Vizuális burok alapú 3D rekonstrukció fényforrás képek használatával hajlított rugó idomok méréséhez

Kátai-Urbán Gábor[1], Megyesi Zoltán[2]

[1] Kecskeméti Főiskola, GAMF Kar, Informatika Tanszék
katai-urban.gabor@gamf.kefo.hu
[2] Kecskeméti Főiskola, GAMF Kar, Informatika Tanszék
megyesi.zoltan@gamf.kefo.hu

Absztrakt. A vizuális burok alapú 3D rekonstrukció elterjedt módszer olyan alkalmazásokban, amikor nincs szükség vagy nem kivitelezhető aprólékos 3D felület rekonstrukció. Gyakran alkalmazzák ha volumetrikus rekonstrukcióra van szükség a módszer gyorsasága és jó megvalósíthatósága miatt. A vizuális burok fő hátránya azonban, hogy a vizsgált objektumoknak csak a sziluettjét használja a rekonstrukcióhoz, így a sziluetten belül látható 3D információ elvész. Emiatt az objektumnak csak durva körvonala rekonstruálható, és különösen nagy problémát okoznak a takarások. A rekonstrukció minősége javítható a kamera nézetek számának növelésével, ám ez gyakran kedvezőtlenül érinti a megvalósított rendszer költségeit.
Ebben a cikkben javaslatot teszünk a kamerák fényforrásokkal történő kiváltására. Megmutatjuk hogyan lehet a fényforrás képet létrehozni, modellezni és kalibrálni. Bemutatunk egy vizuális burok alapú mérő rendszert amelyet hajlított rugó idomok mérésére fejlesztettünk.

1. Bevezetés

A 3D kamera rendszerek, mérőeszközök és 3D megjelenítők terjedésével a 3D rekonstrukciós módszerek egyre növekvő érdeklődést keltenek. Gyakran van szükség olyan mérő rendszerekre, amelyek a teljes testet rekonstruálják és kellően gyorsak ipari alkalmazásokhoz vagy akár mozgó objektumok mérésére is (mint például [3]). Az ilyen esetekben gyakran alkalmaznak Vizuális Burok [5] alapú módszereket. Ezek a módszerek akkor előnyösek amikor nincs szükség vagy nem kivitelezhető pontos 3D felület rekonstrukció illetve ha kimondottan volumetrikus térfogat modellre van szükség. A módszer előnye, hogy a 3D térfogatmodell megalkotásához a detektált objektumok sziluettjére van csak szükség, és a sziluettek elkészítése - így az objektumok detektálása is - jól elkülöníthető probléma marad a rekonstrukciótól. A módszer hátránya, hogy a sziluetteken látszó 3D információt nem használja fel, így a valós objektumnak csak közelítését kapjuk. Ez a közelítés annál pontosabb, minél több kamera nézetünk van, de az öntakarás még így is probléma. A kamerák számának növelése azonban sokszor anyagi

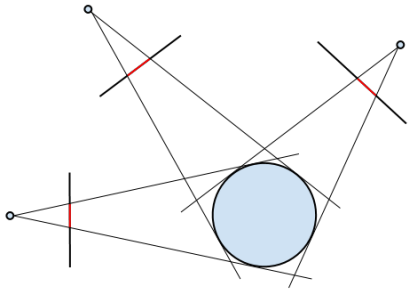
akadályokba ütközik. Erre a problémára megoldás lehet a forgóasztal (mint [8]), vagy a színtér küröl forgó kamera. Ilyenkor azonban a mérés időtartam megnő, a mozgást pedig pontosan modellezni és szinkronizálni kell a képkészítéssel. Az álatlunk javasolt megoldás során a kamerák mellett fényforrásokat helyezünk el. Megmutatjuk, hogy a fényforrásokhoz sziluett kép rendelhető és az így nyert képalkotó eszköz a kamerához hasonlóan modellezhető és kalibrálható. Ilyen módon a fényforrások számának növelésével a kameraszámot növelhetjük. Javaslatot teszünk a kamera rendszer kalibrálására is egy új külső kalibrációs objektum segítségével. Eredményeink jelenleg kezdetiek, de már alkalmaztuk a módszert egy vizuális burok alapú mérő rendszerben, melyet hajlított rugó idomok mérésére terveztünk. A mérő rendszer több kamerát és számos fényforrást tartalmaz. A rendszer részletes paramétereit és a kapott eredményeket a 10. fejezetben tárgyaljuk. Az alkalmazott Vizuális Burok módszerről részletesebben a 2. fejezetben olvashatunk, majd a javasolt kamera kalibrációt és fényforrás képet mutatjuk be. A kalibrációs eredményeket a 9. fejezetben találjuk.

2. Vizuális burok

Több eljárás is ismert a képi információk alapján történő 3D modellalkotásra. Ezeket a felhasznált információ alapján "shape-form-X" kategóriákba sorolhatjuk. A Vizuális Burok eljárás [5] a "shape-form-silhuett" alapú eljárás, mivel a modell előállításához az eredeti objektum kameraképeken detektálható körvonalát (sziluettjét) alkalmazza. Az eljárás bemenetét a térbeli objektumról több nézetből készített képek és a kamerák kalibrációs adatai képzik. A kalibrációs adatok azt írják le, hogy egy térbeli 3D pontot a kamera hogyan képez le a 2D képsíkjára. Több nézetből képeket készítünk a színtérről (1. ábra), ezután az objektum körvonalának pontjait a kameraképekről visszavetítjük a 3D térbe. Ezek egy-egy a kamerától távolodva bővülő kúpot jelölnek ki a térben. Ahol a különböző nézetből származó kúpok metszik egymást, ott rekonstruáljuk az objektumot a térben. Ezzel az eljárással a valós térbeli objektum konvex burkát kapjuk meg volumetrikus modellként. Fontos megjegyezni, hogy az objektum konkáv részeinek leírására nem alkalmas ez az eljárás. A rekonstruált modell a kamerák nézeteiből teljesen megegyezik az eredeti objektummal, viszont olyan nézetből, ahonnan nem volt kameránk, jelentkezik eltérés. A pontosságot úgy lehet növelni, ha a nézetek számát növeljük. A rekonstrukciós eljárás alkalmazása előtt az optikai rendszer vetítési tulajdonságait meg kell határozni.

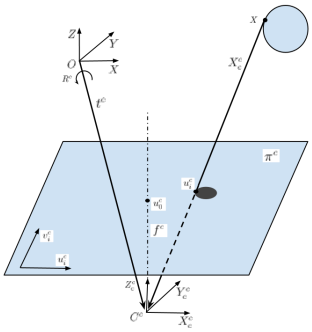
3. Kamera modell

Egy kamera vetítési tulajdonságainak leírásához a perspektív kamera vagy lyukkamera modellt alkalmazzuk [7]. Ez a modell a valós kamera egyszerűsített reprezentációja, amely a legtöbb képfeldolgozási feladat esetén felhasználható. A lyukkamera modell középpontos vetítéssel képzi le a színteret. Az 2. ábrán látható térbeli objektum az X pontját a π képsíkra az X_c^c vetítő sugár vetíti le. Minden vetítő sugár a C^c fókusz ponton megy keresztül és a kép ott keletkezik,



1. ábra: Vizuális burok

ahol a képsíkot ez metszi (u_i^c). A modellezett lencsére merőleges egyenes az optikai tengely. Ez a π^c képsíkot u_0^c pontban metszi, ami a döféspont. A lencse fókusztávolságát (f^c) a C^c u_0^c szakasz adja. Egy térbeli objektum egy pontja



2. ábra: Kamera modell

és ennek a képsíkon vett vetületének kapcsolatát a következőképpen adhatjuk meg [2]:

$$su_i^c = K^c[R^c, t^c]X \tag{1}$$

, ahol az $u_i^c = [u, v, 1]^T$ a képpont homogén koordinátái a kép koordináta-rendszerében $(O_i^c; u_i^c, v_i^c)$, a $X = [X, Y, Z, 1]^T$ az objektum homogén koordinátája a világ koordináta-rendszerben $(O; X, Y, Z)$ és s egy skálázási faktor. $[R^c, t^c]$ mátrix a kamera külső kalibrációs mátrixa, ami megadja a világ koordináta-rendszer és a kamera koordináta-rendszere közötti elforgatást és eltolást. A ka-

mera belső paramétereit a K^c kamera mátrix írja le:

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0^c \\ 0 & \beta & v_0^c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

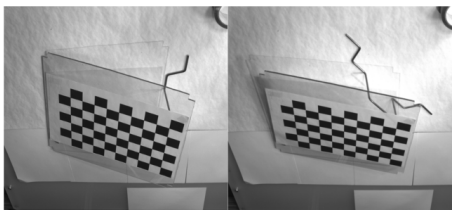
, ahol (u_0^c, v_0^c) a döféspont koordinátái, α és β a fókusztávolság komponensei az u_i^c és v_i^c tengelyek mentén, γ a kép koordináta-rendszer nyírását reprezentálja, amit a kamerák pontatlan összeszerelése okozhat.

4. Kamera kalibráció

A kamera vetítési tulajdonságainak meghatározásához az OpenCV [1] függvénykönyvtár eljárásait használtuk. Két lépésben végeztük a kalibrációt. Először a belső kamera paramétereket kell meghatározni, amelyek csak a kamera vetítési tulajdonságaitól függenek. Így amíg a fókusztávolság változatlan marad, a kamerák egymástól függetlenül kalibrálhatóak. Második lépésben a külső paraméterek kalibrációja következik, amely során az optikai rendszer elemeinek elhelyezkedését határozzuk meg a világ koordináta-rendszerben. Ennek a két kalibrációs lépésnek a részleteit mutatjuk be ebben a fejezetben.

4.1. Belső kamera kalibráció

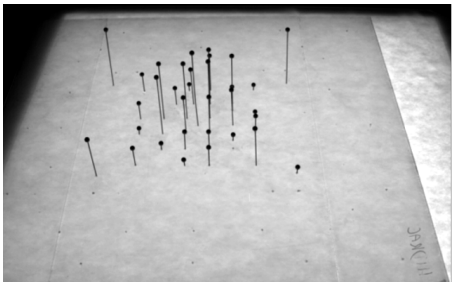
A belső kalibrációs eljárás célja, hogy a K (2) mátrix paramétereit meghatározzuk. Az alkalmazott eljárás Zhang [9] módszerén alapul. A módszer egy síkon felvett pontok különböző nézetből készült képei alapján tudja meghatározni a belső paramétereket. A síkbeli pontok felvételéhez papírlapra nyomtatott fekete-fehér sakktábla mintáról készítettünk felvételeket különböző nézetekből (3. ábra). A képeken detektált belő sarokpontok és a síkon ismert koordináták alapján az optimalizációs eljárás meghatározza a belső paramétereket.



3. ábra: Belső kamera kalibráció

4.2. Külső kamera kalibráció

A rekonstrukció szempontjából fontos tudnunk, hogy a kamerák hol helyezkednek el a térben és milyen irányba néznek. Ezeket a külső paramétereket a t eltolás vektor és az R forgatás mátrix írja le, amelyek segítségével a világ koordináta-rendszer pontjai és a kép koordináta-rendszerének pontjai közötti leképezés az (1) egyenlettel megadható.
A kamerák külső paramétereit úgy szeretnénk meghatározni, hogy azonos koordináta-rendszerbe kerüljenek, ami a közös világ koordináta-rendszere is lesz egyben. Ezért a külső kalibrációhoz szükséges 3D koordinátákat a közös színtérben vesszük fel. Fontos szempont, hogy a pontok lehetőleg a tér közepén, változó magasságokban legyen elrendezve a pontosabb paraméter közelítés érdekében. A külső kalibrációs objektum saját tervezésű, direkt erre a feladatra lett kialakítva. A kameraképeken ellipszisként megjelenő, vékony száron elhelyezkedő gömböket

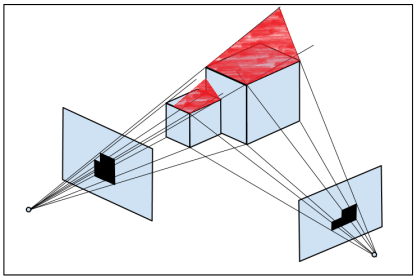


4. ábra: Külső kamera kalibráció

választottunk a térbeli pontok kijelölésére, amelyek könnyen detektálhatóak (4. ábra). A pozíciójukat 3D koordináta mérőgéppel határoztuk meg. Az így ismert térbeli pozíciók és a képeken detektált ellipszisek középpontjai alapján a külső paraméterek az OpenCV [1] függvénykönyvtár kalibrációs eljárásainak felhasználásával meghatározhatóak.

5. Módosított vizuális burok eljárás

A rekonstrukciós eljárás során a kameraképekből visszavetített kúpok metszetébe olyan térrészek is bekerülnek, amelyek nem tartoznak az objektumhoz (lásd: piros színnel a 5.ábrán). Ezek az objektumhoz nem tartozó részek a nézetek (kamerák) számának növelésével csökkenthetőek. Valós alkalmazásokban a kamerák száma nem növelhető tetszőleges mértékben, mivel ennek anyagi vonzatai vannak. Így mi egy olyan megoldást kerestünk erre a problémára, amivel a nézetek számát a kamerák árának töredékéből növelni tudjuk. Pontszerű LED fényforrásokat alacsony költséggel tudunk alkalmazni. Ezekkel külön-külön megvilágítva a színteret, az objektum különböző nézetbeli árnyékát kapjuk. Az árnyék sziluetteket is fel tudjuk használni a rekonstrukció során. Ha az árnyékokat



5. ábra: Viszuális burok: példa a visszavetítéskor keletkező hibára

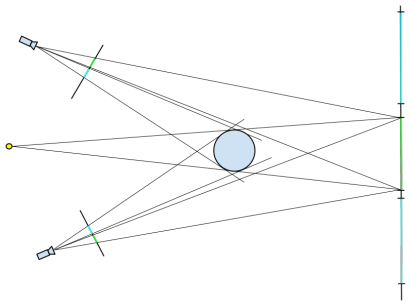
is vissza tudjuk vetíteni a térbe, akkor a kamerákkal egyenértékű nézeteket kapunk és így pontosíthatjuk az eljárást. A visszavetítéshez viszont elengedhetetlen, hogy legyen egy digitális árnyékképünk és a fényforrás vetítését leíró modell.

6. Fényforrás kép

A fényforrások és a kamerák vetítése sok ponton hasonló, de a nagy különbség, hogy a fényforrásokból nem nyerhető ki közvetlenül kép. Ehhez a kamerákat kell felhasználni. Az 6. ábrán középen látható objektum két kamera és egy fényforrás közös színterében helyezkedik el. A fényforrásból kiinduló fénysugarak egy része visszaverődik az objektumról, másik része az objektum mögött elhelyezett ernyőig eljut. Itt keletkezik az objektum árnyéka (zöld színnel jelölve). A kamera képeken az objektum (kék színnel) és az árnyékai (zöld színnel) is látható. Megfigyelhető az is, hogy az árnyék pozíciója nem függ a kamerák elhelyezkedésétől. Ha a kamera képeket egy sík sík transzformációval az ernyőre vetítjük, egy olyan képet kapunk, amin az árnyék pozíciója nem változik akármelyik kamerából is végezzük a vetítést. Ezt az árnyékképet tudjuk majd felhasználni a fényforrás vetítési tulajdonságainak megállapításához.

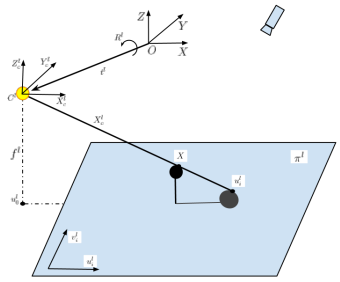
7. Fényforrás modell

Célunk az, hogy a vizuális burok előállításához a fényforrás képeket fel tudjuk használni. Ahogy a kamerák esetén is, itt is szükséges egy modell, ami leírja azt, hogy a térbeli objektumot hogyan képezi le a fényforrás árnyékképpé. Egy olyan fényforrás modellt mutatunk be, ami segítségével a fényforrás képét úgy tudjuk használni mint a kamerák képét. Az 7. ábrán a középpontos vetítést végző fényforrás modell látható. A pontszerű fényforrás C^l pontja képzi a vetítés középpontját. A π^l képsíkot az az ernyő adja, amin az árnyékot felfogjuk. A térbeli objektum a C^l középpont és π^l sík között helyezkedik el. A C^l-ből



6. ábra: Fényforrás kép előállítása

kiinduló X_c^l vetítősugár az objektum X pontját u_i^l pontba képzi le a képsíkra. Az u_0^l döféspont a képsíkon kívül helyezkedik el ebben az elrendezésben. A fényforrás fókusztávolságát az f^l szakasz adja. Ahhoz, hogy a fényforrás képekre



7. ábra: Fényforrás modell

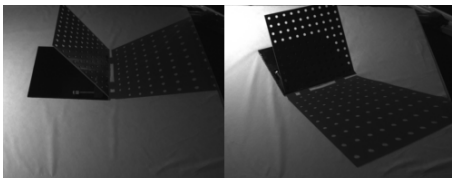
is tudjuk alkalmazni a 1 összefüggést, meg kell határoznunk a K és $[Rt]$ mátrixok paramétereit. A K kameramátrix (2) minden paramétere meghatározható a fényforrás modell alapján, a kamerákhoz hasonlóan.

8. Fényforrás kalibráció

A fényforrás modellt úgy alkottuk meg, hogy a kalibrációs eljárások, amiket a kamerák esetén alkalmaztunk, a fényforrásokra is felhasználható legyen.

8.1. Fényforrás belső kalibráció

A belső paraméterek meghatározásához, a kamerákhoz hasonlóan, egy síkbeli objektum képét (árnyékát) kell előállítanunk. Mivel a hagyományos papírra nyomtatott sakktábla mintának az árnyékképét nehezen tudtuk volna előállítani, más kalibrációs objektumot kellett terveznünk. Fontos, hogy a kialakított minta minél több, a kamera képeken pontosan meghatározható pontot tartalmazzon, amelyeket a fény és árnyék határvonalak egyértelműen elválasszanak. E mellett a robusztus, ipari kialakítás is elengedhetetlen, hogy az objektum síklapúsága ne változzon a mérés során. Az általunk megvalósított kalibrációs objektum mindezeknek megfelel: egy fémlemezen készítettünk mátrix szerűen furatokat (8. ábra). Ezeken a fény átjut és a sík felületen a perspektív torzulásnak megfelelően szabályosan elhelyezkedő ellipsziseket figyelhetünk meg. Az ellipszisek középpontját detektálni tudjuk, ezek lesznek a fényforrások képei.



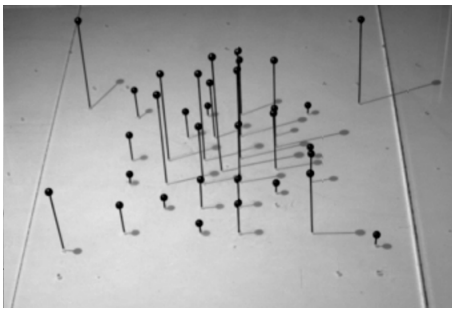
8. ábra: Fényforrás belső kalibráció

8.2. Fényforrás külső kalibráció

A fényforrások külső paramétereit is meg kell határoznunk, hogy a vizuális burok visszavetítésekor a fényforrásokat is fel tudjuk használni. Ennél a kalibrációs lépésnél is az elvárás az, hogy ugyanabban a koordináta rendszerben határozzuk meg a pozíciókat és az orienetációkat, mint amit a kamerák esetén felvettünk. Így a kamerák külső kalibrációhoz használt objektumát kell itt is alkalmaznunk (9. ábra). A síkon ellipszisként megjelenő árnyékok középpontjai és a gömbök térbeli pozíciója alapján a külső paraméterek meghatározhatók a fényforrásokra is.

9. Kalibrációs eredmények

Az optikai rendszer kalibrálásának pontossága nagyban befolyásolja a rekonstrukciós eljárást. Ezért fontos mérnünk, hogy az optikai eszközök vetítési tulajdonságait mennyire jól sikerült meghatároznunk. Mi a pontosság mérésére a visszavetítési hibát alkalmazzuk, ami a kalibráció során felhasznált objektumok pozíciói és a neki megfelelő képekből a térbe visszavetítéssel meghatározott pozíciók távolsága.



9. ábra: Fényforrás külső kalibráció

Az 1. táblázatban a kamerák kalibrációjának pontosságát foglaltuk össze. A sorokban két kamera képeiből triangulációval kiszámított pontok hibái láthatóak. Megfigyelhető, hogy a 0,167 mm-es maximális és 0,044 mm-es minimális visszavetítési hiba mellett a kamerákat átlagosan tized milliméteres pontossággal sikerült bekalibrálnunk. Ez a gyakorlatban igen pontos rekonstrukciót tesz lehetővé. A fényforrások esetén is elvégeztük a visszavetítési hiba kiszámítását,

1. táblázat: Kamera kalibráció pontossága

Kamera 1	**Kamera 2**	**Visszavetítési hiba [mm]**
0	1	0,093
0	2	0,085
0	3	0,081
0	4	0,045
0	5	0,167
1	2	0,106
1	3	0,068
1	4	0,044
1	5	0,144
2	3	0,091
2	4	0,075
2	5	0,151
3	4	0,061
3	5	0,114
4	5	0,121
Átlagos hiba:		**0,096**

az eredményeket a 2. táblázatban foglaltuk össze. A triangulációt az első hat fényforrás és egy kamera képén detektált pontok alapján végeztük el. Fényforrásonként átlagoltuk az így kapott távolság értékeket, amelyek a táblázat soraiban

tüntettünk fel. A visszavetítési hiba értékei nagyságrendileg összeméhetőek a kamera kalibrációnál kapott értékekkel. Az elért átlagos 0,2 mm-es pontosság azt mutatja, hogy a fényforrásokat is lehet a rekonstrukció során alkalmazni.

2. táblázat: Fényforrás kalibráció pontossága

Fényforrás	**Visszavetítési hiba [mm]**
1	0,219
2	0,121
3	0,144
4	0,322
5	0,166
6	0,122
Átlagos hiba:	**0,182**

10. Rekonstrukciós eredmények

A tárgyalt Vizuális Burok módszert és a javasolt kalibrációs eljárásokat egy mérőrendszer megvalósításához alkalmaztuk [4]. A mérőrendszert azzal a céllal terveztük, hogy hajlított rugó idomok mérését lehetővé tegye, mivel ezeknek az idomoknak az ipari minőség-ellenőrzésére ma kézi úton alkalmazott egyedi kalibereket használnak. Az általunk tervezett mérőcella a javasolt eljárással nagy pontossággal képes az idomok mérésére és ideális mintadarabokkal történő összehasonlításra. A cella mérési terét maximum 500mm x 500mm x 100mm-es méretű idomokhoz terveztük. A teret oldalsó állásban négy darab, felső pozícióban két darab 3840 x 2748 pixel felbontású IDS UEye UI-1490SE USB kamera veszi. A felső kamerák a munkatér felét - felét veszik, így ezen nézet felbontását közel a duplájára növeltük. Ezt a felbontás-növelést a magas mérési pontosság elvárás miatt kellett bevezetni. A vizuális burok alapú modszerek esetében a mérési pontosság elméleti alsó határa annak a legkisebb térrésznek a térfogata, ami a kamerákból egyetlen pixelen keresztül látszik. Ez a pontosság a felső kamerákból nézve a mérési tér alapterületénél a következőképpen számolható:

$$error = surface/resolution \tag{3}$$

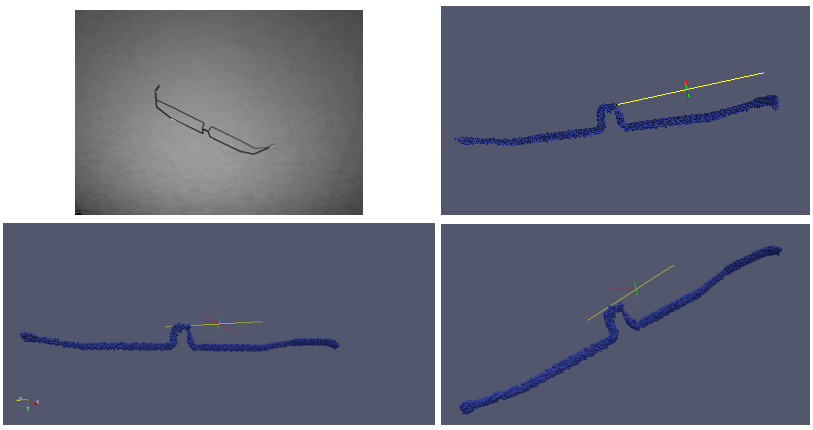
. Mivel a felső kamerák kb. 400 mm alapterületet vesznek, a legjobb szögből a hiba térfogat mérete: $400mm/3840 = 0.104mm = +-0.052mm$. Az oldalsó kamerák irányából a legrosszabb szögből a hiba $800mm/2478 = 0.32mm = +-0.16mm$. Fontos viszont megemlíteni, hogy a mért objektumok tipikusan hengeresek, amely információ felhasználható arra, hogy a modell pontosságát illesztéssel növeljük (lásd [6]).

A mérési tér háttér-világítása LED szalagokkal történik, amit különböző fény diffúzor anyagokkal lehet homogénné tenni. A munkatér körül 17 darab nagy

fényerejű, hibatűrő, hosszú életartamú és pontszerű LED fényforrás került elhelyezésre. A mérőcella kivitelezését a Mevisor Kft. végezte (lásd 10. ábra). A mérőcellával való mérés során figyelembe vettük a fényforrás kamerák je-

10. ábra: Mérő cella

lenlegi pontatlanságát ézért a fényforrás képek esetén az objektumok méretét megnőveltük (dilatáltuk), a hiba mértékének megfelelően. Így elkerülhető, hogy a kalibrációs pontatlanság a rekonstrukció rovására menjen. A mérőcellával több idomot is mértünk. Az következő eredmények egy rekonstruált tárgy különböző nézeteit mutatják (lásd 11. ábra). A modell előállításához öt darab kamerát és négy darab fényforrást alkalmaztunk.



11. ábra: Hajlított rugó idom 3D mérése

11. Konklúzió és jövőbeli munkák

Bemutattunk egy Vizuális Burok alapú több kamerás mérő rendszert, amely fényforrás képek segítségével éri el a kívánt kamera számot, és javaslatot tettünk a rendszer kamráinak kölső és belső kalibrálására. Megmutattuk, hogy a fényforrásokhoz sziluett kép rendelhető, és az így nyert képalkotó eszköz a kamerákhoz hasonlóan modellezhető és kalibrálható. A javasolt módszereket alkalmaztuk egy mérőcella megalkotásához, mely tervezetten hajlított rugo idomok mérését és minőség ellenőrzését teszi majd lehetővé.

Az ipari használathoz a fényforrás kamera kalibrációjának pontosságát növelni kell, amely elérhető a kalibrációs felvétel sorozat jobb feldolgozásával, és a kalibrációs objektum pontosításával. A kezdeti rekonstrukciós eredmények megfelelők, de fontos feladat lesz a mérőcella által mért modellek validálása, vagyis annak az ellenőrzése, hogy a mért modellek megfelelnek-e a valóságnak, és hogy a mérés az elvárt hiba határon belül van-e.

12. Köszönetnyivánítás

Köszönet a Tatabányai Rugogyártó KFT-nek az illusztrációk és az eredmények megosztásáért. Ezt a munkát a (GOP 1.1.1-09/1) Innovatív 3D OFF LINE, és a gyártást közvetlen ellenőrző és kiszolgáló ON LINE mérőberendezés kifejlesztése megnevezésű pályázat támogatta.

Jelen kutatási eredmények megjelenését "Az SZTE Kutatóegyetemi Kiválósági Központ tudásbázisának kiszélesítése és hosszú távú szakmai fenntarthatóságának megalapozása a kiváló tudományos utánpótlás biztosításával" című, TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0012 azonosítószámú projekt támogatja. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

1. Gary Bradski and Adrian Kaehler. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library.* O'Reilly, Cambridge, MA, 2008.
2. R. I. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision.* Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, second edition, 2004.
3. Z. Jankó, D. Chetverikov, and J. Hapák. 4d reconstruction studio: Creating dynamic 3d models of moving actors. *Proc. Sixth Hungarian Conference on Computer Graphics and Geometry*, pages 1–7, 2012.
4. G. Kátai-Urbán, Z. Megyesi, and I. Pintér. Hajlított rugó idomok ellenőrzése vizuális burok alapú 3d rekonstrukcióval. *Proceedings of AGTEDU 2012*, nov 2012.
5. A. Laurentini. The visual hull concept for silhouette-based image understanding. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 16(2):150 –162, feb 1994.
6. I. Pintér, Z. Megyesi, and G. Kátai-Urbán. Estimation of geometrical features of wireforms using 3-dimensional image reconstruction data. *Proceedings of Factory Automation 2012*, pages 46–49, may 2012.

7. Milan Sonka, Vaclav Hlavac, and Roger Boyle. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Thomson-Engineering, 2007.
8. Zhanfeng Yue and R. Chellappa. Synthesis of silhouettes and visual hull reconstruction for articulated humans. *Multimedia, IEEE Transactions on*, 10(8):1565 –1577, dec. 2008.
9. Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 22(11):1330–1334, November 2000.