lasers in Engineering* 2001 May;35(5):263-84. DOI: 10.1016/S0143-8166(01)00023-9.
17. *Hui TW, Pang GKH.* 3-D measurement of solder paste using two-step phase shift profilometry. *Electronics Packaging Manufacturing, IEEE Transactions* 2008;31(4):306-15. DOI: 10.1109/TEPM.2008.2004573.
18. *Saldner HO, Huntley JM.* Temporal phase unwrapping: Application to surface profiling of discontinuous objects. *Applied Optics* 1997;36(13):2770-5. DOI: 10.1364/AO.36.002770.
19. *Georghiadis AS, Belhumeur PN, Kriegman DJ.* From few to many: Illumination cone models for face recognition under variable lighting and pose. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2001;23(6):643-60. DOI: 10.1109/34.927464.
20. *Skydan OA, Lalor MJ, Burton DR.* Technique for phase measurement and surface reconstruction by use of colored structured light. *Applied Optics* 2002;41(29):6104-17. DOI: 10.1364/AO.41.006104.
21. *Huang PSS, Zhang CP, Chiang FP.* High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection. *Optical Engineering* 2003;42(1):163-8. DOI: 10.1117/1.1525272.
22. *Zhang ZH, Towers CE, Towers DP.* Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection. *Optics Express* 2006;14(14):6444-55. DOI: 10.1364/OE.14.006444.
23. *Hu YS, et al.* A calibration approach for decoupling colour cross-talk using nonlinear blind signal separation network. *Commad 04: 2004 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, Proceedings*; 2005. p. 265-8. DOI: 10.1109/COMMAD.2004.1577541.
24. *Kinell L.* Multichannel method for absolute shape measurement using projected fringes. *Op-*

- tics and Lasers in Engineering 2004;41(1):57-71. DOI: 10.1016/S0143-8166(02)00148-3.
25. Liu WY, et al. Color-coded projection grating method for shape measurement with a single exposure. Applied Optics 2000;39(20):3504-8. DOI: 10.1364/AO.39003504.
 26. Pagés J, et al. Optimised De Bruijn patterns for one-shot shape acquisition. Image and Vision Computing 2005;23(8):707-20. DOI: 10.1016/j.imavis.2005.05.007.
 27. Philip F, Buron F. Sensing deforming and moving objects with commercial off the shelf hardware. 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) - Workshops; 2005 June 25; San Diego, USA. DOI: 10.1109/CVPR.2005.524.
 28. Gorthi SS, Lolla KR. Novel single shot structured light technique for accurate, reliable and dense 3d shape measurement. Proceedings of International Conference on Optics & Optoelectronics 2005; OP-OIP-6.
 29. Lilley F, Lalor MJ, Burton DR. Robust fringe analysis system for human body shape measurement. Optical Engineering 2000;39(1):187-95. DOI: 10.1117/1.602351.
 30. Hanafi A, Gharbi T, Cornu JY. In vivo measurement of lower back deformations with Fourier-transform profilometry. Applied Optics 2005;44(12):2266-73. DOI: 10.1364/AO.44.002266.
 31. Berryman F, et al. A new system for measuring three-dimensional back shape in scoliosis. European Spine Journal 2008;17(5):663-72. DOI: 10.1007/s00586-007-0581-x.
 32. Yilmaz ST, et al. Vibration amplitude analysis with a single frame using a structured light pattern of a four-core optical fibre. Optics Communications 2005;249(4-6):515-22. DOI: 10.1016/j.optcom.2005.01.032.
 33. de Angelis M, et al. Liquid refractometer based on interferometric fringe projection. Optics Communications 2000;175(4-6):315-21. DOI: 10.1016/S0030-4018(00)00477-6.
 34. Hecht J, et al. Triangulation based digitizing of tooling and sheet metal part surfaces - measuring technique, analysis of deviation to CAD and remarks on use of 3D-coordinate fields for the finite element analysis. Sheet Metal 2007;344:847-53.
 35. Hong D, et al. Sensor fusion of phase measuring profilometry and stereo vision for three-dimensional inspection of electronic components assembled on printed circuit boards. Applied Optics 2009;48(21):4158-69. DOI: 10.1080/00304018.99.100595-7.
 36. Tan S, Song DQ, Zeng L. A tracking fringe method for measuring the shape and position of a swimming fish. Optics Communications 2000;173(1-6):123-8. DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00595-7.
 37. Yagnik J, et al. 3D shape extraction of human face in presence of facial hair: A profilometric approach. Tencon 2005 - 2005 IEEE Region 10 Conference, Vols 1-5, 2006; p. 2581-5. DOI: 10.1109/TENCON.2005.301088.
 38. Wenzel K, Antal Á, Molnár J, Tóth B, Tamás P. New optical equipment in 3D surface measuring. Journal of Automation Mobile Robotics & Intelligent Systems 2009;3(4):29-32.
 39. Gaál Zs, Antal Á, Tamás P. Scoliosis testing features on the basis of electronically generated moiré patterns. Biomechanica Hungarica 2010; 3(1):84-92.

A szerzők ezúton szeretnék kifejezni köszönetüket dr. Kiss Rita egyetemi tanárnak a munka során nyújtott hathatós segítségéért és szakmai támogatásáért. A kutatás része volt a GERINCOR (TECH_08-A1/2-2008-0121) projektnek, melyben ortopédiai deformitások megfigyelésére és gondozására szolgáló intelligens eszköz és módszer kifejlesztése volt a fő feladat. A munka szakmai tartalma kapcsolódott az „Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0009 program támogatta. A deflektometriás és a moiré kép a Salus Kft. gyógytornatermében készült.

Nochta Gergő

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
Tel.: (+36) 1 463-2602