



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

Modellezés mélységképek és nem metrikus felvételek alapján

PhD értekezési tézisei

Molnár Bence Attila

okl. földmérő és térinformatikai mérnök

Témavezetők:

Dr. Detrekői Ákos és Dr. Barsi Árpád

Budapest, 2013

1. Célkitűzés

Mindennapi használatban lévő eszközeink sok esetben tartalmaznak olyan szenzorokat, melyek térbeli adatgyűjtésre alkalmasak. Ennek kialakulása két egymást erősítő hatásra vezethető vissza: a széleskörű igény miatti elterjedtségre és az alacsony költségre.

Ha a szenzorok kedvező áron elérhetőek, felmerül azok mérnöki célokra való alkalmazásának lehetősége. Disszertációmban a kereskedelmi forgalomban lévő, tömegesen előállított eszközök segítségével végrehajtható tárgymodellezés és objektumfelismerés lehetőségét, illetve pontosságát vizsgáltam. A költséghatékony módon történő modellezés segít kielégíteni azt az egyre növekvő igényt, amely mind több szakterületen jelentkezik a térbeli adatok mérésére, például a robotikában, illetve az orvostudományban. A számítási és tárolási kapacitások növekedésével a szélső pontosságú adatok helyett tehát inkább a nagy adatmennyiség gyűjtése kerül előtérbe, melynek során az alkalmazásoknak megfelelően a pontosság statisztikai úton növelhető.

2. Web alapú fotogrammetriai alkalmazás

A fotogrammetria világát kezdik átalakítani a kompakt fényképezőgépek és mobiltelefon-kamerák azzal, hogy nagyon sok ember számára elérhetőek, így széles körben használatosak. Ezen kamerák fotogrammetriai értelemben vett felhasználásának gátja egyrészt a szakirányú ismeretek hiánya, másrészt az alacsony tudású olcsó feldolgozó program. Az alacsony árú eszközök esetén azonban a pontossági igényeket alacsonyabban kell megfogalmazni, illetve egyéb megoldásokat – mint például több kép készítése – kell alkalmazni.

Napjaink jellemző iránya, hogy felhasználói programjainkat az interneten keresztül használjuk. Ennek előnye, hogy nem szükséges hozzá semmilyen programot telepíteni a saját gépünkre, és munkánkat bármely számítógépről tudjuk folytatni. Az adatok tárolására sem kell gondot fordítani, azok rendszerint felhő alapú szervereken vannak tárolva. Mindez nagyban segíti a széleskörű felhasználást, és megkönnyíti a használatot.

A web alapú alkalmazások fejlesztése során az adatok tárolásának megoldása (adatbázis-tervezés) mellett fontos lépés az adatok továbbításának megtervezése is. Ez különösen fontos egy fotogrammetriai szoftver esetén, ahol jellemzően nagy képeket kell elérhetővé tenni mind a kliens-, mind a szerveroldalon. Amennyiben az adatok továbbítása nem optimalizált, akkor a felhasználó lassú működést tapasztalhat, ugyanakkor figyelni kell az adatok azonnali mentésére is.

Web alapú fotogrammetriai feldolgozó alkalmazást fejlesztettem azzal a céllal, hogy a fotogrammetria egyre több ember számára legyen elérhető, mindezt könnyen kezelhető formában. A szerver-kliens kommunikációhoz sávzélességre optimalizált adatátviteli eljárást terveztem, az alkalmazás felhasználói vékonykliensen keresztül hatékony számítási erőforrás és adattárolási kapacitás igénybevételével végezhetnek fotogrammetriai adatfeldolgozást.

3. Robosztus fotogrammetriai objektumrekonstrukció

A felhasználók körének bővülése megköveteli a feldolgozó programok robusztus működését. A felhasználóbarát, didaktikus felületen túl a számítási eljárásnak is robusztusnak kell lennie, ezért algoritmust fejlesztettem, mely képes a gyengén tervezett fotogrammetriai hálózatok esetén is elvégezni az objektumrekonstrukciót. Az eljárás széleskörű alkalmazhatósága érdekében elvettem a mérőkamerák használatát és a Direkt Lineáris Transzformációt (DLT) alkalmaztam a paraméterbecslés során, melyet a legkisebb négyzetek módszere (Detrekői, 1991) segítségével oldottam meg. A paraméterbecslés során gyakran megjelenő rosszul kondicionált egyenletrendszerek megoldására szinguláris érték szerinti felbontást (SVD) alkalmaztam (Eckart és Young, 1938). Tekintettel arra, hogy a legkisebb négyzetes kiegyenlítés igen érzékeny a durva hibákra, és a tapasztalatlan felhasználók nagyobb valószínűséggel követnek el durva hibát, a számítás robusztusságának növelése érdekében Huber-módszert (Huber, 1981) alkalmaztam, mely kiegyenlítés során a mérések súlyának változtatásával szűri ki a durva hibával terhelt méréseket.

4. Az MS Kinect mélységkamera

A mélységkamerák olyan távérzékelő szenzorok, melyek előmetszés vagy a jelterjedési idő mérésének segítségével az adott felbontás szerint a látómező

pontjairól adnak távolságinformációt képszerű formátumban, mindezt akár másodpercenként 30 kép mintavételezési frekvenciával. A mélységkamerák elterjedésének gátja volt az igen zajos és pontatlan eredmény mellé társuló nagy beruházási költség, ebben hozott fordulópontot a Microsoft, amikor a játékiparban kezdte használni a mélységkamerát mint mozgásérzékelőt (MS Kinect szenzor) (1. ábra), így az eszköz a tömeggyártás hatására igen kedvező áron vált elérhetővé a piacon.



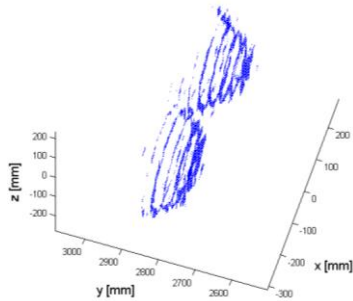
1. ábra MS Kinect

A Kinect 640x480 pixel geometriai felbontású mélységkamerájának és színes kamerájának segítségével 30fps sebességgel képes adatnyerésre (2. ábra) és azok feldolgozását követően színes pontfelhő előállítására, akár valós időben.



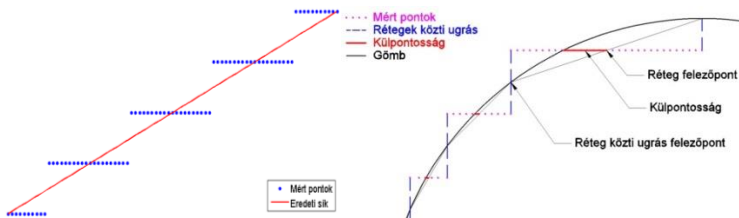
2. ábra A Kinect által szolgáltatott színes, mélység- és intenzitáskép

A képpontonkénti távolságvértékek azonban kerekített formában érhetőek el, ráadásul a kerekítés mértéke a távolság függvényében növekszik (Macknoja *et al.*, 2012). Ennek eredményeképpen a pontfelhő a kameratengelyre merőleges rétegeket alkot (3. ábra), a rétegek közötti távolság 3 méter felett meghaladja az 4 cm-t, míg a kameratengelyre merőleges irányokban a pontsűrűség 6 milliméter azonos tárgytávolság esetén.



3. ábra A réteges pontfelhő

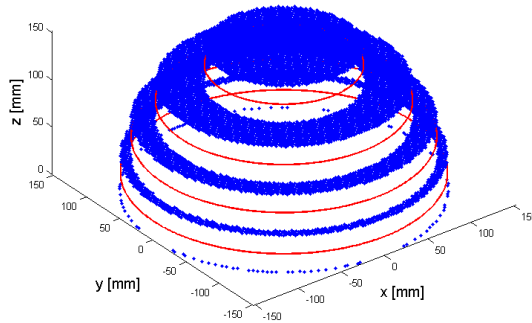
A pontfelhőre történő geometriai primitívek illesztése általában a pontonkénti javítások minimalizálásával történik, ez azonban kvantált pontfelhő esetében kizárólag sík felületekre ad helyes eredményt. Gömbök mérése esetén ez jellemzően alulméretezést jelent, mivel a kerekítés hatására a konvex felületen belülré több pont képeződik le, mint kívülré. Másként fogalmazva a rétegek középvonalai nem gömbfelületi pontok (4. ábra), így az illesztést szabályos hiba terheli, amely ráadásul jelentősen függ az aktuális mérési elrendezéstől (azaz hogy gömb szenzorhoz legközelebbi pontja hol található a rétegekhez képest).



4. ábra Sík, illetve gömbfelület és az azokról leképeződött pontfelhők metszete

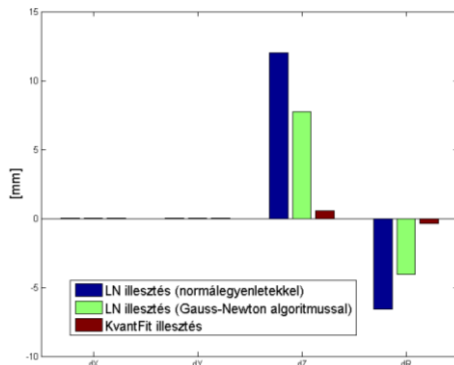
5. Gömbillesztés kvantált pontfelhőre

A réteghatárok közti ugrás felezőpontjait nézve, azok összessége elméleti gömbfelületi görbét alkot, tehát ezek levezetése a mélységkép alapján és az azokra történő gömbillesztés már szabályos hibától mentes gömbillesztést tesz lehetővé (5. ábra).



5. ábra Gömbi réteges pontfelhő és a közöttük elhelyezkedő levezetett körök

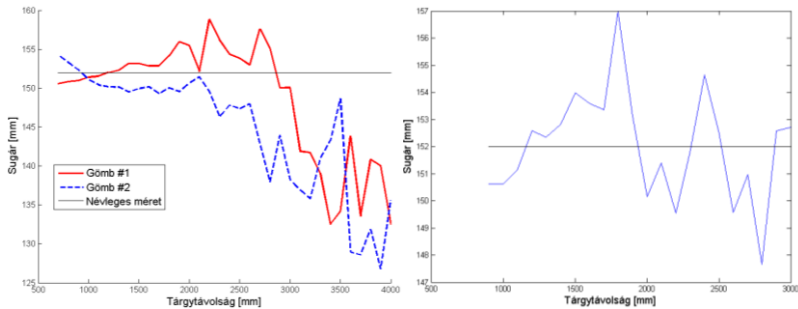
Mivel a mélységkamerák eredménye a mélységkép, így a réteghatárok detektálására képfeldolgozó algoritmusokat használtam, úgymint Canny-élkeresést (Canny, 1986), illetve körök detektálásához Hough-transzformációt (Hough, 1959). A mélységképen azonosított körök mélységértékét a szomszédos rétegek távolságértékének átlagaként adtam meg, majd térbeli rendszerbe transzformáltam. Az így kapott gömbillesztési eljárást (KvantFit) szimulált, véletlen hibát nem tartalmazó adatok alapján összehasonlítottam két, pontonkénti javítást alapul vevő gömbillesztő eljárással (6. ábra).



6. ábra Hagyományos és a KvantFit gömbillesztő eljárás összehasonlítása

A szimulált adatok alapján kapott eredmények igazolják a kidolgozott algoritmus alkalmazhatóságát, az alulméretezés jelensége megszűnik és a kameratengely irányú meghatározás pontossága is jelentősen javul. A kidolgozott algoritmust valós mérési

eredményeken is alkalmaztam, melynek során egyre növekvő tárgy távolság esetén figyeltem meg a hagyományos, illetve az új algoritmus által történő gömbillesztés eredményeit. Ezen vizsgálati eredményen is jól megfigyelhető a szabályos alulméretezési hiba kiküszöbölése, a pontosság növekedése és a függvényképet jellemző zaj csökkenése (7. ábra).



7. ábra A hagyományos illetve a KvantFit alapján történő illesztés a távolság függvényében

6. A mélységkamerák pontossági vizsgálati módszere

A mélységkamerák pontossági vizsgálatára nincs kialakult módszertan. Annak ellenére, hogy több ilyen jellegű munka készült, minden kutató csak bizonyos tulajdonságokra fókuszált, mint például az adott objektum geometriai egyezőségére a pontfelhővel vagy a pontonkénti szórásokra (Chow, 2011; Khoselham, 2011). Az ismétléses, relatív és abszolút pontosságra is kitérő eljárást dolgoztam ki mélységkamerák vizsgálatára, melyet MS Kinect esetében végre is hajtottam. A mélységkamerák pontossága jelentősen függ a tárgy távolságtól, ezért a vizsgálatokat a teljes mérési tartományon, egyenletes közönként szükséges elvégezni, hogy a pontosságról teljes képet kapjunk.

A vizsgálat első lépéseként azonos körülmények között hajtottam végre méréseket, így a mérési eredmények pontonkénti szórását számítottam. Második lépésként sík felületre végeztem méréseket és a pontfelhőre illesztett síktól való eltéréseket vizsgáltam. Harmadik lépésként gömbökről készült méréseket hasonlítottam össze földi lézerszkennelvel nyert adatokkal. Végezetül a lézerszkennel által a szenzorról és

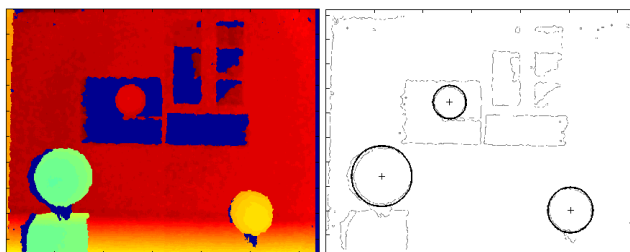
a gömbökről egyidejűleg készült méréseket használtam fel az abszolút pontosság meghatározására (1. táblázat).

1. táblázat Pontossági vizsgálatok összefoglaló eredményei

Vizsgálat	szórás [mm]	szórás (a távolság százalékában) [%]
Ismétlési pontossági vizsgálat	5	0,25
Síklapúság vizsgálat	7	0,3
Relatív pontossági vizsgálat	3,5	0,2
Abszolút pontossági vizsgálat	0,75	0,1

7. Automatikus gömbdetektálás

A mélységkamerával történő mérések során nemcsak a mérendő objektumról kapunk eredményeket, hanem a környezetről is. Ez azt is jelenti, hogy a pontfelhő adatainak szűrése és objektumfelismerés, valamint a mérendő tárgyon kívül az illesztőpontok pontos detektálása és mérése szükséges. A mélységkép automatikus feldolgozását segítő, gömböket detektáló algoritmust fejlesztettem, amely emberi beavatkozás nélkül, robotstus módon képes a feladat végrehajtására, a felhasznált gömbök méretétől és szenzortól való távolságától függetlenül (8. ábra). Az eljárás során Canny-élkeresést és Hough-transzformációt használtam a mélységképek feldolgozására, melyeknek eredményeképpen a leválogatott képpontokra KvantFit algoritmus segítségével lehetővé vált a nagy pontosságú gömbillesztés.

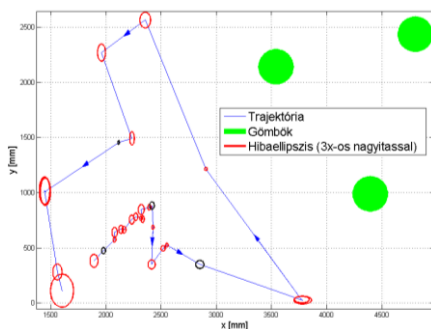


8. ábra Nyers mélységkép gömbökkel és az automatikus detektálás eredménye

8. A mozgási trajektória meghatározása

Az illesztőpontok műszerkoordináta-rendszerben való helyének nagy pontossággal történő meghatározását követően kiszámíthatóak a pillanatnyi műszerkoordináta-rendszer és a referenciakoordináta-rendszer közti transzformációs paraméterek. Ez egyrészt lehetőséget ad az egymást követő felvételekből nyert pontfelhők nagy pontosságú illesztésére, illetve ha a szenzor a felvételezés alatt mozgásban van, akkor a mozgási trajektória meghatározására.

A szenzor hely- és helyzetmeghatározáshoz legkisebb négyzetek módszerével történő hátrametszési algoritmust fejlesztettem (1. ábra). Célom a beltéri navigáció megoldása, így a számítás során feltételeztem, hogy a mozgás során a tetszőleges irányú eltolás mellett csak függőleges tengely körüli elforgatás lehetséges.



9. ábra Helyreállított mozgási trajektória

9. Tézisek

1. tézis

A térkiértékelésre szolgáló Direkt Lineáris Transzformáció (DLT) módszerét robusztus Huber-becsléssel és szinguláris érték szerinti felbontással (SVD) egészítettem ki, melyeknek köszönhetően a rosszul kondicionált fotogrammetriai egyenletrendszereket eredményező felvételi elrendezések is hatékonyan kezelhetők.

Kapcsolódó publikációk: Molnár, 2010b; Molnár, 2010c; Molnár, 2010d; Molnár, 2010e

2. tézis

Felhőalapú fotogrammetriai kiértékelő alkalmazást fejlesztettem. Az alkalmazás felhasználói vékonykliensen keresztül, hatékony számítási erőforrás és adattárolási kapacitás igénybevételével végezhetnek fotogrammetriai adatfeldolgozást. A szerver-kliens kommunikációhoz sávszélességre optimalizált adatátviteli eljárást terveztem és fejlesztettem ki.

Kapcsolódó publikációk: Molnár, 2010a; Molnár, 2010b; Molnár, 2010d; Molnár, 2010e

3. tézis

Mélységkamerával nyert pontfelhőre történő gömbillesztés esetén fellépő sugárirányú szabályos hiba hatásának csökkentése érdekében kvantálási jellemzőkön alapuló gömbillesztési algoritmust dolgoztam ki, melynek alkalmazhatóságát szimulált és valós adatok alapján igazoltam.

Kapcsolódó publikációk: Molnár *et al.*, 2012a; Molnár és Toth, 2013a; Molnár és Toth, 2013b

4. tézis

Pontosságvizsgálati eljárást dolgoztam ki mélységkamerák minősítésére, amely alkalmas relatív és abszolút pontossági mérőszámok levezetésére. A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy 3 méter alatti tárgy távolság mellett, Microsoft Kinect szenzor alkalmazása esetén centiméter alatti középhiba érthető el.

Kapcsolódó publikációk: Molnár *et al.*, 2012a; Molnár és Toth, 2013a; Molnár és Toth, 2013b; Toth *et al.*, 2012

5. tézis

Mélységkamera megfigyelések automatikus szűrésén alapuló folyamatos beltéri hely- és helyzetmeghatározási eljárást dolgoztam ki. Az eljárás valósidejű, centiméter pontosságú trajektóriameghatározást tesz lehetővé.

Kapcsolódó publikációk: Molnár és Toth, 2013a; Molnár és Toth, 2013b; Molnár *et al.*, 2012b

10. A tézisekhez kapcsolódó publikációk

1. Molnár B. (2010a): Developing a web based photogrammetry software using DLT, Pollack Periodica Vol. V Number 2/Aug 2010, pp. 49-56.
2. Molnár B. (2010b): Direct Linear Transformation Based Photogrammetry Software on the WEB, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII Part 5, pp. 462-465.
3. Molnár B. (2010c): Web alapú fotogrammetriai alkalmazás pontossági vizsgálata, Geomatikai Közlemények, XIII/2 kötet, pp. 101-106.
4. Molnár B. (2010d): Robosztus becslést és DLT-t alkalmazó web alapú fotogrammetriai alkalmazás fejlesztése, Geomatikai Közlemények, XIII/1 kötet, pp. 91-95.
5. Molnár B. (2010e): Robosztus becslések használata web alapú fotogrammetriai kiértékeléshez, Geodézia és Kartográfia, LXII kötet 1. szám, pp. 24-27.
6. Molnár B., Toth C. K., Detrekői Á. (2012a): Accuracy test of Microsoft Kinect for human morphologic measurements, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B3, pp. 543-547.
7. Molnár B., Toth C. K., Grejner-Brzezinska D. A. (2012b): Sphere fitting on MS Kinect point cloud, MAPPS/ASPRS 2012 Specialty Conference, Tampa, Amerikai Egyesült Államok. In print.
8. Molnár B., Toth C. K. (2013a): MS Kinect - Flash LiDAR pontossági vizsgálat és gömbillesztés, Geomatikai Közlemények, XVI/1 kötet, In print.
9. Molnár B., Toth C. K. (2013b): Spherical Target Based Trajectory Recovery From Kinect Depth Imagery, ASPRS 2013 Annual Conference, Baltimore, Amerikai Egyesült Államok, 2013.03.24-2013.03.28.
10. Toth C. K., Molnár B., Zaydak A., Grejner-Brzezinska D. A. (2012): Calibrating the MS Kinect Sensor, ASPRS 2012 Annual Conference, Sacramento, Amerikai Egyesült Államok, pp. 538-546.

11. Irodalomjegyzék

1. Canny J. (1986): A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. VIII Part 6, pp. 679-698.
2. Chow J. C. K., Ang K. D., Lichti D. D., Teskey W. F (2012): Performance Analysis of Low-Cost Triangulation-Based 3D Camera: Microsoft Kinect System, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B5, pp. 175-180.
3. Detrekői Á. (1991): Kiegyenlítő számítások, Tankönyvkiadó, Budapest, p. 685.
4. Eckart C., Young G. (1936): The approximation of one matrix by another of lower rank, Psychometrika, Vol. I Part 3, pp. 211-218.
5. Hough P.V.C. (1959): Machine Analysis of Bubble Chamber Pictures, Proc. Int. Conf. High Energy Accelerators and Instrumentation, Vol. VII, pp. 554-556.
6. Huber P. J. (1981): Robust Statistics, John Wiley & Sons, New York, p. 312.
7. Khoshelham K. (2011): Accuracy Analysis of Kinect Depth Data, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII -5/W12, pp. 133-138.
8. Macknoja R., Chávez-Aragó A., Payeur P., Laganière R. (2012): Experimental Characterization of Two Generations of Kinect's Depth Sensors, IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments, pp. 150-155.