



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Építőmérnöki Kar  
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

# Modellezés mélységképek és nem metrikus felvételek alapján

PhD értekezés

**Molnár Bence Attila**

okl. földmérő és térinformatikai mérnök

Témavezetők:

**Dr. Detrekői Ákos** és **Dr. Barsi Árpád**

Budapest, 2013

# Térmodellezés mélységképek és nem metrikus felvételek alapján

Molnár Bence Attila

Doktori disszertáció összefoglaló

Kutatásaim során a fotogrammetria és a mélységkamerák segítségével történő térmodell előállítását vizsgáltam. A térbeli modellezés két fontos jellemzője a pontosság valamint a felmérési és feldolgozási időigény. A pontosság tekintetében megkülönböztetünk elméleti pontosságot és gyakorlati pontosságot. A valóságban méréseinket gyakran terhelik durva hibák, melyek hatásának csökkentése fontos feladat. A méréseket szabályos hibák is terhelik, melyek szintén jelentős hatással vannak az elérhető pontosságra, de megfelelő mérés technikával vagy utólagos számítással ennek mértéke csökkenthető. A feldolgozáshoz szükséges időigény optimalizálása két paraméter mentén történhet: elsősorban az emberi időráfordítás csökkentésével, másodsorban az automatizált számítás idejének csökkentésével.

Fotogrammetriai elveken nyugvó térbeli rekonstrukciós eljárást terveztem, mely a durva hibák hatását minimalizálja. Az eljárásban használt Direkt Lineáris Transzformáció lehetővé teszi bármely kamera, így nem kalibrált kamerák használatát is. A fotogrammetriai számítások stabilitását a gyakran előforduló szinguláris alakmátrixok csökkentik, így a megalkotott eljárás stabilitását szinguláris érték szerinti felbontással (SVD) növeltem. A mérések végrehajtásához web alapú kiértékelő alkalmazást hoztam létre, mely segíti a fotogrammetria hétköznapi elterjedését és annak könnyű használatát az internet segítségével helyhez kötöttség nélkül.

Kutatásaim során vizsgáltam a mélységkamerák világát, mely alapján kijelenthető, hogy napjainkra a mélységkamerákat pontosságuk alkalmassá teszi a mérnöki célokra való felhasználásra. Az MS Kinect szenzor elemzése során tapasztaltam a kerekítésből adódó réteges pontfelhő képződést, mely az adatrögzítés szabályos hibájaként – modellhibaként – értelmezhető. A modellhibából adódóan a homogén térbeli eloszlásra építő illesztési eljárások nem alkalmazhatóak, ezért új eljárást dolgoztam ki. Gömbök esetén jelentős pontossági növekedést értem el a KvantFit eljárással, melynek köszönhetően három méteres tárgytávolság alatt centiméter alatti pontosságú modellezés vált lehetővé. Az általam elért eredmények alapján a gömb illesztőpontok detektálása és térbeli helyzetének meghatározása nagy pontossággal végrehajtható, így azok beltéri navigációs és térképezési feladatok során jól alkalmazhatóak. Fontos felhasználási területet jelent a robotika, melynél a valósidejű képelemzés és modellalkotás kiemelt jelentőséggel bír. Az általam kidolgozott pontossági vizsgálati sor lehetőséget biztosít a mélységkamerák összehasonlítására, mely jól alkalmazható ipari feladat során alkalmazandó céleszköz kiválasztásakor.

A mélységkamerák által alkotott térbeli modellek jól alkalmazhatóak kiindulási adatként a robotus fotogrammetriai mérések során, így a modellalkotás pontossága növelhető és feldolgozási ideje jelentősen csökkenthető.

# **Modeling based on depth images and non-metric imagery**

Bence Attila MOLNÁR

## Summary of the PhD Dissertation

The object of my research is the application of photogrammetry and depth cameras for 3D model reconstruction. The most critical points of modeling are accuracy and time consumption of capturing and processing. According to accuracy, we have to distinguish theoretical and real accuracy; real measurements often contain outliers (gross errors), which should be removed. Measurements are also infected by regular errors; however, the effects can be reduced by proper measurement technics and by post processing. Reducing time consumption can be performed by focusing on two different parameters: minimizing human interaction and decreasing calculation time.

I developed a 3D reconstruction method based on photogrammetric principles, which minimizes the effects of gross error. The applied Direct Linear Transformation (DLT) method allows using any cameras, even uncalibrated ones. The singular matrixes of photogrammetric calculations are decreasing stability; therefore Singular Values Decomposition (SVD) was applied to achieve better robustness. A web based Graphical User Interface (GUI) was created to accomplish the digitizing and calculation; this application enables to use photogrammetry for everyone even on different machines over the internet.

Application of depth sensors is an emerging technology in photogrammetry; based on my research experiences they can be applied for high accurate measurements with some limitations. Depth images of MS Kinect sensor can be transformed to 3D point cloud, where layers can be observed caused by rounding of depth values. The quantization is a regular error and disables the application of common surface fitting methods; therefore a new algorithm was developed for sphere fitting adapted to the quantized point cloud. Accuracy is highly increased by using KvantFit algorithm resulting less than 1 cm for standard deviation of sphere detection at 3 m object distance. The developed method also performs well as part of indoor positioning and navigation applications. Depth cameras are often applied in robotics where real time image analysis and spatial reconstruction are both very important issues. I designed a qualifying method to compare depth cameras that supports the decision if a depth sensor should be chosen for an application.

3D models derived from depth images can be effectively used as initial data during robust photogrammetric calculations; therefore the modeling accuracy can be enhanced whilst the calculation time decreases.

## Tartalom

|   |    |
|---|----|
| 1. Bevezetés .....  | 3  |
| 1.1. Célkitűzés.....                                      | 3  |
| 2. Elméleti áttekintés .....                              | 5  |
| 2.1. A fotogrammetria elmélete.....                       | 5  |
| 2.2. Direkt Lineáris Transzformáció.....                  | 8  |
| 2.3. Paraméterbecslés .....                               | 10 |
| 2.4. Huber-módszer.....                                   | 12 |
| 2.5. Szinguláris érték szerinti felbontás .....           | 14 |
| 2.6. Pontossági és megbízhatósági vizsgálatok.....        | 15 |
| 3. Költséghatékony robusztus fotogrammetriai eljárás..... | 19 |
| 3.1. Térbeli rekonstrukciós eljárás tervezése.....        | 19 |
| 3.1.1. Kiértékelő algoritmus .....                        | 20 |
| 3.2. Web alapú kiértékelő rendszer .....                  | 21 |
| 3.2.1. Korábbi alkalmazások.....                          | 21 |
| 3.2.2. Webes megvalósítás.....                            | 22 |
| 3.3. A WebDLT pontossági vizsgálata.....                  | 25 |
| 3.3.1. Közelfotogrammetriai mérés .....                   | 27 |
| 3.3.1.1. Hálózattervezés.....                             | 27 |
| 3.3.1.2. Minősítés.....                                   | 29 |
| 3.3.2. Homlokzatmérés .....                               | 31 |
| 3.3.2.1. Hálózattervezés.....                             | 32 |
| 3.3.2.2. Minősítés.....                                   | 33 |
| 4. Raszteres térmodellezés .....                          | 37 |
| 4.1. A lézerszkennerek .....                              | 37 |
| 4.2. Pontfelhő-feldolgozás .....                          | 38 |
| 4.2.1. Szűrés, tisztítás .....                            | 39 |
| 4.2.2. Objektumdetektálás.....                            | 40 |
| 4.2.2.1. Geometriai primitívek illesztése .....           | 41 |
| 4.2.2.2. Síkillesztés .....                               | 41 |
| 4.2.2.3. Hengerillesztés .....                            | 43 |
| 4.2.2.4. Gömbillesztés.....                               | 44 |
| 4.2.3. Pontfelhő-összekapcsolás .....                     | 46 |
| 4.3. A mélységkamerák .....                               | 47 |
| 4.3.1. Microsoft Kinect mélységkamera.....                | 49 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 4.3.1.1. | Kalibráció.....                                      | 54 |
| 4.3.2.   | Kvantált pontfelhő.....                              | 55 |
| 4.3.2.1. | Alulméretezés .....                                  | 57 |
| 4.3.2.2. | Gömbillesztési algoritmus kvantált pontfelhőre ..... | 60 |
| 4.3.3.   | Pontossági vizsgálat.....                            | 66 |
| 4.3.3.1. | Ismétlési pontosság.....                             | 67 |
| 4.3.3.2. | Síklapúsági vizsgálat .....                          | 69 |
| 4.3.3.3. | Relatív pontossági vizsgálat .....                   | 70 |
| 4.3.3.4. | Abszolút pontossági vizsgálat .....                  | 72 |
| 4.3.3.5. | A pontossági vizsgálatok összegzése .....            | 75 |
| 4.3.4.   | Szenzorpozíció és trajektóriameghatározás.....       | 77 |
| 4.3.4.1. | Motiváció .....                                      | 78 |
| 4.3.4.2. | Gömbazonosítás és szegmentálás .....                 | 78 |
| 4.3.4.3. | Hátrametszés .....                                   | 79 |
| 4.3.4.4. | Trajektóriameghatározás .....                        | 81 |
| 5.       | Kitekintés a humánmorfológia világába.....           | 83 |
| 6.       | Összefoglalás .....                                  | 86 |
| 7.       | Köszönetnyilvánítás.....                             | 89 |
|          | Hivatkozások.....                                    | 90 |
|          | Függelék .....                                       | 98 |

## **1. Bevezetés**

A térbeli modellalkotás világa jelentős átalakuláson megy keresztül napjainkban. A klasszikus fotogrammetriai feldolgozás analitikus megoldásai jelentősen egyszerűsödtek, és új megoldásokkal bővültek digitális világunkban. A változás megfigyelhető mind az adatrögzítés eszközeiben és folyamatában, mind a feldolgozás során.

Méréseink során gyűjtött adatok jellege egyre szerteágazóbb, napjainkban egyszerre végzünk gyorsulás-, szög- és távméréseket, melyeket fényképekkel és egyéb szenzor- és attribútumadatokkal egészítünk ki. A klasszikus geodéziai mérésekhez képest az adatok mennyiségét tekintve is változásokat figyelhetünk meg: a lézershennerek vagy a későbbiekben tárgyalt mélységkamerák jelentősen nagyobb mennyiségű adatot gyűjtenek. A mélységkamerák kép jellegű információt adnak eredményül, a pixelenkénti intenzitásértékek (távolságértékek) az adott irányban lévő objektumtávolságok függvényei. A szenzorok által gyűjtött adatokat idő vagy hely alapján rendeljük egymáshoz és együttes feldolgozásuk eredményeként jön létre a térmodell.

Érdekes irány napjainkban, hogy a képalkotás igényeinek kielégítésére alacsony áron elérhető tömegeszközök – pl. kompakt fényképezőgépek (az 1980-as évektől) – jelentek meg a piacon, melyek felhasználhatóak térbeli modellalkotásra is. Mindennapjainkban egyre nagyobb szerepet kap a térbeli megjelenítés és éppen ezért a térbeli modellezés is, mely során egyre inkább a tömeges adatgyűjtés és az olcsóbb eszközök nyernek teret.

A adatfeldolgozás fázisa a digitális világ fejlődésének és az újfajta adatnyerési eszközöknek köszönhetően szintén átalakult. A komplex adatok együttes feldolgozása jelentős számítógépes erőforrást igényel, ráadásul gyakorta valós időben történik. A Magyarországon hagyományosan széles körben alkalmazott legkisebb négyzetek módszerével segített modellezést gyakorta nemlineáris optimalizáción alapuló, illetve genetikus algoritmusok váltják fel (Laky, 2012). Emellett a kibővült felhasználói réteg megköveteli a számítási algoritmusok magasabb fokú robusztusságát és hatékonyságát.

### **1.1. Célkitűzés**

Célom az új eljárásokban rejlő lehetőségek bemutatása, különös tekintettel azok pontosságára. Az elvégzett széleskörű pontossági vizsgálataim segítségével jellemezni,

minősíteni kívánom egyrészt az eszközöket, másrészt a számítási megoldásokat. Ennek eredményei alapján javaslatot teszek a különböző megoldások által elérhető pontosság növelésére, illetve azok együttes használatára. A fotogrammetria és távérzékelés széles spektrumából elsősorban a földi, illetve a közelfotogrammetria világát tekintem vizsgálataim fő tárgyának.

Céлом egyrészt egy korszerű fotogrammetriai alkalmazás fejlesztése, mely hatékonyan használható közelfotogrammetriai- és humánmorfológiai-mérések feldolgozásához. Fontos kritériumként fogalmaztam meg, hogy a számítás robusztus legyen és gazdaságossági szempontokat szem előtt tartva ne legyen feltétel a mérőkamerák használata. A kereskedelmi forgalomban kapható kamerák tervezésekor a fotogrammetriai szempontból fontos tulajdonságok gyakran háttérbe szorulnak, ennek ellenére a fotogrammetriai felhasználás során a pontosság növelése érdekében lehetővé válik a kamerák egyes kiemelt tulajdonságainak, például a nagy frekvenciájú képrögzítésnek a kiaknázása.

Továbbá célul tűztem ki a mélységkamerák vizsgálatát, hogy azok milyen szinten és milyen körülmények közt alkalmazhatóak modellalkotásra, illetve navigációra. Ennek érdekében egy a mélységkamerák pontosságát meghatározó és leíró eljárást dolgoztam ki, melynek hatékonyságát Microsoft (MS) Kinect mélységkamera segítségével vizsgáltam. Annak tudatában, hogy a mélységkamerák pontossága limitált, az utófeldolgozás során alkalmazható pontosságnövelő megoldás kialakítására mutatok be módszert.

Fontosnak tartom a kutatásaim gyakorlati felhasználhatóságát, a jellemző alkalmazási területek ismertetését is. A robotikában előszeretettel használnak olyan szenzorokat, melyek adatai valós időben feldolgozhatóak, kis helyen elférnek és a költségük is alacsony. Ezen elvárásoknak megfelel a MS Kinect mélységkamera, így széles körben alkalmazzák és jelentős kutatások tárgyát képezi.

A közelfotogrammetria jelentős ágát képviseli az orvosi fotogrammetria. Kutatásaim egyik célja a humánmorfológiai mérési technológiák fejlesztése és javítása, különös tekintettel az emberi arc modellezésre. A humánmorfológiai mérések esetén elvárás, hogy rendkívül összetett felületeket rövid idő alatt, automatizáltan lehessen modellezni, mindezt viszonylag nagy pontosság mellett, mely kihívás elé állítja a mérnököket.

## 2. Elméleti áttekintés

Jelen fejezetben a dolgozatban felhasznált kifejezések és eljárások rövid bemutatását adom. A digitális fotogrammetriában alkalmazott eljárások ismertetését követően a robosztus kiegyenlítési eljárásokon át a pontossági mérőszámok bemutatásáig haladok.

### 2.1. A fotogrammetria elmélete

A fotogrammetria egyik legfontosabb feladata a térbeliség (3D) visszaállítása. A fényképezés pillanatában ugyanis a térbeli objektum síkbeli (2D) leképezését kapjuk meg (Kraus, 1998). Az „elvesztett” dimenziót általában több kép együttes felhasználásával állítjuk vissza, kihasználva a geometriai optika alapvetését, miszerint a fény egyenes vonalban terjed. A fotogrammetria általánosan használt matematikai modellje a centrális projekció, ennek értelmében a tereppont, a vetítési középpont és a képpont egy egyenesen helyezkedik el. Ezt a kollinearitási egyenletek segítségével írhatjuk fel:

$$\begin{aligned}x_k &= -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + x_0 \\y_k &= -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + y_0\end{aligned}\quad (1)$$
$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

- ahol  $x_k, y_k$  a képkoordináták a képkoordináta-rendszerben,  
 $X, Y, Z$  a terepi pont koordinátái a tárgyoldali koordináta-rendszerben,  
 $X_0, Y_0, Z_0$  a vetítési középpont koordinátái a tárgyoldali koordináta-rendszerben,  
 $c$  a kameraállandó,  
 $\mathbf{R}$  a képi, illetve tárgyoldali koordináta-rendszer közti forgatási mátrix,  
 $r_{ij}$  a forgatási mátrix elemei,  
 $x_0, y_0$  a képfőpont koordinátái.

Tehát a kollinearitási egyenlet leírja a térbeli transzformációt a tárgy- és a képkoordináta-rendszer között. Az egyenletekből látszik, hogy képenként és pontonként 2 egyenletet

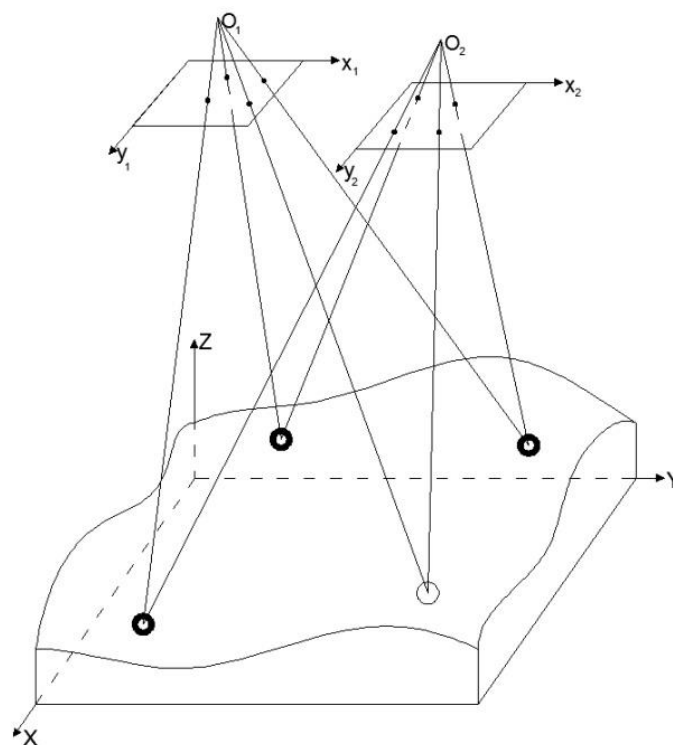
írhatunk fel. Ha egy pont két tájékozott képen azonosítható, valamint a 3 tárgyoldali koordinátát szeretnénk meghatározni, akkor ez 3 ismeretlent jelent, és 4 egyenletet írhatunk fel, tehát a feladat túlhatározottnak, így megoldhatónak tekinthető. Ezt nevezzük a fotogrammetriában előmetszésnek.

A 3D rekonstrukcióhoz tehát szükségünk van a képek tájékozására, mely azt jelenti, hogy ismernünk kell a képek fényképezéskori elhelyezkedését a tárgyoldali koordináta-rendszerben (külső tájékozás). A mérőkamerák esetében ismertek a képek belső tájékozási adatai, melyek egyrészt a vetítési középpont koordinátáit (a képkoordináta-rendszerben), másrészt az optikai elrajzolási adatokat jelentik. Ha az adatrögzítéshez nem mérőkamerát használunk, a belső tájékozási adatok meghatározása is szükséges, mely a vetítési középpont képkoordináta-rendszerbeli helyét, illetve az optika centrális leképezést torzító hatásainak (elrajzolási adatok) meghatározását jelenti. A képpárok fényképezéskori relatív elhelyezkedésének meghatározását kölcsönös tájékozásnak nevezzük, melyet a kapcsolópontok segítségével tehetünk meg. Ekkor már a térmodell előállítható, de nem ismerjük a térmodell és a tárgykoordináta-rendszer egymáshoz viszonyított kapcsolatát. Ezen kapcsolat leírását nevezzük abszolút tájékozásnak. Érdemes megállapítani, hogy a kölcsönös és abszolút tájékozást a gyakorlatban gyakran egy lépésben hajtjuk végre. Az illesztőpontok alapján történő külső tájékozási adatok meghatározását indirekt tájékozásnak nevezzük (1. ábra), napjainkban azonban egyre inkább előtérbe kerül a direkt tájékozás, mely közvetlenül adja meg az exponáláskori pozíciót és a szenzor helyzetét, légitényképek esetén például GNSS (Global Navigation Satellite System – globális műholdas navigációs rendszer) és inerciális (Inertial Measurement Unit – IMU) mérésekkel.

Az kezdeti analóg fotogrammetriához képest az analitikus fotogrammetria a kiértékelés folyamatában jelentett előrelépést, majd pedig a digitális képalkotás lehetősége vált elérhetővé. A folyamat során egyre inkább teret nyertek a képeket külön kezelő és képkoordináta-mérések segítségével térbeli eredményt szolgáltató fotogrammetriai feldolgozások, amit a képek közti automatikus pontazonosítás (image matching) fejlődése is elősegített (Kraus, 1998). Jelentős előnyöket nyújt a számítógépek nagy számítási kapacitása a sugárnyaláb-kiegyenlítés során.

A digitális fényképezés egyúttal a fotogrammetria nagymértékű átalakulását is jelenti. Egyrészt a digitális kamerák nyers képeinek geometriai felbontása elmarad az analóg

képekétől (ezért is késlekedett a digitális kamerák térhódítása), mely nehézségre a tudomány matematikai úton, algoritmusok segítségével keresi a megoldásokat. A digitális képek esetében a pixelek jelentik az elemi, homogén egységeket, idővel mégis megjelent a pixel alatti pontosságú mérés lehetősége (Fekete, 2006), mely a pixelek több részre történő felbontását jelenti, így lehetővé válik kisebb egységek azonosítása, ami a feldolgozási eljárás pontosságát növeli. Az átalakulás másik fontos része a nagy számítási kapacitásból adódóan a valós idejű (real-time) feldolgozás lehetősége lett. A számítógépes látás (Computer Vision – CV) algoritmusai a számítás hatékonyságát jelentősen növelik, esetenként a feladatot jól specifikálják, ezáltal egyszerűsítések tehetőek (Coxeter, 1986).



**1. ábra. Kapcsolat a terepi és a képkoordináta-rendszer között (digitális felvételek esetén)**

Fontos megjegyeznünk, hogy a fényképek alapján történő térbeli mérések pontosságát az itt említettekén kívül még sok tényező befolyásolja, melyek hatását megfelelő hálózattervezéssel tudjuk csökkenteni (Fraser, 1996; Fekete, 2006; Schrott, 2010). A kameratengelyek szerint megkülönböztetünk konvergens hálózatokat, illetve normál elrendezésű hálózatokat (légi fotogrammetria esetén jellemzően ezt alkalmazzuk). A főként közelfotogrammetriában használatos konvergens hálózatok esetén a különböző felvételek kameratengelyei metszik egymást, így segítve a tárgyak teljes felületének modellezését és a jobb metszésviszonyok biztosítását. A normál elrendezés esetén a kameratengelyek

párhuzamosak, mely a számítás során jelent előnyt, ugyanis a jelentősen egyszerűsíti a kollinearitási összefüggést. Az általános hálózattervezési feladatok azonban nem részei jelen disszertációnak, mivel azok hatásai nagyjából egységesen érintik az összes fotogrammetriai feldolgozási eljárást.

A fotogrammetriában általában törekszünk optimális számú fölösmérést végezni, hogy a számításaink végeredményének pontosságát növelhessük. Az így kapott túlhatározott egyenletrendszer megoldására valamely optimalizálási feladat végrehajtása szükséges, mely leggyakrabban a legkisebb négyzetek módszere (Detrekői, 1991). A kollinearitási egyenletek nem lineárisak, ezért a meghatározandó paraméterek előzetes értéke szükséges a kiegyenlítés elvégzéséhez, a kiegyenlített értékeket csak iterációs lépésekkel tudjuk meghatározni.

## 2.2. Direkt Lineáris Transzformáció

A közelfotogrammetriai mérőrendszerek általában több kamera konvergens fotogrammetriai hálózatából állnak. A nagy geometriai felbontás és sűrű mintavételezési igény mellett gazdaságossági szempontokat is figyelembe véve a mérőkamerák használata a gyakorlatban többnyire nem megoldható; ezen megfontolásból választottam a Direkt Lineáris Transzformációt (DLT), mely nem kalibrált felvételek feldolgozására alkalmas fotogrammetriai eljárás (Abdel-Aziz és Karara, 1971).

A centrális projekciót leírják a kollinearitási egyenletek, azonban a linearizálás miatt rossz kezdeti koordináták esetén nem feltétlenül jutunk megfelelő eredményre. Abdel-Aziz és Karara ennek okán a kollinearitási egyenletekből kiindulva adták meg az optikai leképezés egy új alakját és nevezték el Direkt Lineáris Transzformációnak (Abdel-Aziz és Karara, 1971) :

$$\begin{aligned} x_m &= \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}, \\ y_m &= \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}. \end{aligned} \quad (2)$$

ahol  $x_m, y_m$  a képkoordináták a komparátor vagy műszer koordináta-rendszerben,

$X, Y, Z$  a tárgyoldali koordináták,

$L_i$  a transzformációs együtthatók (DLT paraméterek).

Ennek átalakításával jutunk a közvetítő egyenletekben felhasználható alakhoz (Karara, 1989):

$$\begin{aligned} L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 - x_kXL_9 - x_kYL_{10} - x_kZL_{11} - x_m &= 0, \\ L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8 - y_kXL_9 - y_kYL_{10} - y_kZL_{11} - y_m &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

A DLT egyenletei kiegészíthetők az optikai elrajzolás paramétereivel (Atkinson, 1996; Karara, 1989; Luhman, 2000):

$$\begin{aligned} x_m + (x_m - x_0)(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + \dots) + (r^2 + 2[x_m - x_0]^2)P_1 \\ + 2(y - y_0)(x_m - x_0)P_2 = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}, \\ y_m + (y_m - y_0)(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + \dots) + (r^2 + 2[y_m - y_0]^2)P_2 \\ + 2(y_m - y_0)(x_m - x_0)P_1 = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}, \end{aligned} \quad (4)$$

ahol  $x_0, y_0$  a képközéppont koordinátái a komparátor koordináta-rendszerben,  
 $K_i, P_i$  az objektív elrajzolási paramétere.

Az így kapott egyenletek linearizálás nélkül felhasználhatóak a legkisebb négyzetes paraméterillesztés kiinduló egyenleteiként. Érdemes észrevenni, hogy a fenti képletekben nem szerepelnek explicit módon a kamera belső tájékozási adatai. Az eljárás nem kalibrált kamerák esetén is jól használható, a kamera belső tájékozási adatai zárt képletek segítségével kifejezhetőek a DLT paramétereiből, erre azonban a képek tájékozásához nincs szükség. Míg a kollinearitási egyenletben a képkoordináták a műszerkoordinátarendszerben adottak 6 meghatározandó paraméter van, a DLT egyenletei 11 paramétert tartalmaznak, így az eljárás minimális illesztőpont igénye is nagyobb (Luhmann, 2000). Ez azonban a közelfotogrammetriai mérések során könnyen biztosítható a felméréndő objektumon kívül található illesztőpontokkal.

A DLT-nek léteznek további formulái is, melyek a két kiinduló egyenletet kiegészítik a DLT paraméterekre vonatkozó ortogonalitási feltételekkel (Hatze, 1988; Bopp és Kraus, 1978). Elméletben ezek a kényszerfeltételek a paraméter-meghatározást stabilabbá teszik, azonban nem lineáris formulák. A számítás stabilitása tovább növelhető a DLT paramétereiből zárt képletek segítségével számítható belső tájékozási adatokra felirt kényszerfeltételi egyenletekkel, ha a belső tájékozási adatok ismertek.

### 2.3. Paraméterbecslés

A gyakorlatban végzett méréseinket, megfigyeléseinket valamilyen valószínűséggel hibák terhelik, ezért törekszünk a mérési hibák illetve a mérésekből levezetett paramétereket terhelő hibák minimalizálására. A méréseket terhelő hibáknak különféle fajtáit különböztetjük meg. A hibákat egyrészt forrásuk szerint szokás osztályozni:

1. személyi eredetű hibák,
2. műszerhibák,
3. külső körülményekből adódó hibák,

illetve azok jellege szerint:

1. szabályos hibák,
2. véletlen (szabálytalan) hibák
3. és durva hibák.

A szabályos hibák, más néven modellhibák a méréskor elhanyagolt körülményekből, azaz a funkcionális modell megválasztásából fakadnak (Detrekői, 1991). A modellhibák mértékét a pontossági igényeknek megfelelő matematikai modell megválasztásával csökkenthetjük. A durva hibák olyan nagymértékű hibák, melyek meghaladják a mérés pontosságától megkövetelhető határt. Azokat a kiegyenlítési technikákat, melyek a durva hibák hatására nem érzékenyek, robusztus becsléseknek nevezzük. A szabálytalan (vagy véletlenszerű) hibák azok a hibák, melyek az előző két csoportba nem sorolhatóak be.

A méréseinket terhelő hibák hatásának minimalizálására paraméterbecsléseket használunk. Hagyományos fotogrammetriai és geodéziai paraméterbecsléskor a legkisebb négyzetek módszerét, illetve a hibaterjedés elméletét alkalmazzuk (Detrekői, 1991); napjainkban egyre többet használják a minimax ( $L_\infty$ ) módszert (Fellbaum, 1996) és a Maximum-Likelihood becsléseket. Becslések során a leggyakrabban a következő normákat használjuk:

- $L_1 = \sum_i |\Delta_i|$ : a hibák abszolút értékének összege,
- $L_2 = \sum_i \Delta_i^2$ : a hibák négyzetösszege,
- $L_\infty = \max_i |\Delta_i|$ : a hibák maximumának kiválasztása (Csebisev-norma).

Abból kiindulva, hogy méréseinket hibák terhelik, azok hatásainak csökkentése érdekében fölösméréseket végzünk. Ezért a gyakorlatban túlhatározott egyenletrendszerek megoldását

keressük valamely célfüggvény mellett, melyet csak lineáris függvények esetén tudunk zárt képlettel meghatározni.

Amennyiben méréseinket a levezetett mennyiségek középhibáival szeretnénk jellemezni, a legkisebb négyzetek módszere jól alkalmazható eljárás. A mérési eredmények között mutatkozó geometriai (matematikai) ellentmondások megszüntetése és a valódi értékek minél jobb megközelítése érdekében paraméterbecslést végzünk, melyhez legkisebb négyzetek módszere esetén a javítások ( $\mathbf{v}$ ) minimalizálására a következő célfüggvényt fogalmazzuk meg (azzal a feltételezéssel élve, hogy a méréseink jól közelítik a valódi értéket):

$$\mathbf{v}^T \mathbf{v} = \min. \quad (5)$$

A (5) képletből látszik tehát, hogy a javítások – így a durva hibák javításai is – négyzetes alakban kerülnek a kiegyenlítésbe, így a durva hibákra a módszer kiemelkedően érzékeny. A méréseink eltérő pontosságának kezelésére vagy a hibák hatásának csökkentésére a mérések súlyának ( $\mathbf{P}_{LL}$ ) megfelelő megválasztása ad lehetőséget:

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P}_{LL} \mathbf{v} = \min. \quad (6)$$

A legkisebb négyzetek módszere a mért mennyiségek torzítatlan becslését adja (Detrekői, 1991), a megoldás igen hatékony és jól algoritmizálható. Azonban ha a mért mennyiségek és a meghatározandó paraméterek kapcsolata nem lineáris, a feltételi egyenleteinket linearizálni szükséges. Ebben az esetben a feladat megoldásának menete röviden a következő:

1. a mérési eredményeket és a meghatározandó paramétereket tartalmazó feltételi egyenletek felállítása,
2. amennyiben a felállított egyenletek nem lineárisak, azok linearizálása,
3. a paraméterek előzetes értékeinek felvétele,
4. a mérési eredmények súlyviszonyainak meghatározása,
5. a lineáris egyenletrendszer megoldása,
6. újabb iteráció (ugrás az 3. pontra) szükségességének vizsgálata és végrehajtása,
7. a pontossági és megbízhatósági mérőszámok meghatározása.

Azzal a feltételezéssel élve, hogy a mérési eredményeket terhelő hibák kis értékűek, a linearizálás Taylor-sorfejtéssel és a magasabb rendű tagok elhanyagolásával hajtható végre.

## 2.4. Huber-módszer

A hibák általában adódhatnak egyrészt a felállított modell általánosításából, mint például a feltételezett normális eloszlásból, másrészt személyi vagy mérési hibákból. A 2.3. fejezetben említettek alapján tehát méréseinket gyakran terhelik durva hibák.

Tudva, hogy a legkisebb négyzetek módszere igen érzékeny a durva hibákra, célszerű azok kiszűrése vagy hatásuk csökkentése. Ennek elérésére általában kétfajta eljárás használatos (Detrekői, 1991). Egyik esetben a kiegyenlítést követően az eredmények matematikai statisztikai elemzését végezzük el, és ez alapján durva hibás méréseinket elhagyjuk az eredmények közül, szükség esetén a kiegyenlítést újra megismételjük. Ennek vizsgálata leginkább a súlyegység-középpontjának ( $m_0$ ) felhasználásával történik. Egyik gyakran alkalmazott statisztikai vizsgálat a  $\chi^2$  próba. Amennyiben a súlyegység középpontjának várható értéke azonosnak tekinthető az *a priori* középponttal, akkor a méréseinket feltehetően nem terheli durva hiba.

A  $H_0: w_i = 0$  hipotézissel szemben állított  $H_1: w_i = \delta$  ellenhipotézisben szereplő  $\delta$  érték kifejezhető a felvett konfidenciaszinten megadott  $\alpha = 1 - p$  érték és a próba  $1 - \beta$  erejében szereplő  $\beta$  érték segítségével:

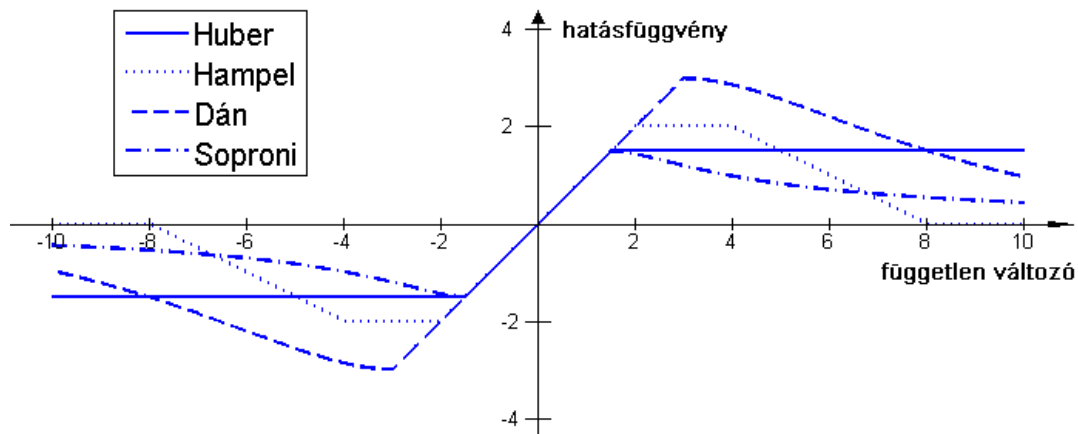
$$\nabla w_i = \frac{\nabla v_i}{\mu_{vi}} = \frac{f_i \nabla L_i}{\sqrt{f_i} \mu_{Li}} = \frac{\nabla L_i}{\mu_{Li}} \sqrt{f_i}, \quad (7)$$

|      |              |   |
|------|--------------|---|
| ahol | $\nabla L_i$ | az $i$ -k mérésben elkövetett durva hiba,   |
|      | $\nabla v_i$ | az $i$ -k mérésben elkövetett $\nabla L_i$ hatása az $i$ -k javítására,                                 |
|      | $\mu_{vi}$   | a javítások középpontja,  |
|      | $\mu_{Li}$   | a mérési eredmények <i>a priori</i> középpontja,  |
|      | $f_i$        | a mérésekre eső fölösmérés hányad,  |
|      | $w_i$        | standardizált javítások   |
|      | $\nabla w_i$ | az $i$ -edik mérési eredményben elkövetett $\nabla L_i$ durva hatása az $i$ -k standardizált javításra. |

A mérések megbízhatósága a még kimutatható legkisebb durva hiba mértékével jellemezhető:

$$\nabla L_i = \mu_{Li} \frac{\delta}{\sqrt{f_i}} \quad (8)$$

Másik lehetőség az úgynevezett robusztus becslések használata. A robusztus becslések alapvető jellemzője, hogy kevésbé érzékenyek a durva hibákra. Az érzékenység pedig annak a mértéke, hogy egy lokális zavaró hatás mennyire befolyásolja a becslés értékét (Tóth, 2004). A robusztus becslések egyik fajtája az M-becslések (Maximum Likelihood), melyek az  $x$  paramétervektort az  $L(y, x)$  likelihood függvény maximumából határozzák meg az  $y$  minta alapján. A célfüggvény deriválásával megkapjuk a hatásfüggvényt; az ábrán (2. ábra) néhány M-becslő hatásfüggvényét mutatom be.



2. ábra. Néhány robusztus becslő hatásfüggvénye

Az M-becslőkkel való durvahiba-szűrés általános módszere az iterációk során az egyes mérések újrásúlyozása úgy, hogy a súlyfüggvényt a következőképp definiáljuk:

$$\omega(\varepsilon) = \frac{\psi(\varepsilon)}{\varepsilon}, \quad (9)$$

ahol  $\varepsilon$  a hiba mértéke,

$\omega(\varepsilon)$  a súlyfüggvény,

$\psi(\varepsilon)$  a hatásfüggvény.

A legkisebb négyzetek módszere könnyen robusztus jellegű becsléssé alakítható úgy, hogy annak célfüggvényét kiegészítjük a mérési eredmények javításán alapuló súlyozással. Az

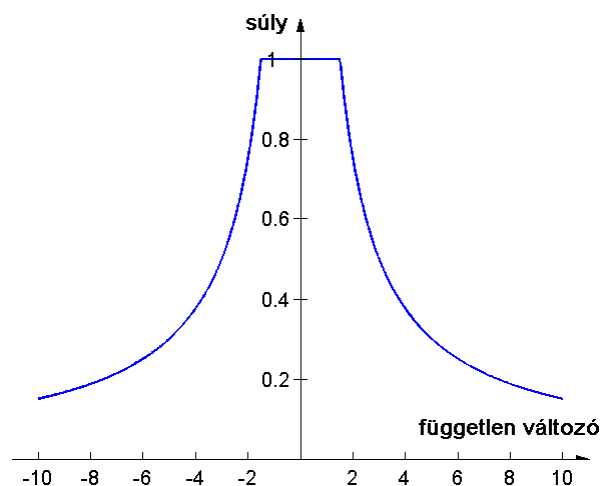
ábrán bemutatott négy módszer közül a Huber-módszer előnye, hogy hatásfüggvénye konvex, ezért minden esetben konvergens, valamint súlyfüggvénye hatékonyan számítható.

Általában a fotogrammetriai mérések eloszlása a várható érték közelében normális, a széleken azonban bizonytalan; hasonló esetekre javasolta Huber a következő hatás- és súlyfüggvényt (Huber, 1981):

$$\psi(\varepsilon) = \begin{cases} \varepsilon, & \text{ha } |\varepsilon| \leq a \\ a \operatorname{sign}(\varepsilon) & \text{egyébként} \end{cases}; \quad \omega(y) = \begin{cases} 1, & \text{ha } |\varepsilon| \leq a \\ \frac{a}{|\varepsilon|} & \text{egyébként} \end{cases}, \quad (10)$$

ahol  $a$  egy küszöbszám, melynek a  $1,5 \sigma$  értéket szokták adni (Závoti, 1999).

A Huber-módszer a nagy javításokat kapott mérések súlyát az iterációs lépések során csökkenti (3. ábra), így a paraméterbecslés robusztussá válik (Jancsó, 2006).



3. ábra. A Huber-módszer súlyfüggvénye

## 2.5. Szinguláris érték szerinti felbontás

A fotogrammetriai kiegyenlítések sajátossága, hogy a szélsőérték-keresési probléma gyakran szinguláris mátrixok megoldását jelenti (Kraus, 1998). Négyzetes, nem szinguláris  $\mathbf{A}$  mátrixok esetén az  $\mathbf{Ax} = \mathbf{y}$  egyenlet megoldása  $\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{y}$ . Szinguláris együtthatómátrix esetén az invertálás nem alkalmazható, ilyen az esetben az  $\mathbf{A}$  mátrix szinguláris érték szerinti felbontása (Singular Value Decomposition – SVD) jelent megoldást (Eckart és Young, 1938).

Az SVD az együtthatómátrixot részekre bontja: egy forgatásra, egy tengelyek menti skálázásra és egy újabb forgatásra (Tóth, 2004):

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T, \quad (11)$$

ahol  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{V}$  mátrixok, oszlopaik egymásra ortogonálisak,  
 $(n \times r)$ ,  $(m \times r)$

$\mathbf{\Lambda}$  a sajátértékekből alkotott diagonál mátrix:

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sqrt{\lambda_r} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Ekkor egy lineáris egyenletrendszer megoldása így írható fel:

$$\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^{-1}\mathbf{U}^T\mathbf{y}. \quad (13)$$

Azonban  $\mathbf{A}$  szinguláris vagy nem négyzetes mátrixok esetén  $\mathbf{\Lambda}^{1/2}$  nem invertálható, mivel a főátlóban zérus elemek is találhatóak. Ilyenkor az  $\mathbf{A}$  és  $\mathbf{\Lambda}^{1/2}$  pszeudoinverzét definiáljuk, így a lineáris egyenletrendszer megoldása a következőképpen módosul:

$$\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^+\mathbf{U}^T\mathbf{y}, \quad (14)$$

ugyanaz súlyozott ( $\mathbf{P}_{LL}$ ) esetben:

$$\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^+\mathbf{U}^T\mathbf{P}_{LL}\mathbf{y}. \quad (15)$$

Ezzel a rosszul kondicionált fotogrammetriai egyenletrendszerek legkisebb négyzetek elve alapján történő kiegyenlítése lehetővé válik, és célfüggvény szerinti optimális megoldásra vezet.

## 2.6. Pontosság és megbízhatósági vizsgálatok

Ha egy mérnöki problémakörre keressük a megfelelő megoldást, fontos ismernünk az elérhető megoldások alkalmazásának lehetőségeit, korlátait. A jó döntés meghozatalakor kiemelkedő szempont az eljárással elérhető mérési pontosság, de természetesen a gazdaságosság, az adatrögzítési és -feldolgozási időigény mind-mind fontos tényezők.

Egy bizonyos feladat során alkalmazandó eljárás kiválasztását a korábban meghatározott pontossági mérőszámok segítségével tudjuk végrehajtani. Dolgozatomban ezen pontossági mérőszámok meghatározását hajtom végre, mindazonáltal a pontosság fogalma alatt több jellemzőt különböztetünk meg.

A pontossági vizsgálatok egyik célja, hogy az adott mérések minősítése lehetővé váljon, valamint, hogy az egyes mérési eljárásokkal elérhető pontosságra egy előzetes becslést adjon, ezzel segítve a hálózat tervezést és a döntéshozatalt. A mérőszám-meghatározás folyamatában jelentős különbség, hogy ismert-e a meghatározandó paraméterek hibátlanak tekintett értéke ( $\Lambda$ ), valamint a mérési eredményeken végrehajtott számítások végeredményében szereplő valódi hiba ( $\epsilon$ ).

Amennyiben a paraméterek hibátlanak tekintett értéke nem ismert, akkor a mérések minősítésére a középhibát használjuk, melyet a szakirodalom pontosságnak nevez (Detrekői, 1991). Abban az esetben, ha nincs szabályos hiba, a középhiba megegyezik a tapasztalati szórással.

Ha a paraméterek hibátlanak feltételezett értéke ismert, akkor a mérési eredmények valódi eltérése segítségével képzett szórást nevezünk pontosságnak, és a középhibákat szabatoságnak (Fekete, 2006).

A hibátlan értékek és a mérések várható értékének különbsége ( $\delta$ ), illetve az egyes mérési eredmények eltérése a várható értékektől ( $\xi$ ) mind valószínűségi vektor változók, ha tehát a méréseinket ( $L$ ) valószínűségi vektor változónak tekintjük, akkor azok hibái is valószínűségi vektor változók lesznek:

$$\delta = M(L) - \Lambda, \quad (16)$$

$$\xi = L - M(L), \quad (17)$$

$$\epsilon = L - \Lambda = L - M(L) + M(L) - \Lambda = \xi + \delta, \quad (18)$$

$$\mu^2 = M(\epsilon^2), \quad (19)$$

ahol  $M(L)$  a mérések várható értéke,  
 $\delta$  a szabályos hibák,  
 $\xi$  a véletlen hibák,  
 $M(\epsilon^2)$  a hibák négyzetének várható értéke,  
 $\mu^2$  a variancia.

Ebből kiindulva a következő pontossági és megbízhatósági mérőszámok különböztethetők meg:

- Középhiha: az alkalmazott paraméterbecslés során számítható. Fotogrammetriában és geodéziában hagyományosan a legkisebb négyzetes paraméterbecslést használjuk, ez esetben a számítás a paraméterek kovarianciamátrixának vizsgálatából ered, mely a súlykoefficiens mátrixból vezethető le (Detrekői, 1991). A diagonális elemek adják a paraméterek középhiháinak négyzetét (variancia), a főátlón kívüliek pedig a kovarianciákat. A kovarianciamátrixból előállítható a korrelációs mátrix, ahol a főátlón kívüli elemek a paraméterek közötti korrelációs együtthatók, míg a főátló elemei 1 értéket vesznek fel.
- Szórás: megadja, hogy a számítás végeredményeként kapott érték milyen közel van a valódi értékhez, tehát ez egy hálózati dátumtól független mérőszám, ami közelfotogrammetriai mérések során igen fontos szempont, ugyanis a koordináta-rendszer felvétele nagyon változatos lehet, melytől a súlykoefficiens mátrixon keresztül levezetett középhibák függenek (Fekete, 2006). Amennyiben adott néhány fotogrammetriai szempontból hibátlanak tekinthető pont, a koordinátakülönbségek négyzetének számtani átlaga megadja a varianciát (szórásnégyzetet), azaz az eljárás pontosságát:

$$\sigma_X^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_X} \Delta X_i^2}{n}; \sigma_Y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_Y} \Delta Y_i^2}{n}; \sigma_Z^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_Z} \Delta Z_i^2}{n}. \quad (20)$$

ahol  $\sigma_X^2, \sigma_Y^2, \sigma_Z^2$  a varianciák,

$\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$  a koordinátakülönbségek,

$n$  a mérések száma.

Jellemzően minősítő mérések esetén érhető el független eredményként a hibátlanak tekinthető koordináták, így ezt a mérőszámot pontossági vizsgálatok esetén használhatjuk.

- A még kimutatható legkisebb durva hiba: A mérések belső megbízhatóságát a még kimutatható legkisebb durva hiba értékével jellemezhetjük az előre megválasztott konfidencia szinten. A még kimutatható legkisebb durva hibák azon hibák, amelyek túllépik a mérés pontosságától megkövetelhető határt, egyenesen arányosak a

mérések *a priori* középhibájával és fordítottn a mérésekre jutó ún. fölösméréshányaddal. Ha a még kimutatható legkisebb durva hiba hatását vizsgáljuk a paraméterekre, akkor megkapjuk az úgynevezett külső megbízhatóságot (Detrekői, 1991).

### **3. Költséghatékony robosztus fotogrammetriai eljárás**

A valós idejű objektumrekonstrukció egyre nagyobb teret nyer, gyakran a gyorsan változó vagy mozgó felületek modellezése alapján történik a döntéshozatal, gondoljunk csak a vezető nélküli autók vezérlésére vagy a gyártósoron történő minőségellenőrzésre. A gyakorlati alkalmazásokban a modellalkotás során felhasznált kamerákkal éppen ezért a következő követelmények fogalmazhatóak meg:

1. nagy geometriai felbontás,
2. sűrű mintavételezési lehetőség,
3. nagy geometriai pontosság.

Ezen feltételeket – gazdaságossági igényeket is figyelembe véve – kevés, jelenleg a piacon elérhető mérőkamera teljesíti, ezért a mérőkamerák használatától eltekintettem, és a kiértékelő alkalmazás tervezésekor tetszőleges kamera által készített felvételek feldolgozását tartottam fő célnak. A kamera kalibrálatlanságából adódó pontatlanságokat matematikai úton lehet korrigálni és megfelelő eredményre jutni. A pontosság növelésére ad lehetőséget a kereskedelmi kamerákban elérhető sűrű mintavételezési lehetőség (ismételt mérések lehetősége), illetve a nagyobb pixelszám.

A tervezett és megvalósított alkalmazás egy web alapú, fotogrammetriai digitalizáló és kiértékelő rendszer. A böngésző segítségével történő megvalósítás egyben egy új célközönség megszólítására is lehetőséget ad, az alkalmazás segítségével az internet bármely felhasználója elvégezheti a térbeli rekonstrukciót, ehhez csak egy egyszerű digitális fényképezőgéppel kell rendelkeznie. Az eljárás során elérhető pontosság a kiértékelendő képek minőségétől függ, a kidolgozott számítási eljárás funkcionális modellje a DLT (Direkt Lineáris Transzformáció) egyenletekben megfogalmazottakon kívül nem tartalmaz további általánosításokat.

#### **3.1. Térbeli rekonstrukciós eljárás tervezése**

A térbeli rekonstrukciót lehetővé tevő számítási eljárás alapjául a DLT-t választottam. A DLT előnye a nem metrikus kamerák használata és a képi és terepi pontok között felállított lineáris formában is létező összefüggés, mely a számítás menetét nagymértékben egyszerűsíti, hátránya a több meghatározandó paraméter (amennyiben a képkoordináták a

műszer-koordinátarendszerben adottak), illetve a hogy ha az illesztőpontok egy síkra esnek, a számítás nem megoldható, vagy stabilitása csökken. A megvalósítás során a felmerülő nehézségekre választ keresve alakítottam ki a végső, feldolgozó algoritmust.

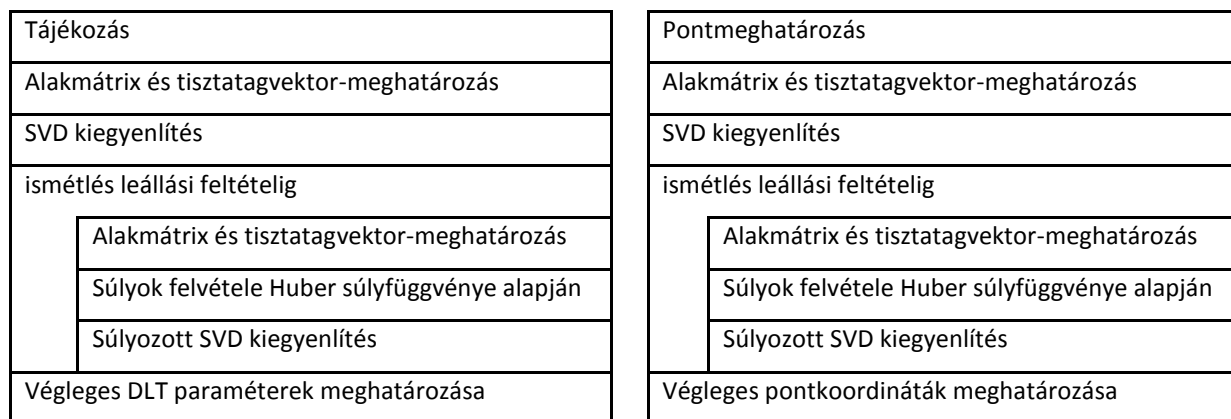
### 3.1.1. Kiértékelő algoritmus

A 3D rekonstrukció végső algoritmus az előzőekben tárgyalt elméletek együttes használata, mely egy robusztus fotogrammetriai eljárást eredményez, aminek számítási lépései jól algoritmizálhatóak, jó hatásfokkal működnek.

Az algoritmus számítását GNU Octave (Octave, 2012) programozási nyelven implementáltam, mely nagyon jó lehetőségeket biztosít lineáris egyenletrendszerek kezelésére.

A számítás két fő lépésre bontható, első lépés a képek illesztőpontok alapján történő DLT paraméterek meghatározása (analóg a külső és belső tájékozással), majd a képenként meghatározott 11 DLT paraméter segítségével az ismeretlen pontok térbeli koordinátáinak meghatározása (4. ábra).

A két lépés algoritmus hasonlón írható le:



4. ábra. Tájékozás (balra) és pontmeghatározás (jobbra) struktogramjai

A Huber-módszer  $a$  küszöbszámát alapértelmezetten 1 pixel értékkel veszem fel, mely az felvételek és a digitalizálás minőségének függvényében módosítható. Az iterációs lépésekre a Huber-módszer miatt van szükség, annak hatásfüggvénye biztosítja a konvergenciát és a tapasztalataim alapján már 2-3 lépés után elérhető a megfelelő pontosság (Molnár, 2010a). A legtöbb fotogrammetriai kiegyenlítési eljárásához hasonlóan én is azon feltételezéssel élek, hogy az észlelések függetlenek és azonos súlyúak, ez azonban egy egyszerűsített modell, az  $x$  és  $y$  műszerkoordináták egy lépésben történő meghatározása miatt, a valóság jobb

közelítése megoldható a centrális vetítésből levezethető a mérési eredményekre vonatkozó kovariancia mátrixok segítségével (Fekete, 2010).

## 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

## 3.2. Web alapú kiértékelő rendszer

A 3.1. fejezetben tárgyalt kiértékelő eljárás köré egy digitalizálásra alkalmas felhasználói felületet készítettem. Célom egyrészt a saját kutatási feladataim támogatása, másrészt széles körben használható felület létrehozása volt.

Látva a mai trendeket, a legtöbb alkalmazás elérhető böngészőn keresztül, és a korábbi web fejlesztési tapasztalataimat felhasználva egy WEB 2.0-ás felület tervezését valósítottam meg, mely egy felhő alapú (cloud computing) szerverkörnyezetben fut. Az alkalmazásnak a WebDLT nevet adtam és a <http://dlt.fmt.bme.hu> címen érhető el. Döntésem nem titkolt célja a fotogrammetria világát megmutatni olyan felhasználóknak, akik a fényképek alapján történő modellezéssel eddig nem találkoztak. A web alapú megvalósítás a próbálkozó kedvék számára azt az előnyt is nyújtja, hogy a szolgáltatás ingyenes lehet úgy, hogy a üzemeltetése a fejlesztő számára is csak minimális költséget jelent.

### 3.2.1. Korábbi alkalmazások

Amatőr fotogrammetriai feldolgozó program fejlesztésére nem ez az első próbálkozás, egy részük kifejezetten üzleti vállalkozás, ráadásul mind másra helyezi a hangsúlyt, így egyértelmű összehasonlítást nem lehet végezni. Néhány piacon elérhető fotogrammetriai kiértékelő program ismertetése az alábbiakban olvasható.

- Photomodeller: Az EOS System cég terméke, régóta a piacon lévő kereskedelmi szoftver. Homlokzatok modellezésére különösen alkalmas, összetettebb felületek esetén a feldolgozás eredményének minősége rohamosan csökken. Célkitűzése az

amatőr felvételek feldolgozása, ehhez egy egyszerű és egy összetettebb kalibrációs eljárást is kínál (Photomodeller, 2012).

- Arpenteur: Tudományos célokra fejlesztett, ingyenes, web alapú fotogrammetriai szoftver. Előnye, hogy képes automatikus képpont felismerésre (Grussenmeyer és Drap, 2001). Napjainkban nem fejlesztik, modern böngészőkben már nem futtatható. Hátránya, hogy böngésző kiegészítő telepítése szükséges az alkalmazásához.
- 123DApp: Az AutoDesk cégcsoport által forgalmazott program, mely teljesen automatikus képfeldolgozást tesz lehetővé, illesztőpontok megadására nem kínál lehetőséget. Egyszerű geometriájú, jól strukturált felületek modellezésére jól használható, természetesen méretarány nélkül. Jelenleg még ingyenesen használható, a kliensgépre telepített alkalmazás egy feltöltő felületet nyújt, a számítás egy távoli gépen történik (AutoDesk, 2013).

### 3.2.2. Webes megvalósítás

A felhasználói felület tervezésekor ki kell választani a megvalósításhoz használt programozási nyelvet és eljárást úgy, hogy az alkalmazás a fejlesztő és a végfelhasználó számára egyaránt megfeleljen. A web alapú alkalmazások megvalósításának számtalan előnye mellett adódik néhány hátrány és nehézség is (1. táblázat) (Molnár, 2010b). Ez utóbbiak hatásának minimalizálása a tervezés során fontos szempont kell, hogy legyen.

1. táblázat. A web alapú alkalmazások előnyei és hátrányai

| Előnyök                                | Hátrányok                                     |
|--|---|
| Operációs rendszertől független        | Szélessávú internetkapcsolat szükséges        |
| Nincs szükség programtelepítésre       | A nagy képek nagy adatforgalmat eredményeznek |
| Nem igényel rendszergazdai jogokat     | Korlátozások a böngésző miatt                 |
| Nincs szükség szoftverfrissítésre      | Adatvédelmi aggályok                          |
| Hely- és idő független                 |   |
| Mindig megszokott felhasználói felület |   |
| Gazdaságos fejlesztés és verziókövetés |   |

A web alapú megoldások sajátossága, hogy az elvégzendő feladat két elkülönült helyen fut annak ésszerű megosztása mellett úgy, hogy a kettő közti kapcsolatot a hálózat teremti meg (Molnár, 2010d). Fontos tehát a feladatok ésszerű elosztása a központi számítógéprendszer és a kliensoldali számítógépek között úgy, hogy a köztes adatátvitel a lehető legkevesebb legyen.

Az internetes alkalmazások nagy előnye, hogy a munkánkat bármikor félbehagyhatjuk és később tetszőleges helyen és munkaállomáson folytathatjuk, ennek feltétele viszont az adatok távoli számítógépen való tárolása.

A megvalósítás során törekedtem a gazdaságosságra, éppen ezért kizárólag szabad szoftvereket használtam fel. Mindemellett követtem az internetes szabványokat, melyek segítségével biztosítható böngészőfüggetlen, optimalizált megjelenés. Így a felhasználó bármilyen operációs rendszeren, bármely böngészőt futtatva tudja használni az alkalmazást.

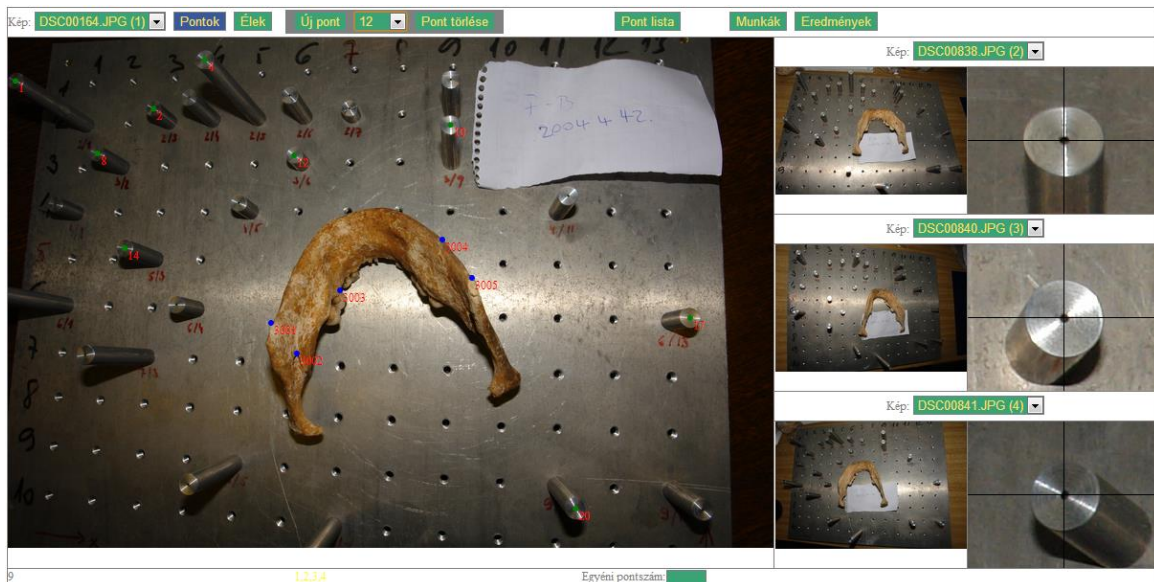
Szerveroldalon a képi állományok fájl szinten kerülnek tárolásra a gyors kiszolgálás érdekében. Az egyéb adatok MySQL relációs adatbázisba szervezve érhetőek el, melynek kiépítése gondoskodik az adatok konzisztenciájáról (MySQL, 2012). A disszertációban nincs mód az adatbázis-tervezés részleteinek bemutatására.

A weboldalak szerveroldali, dinamikus előállítására PHP programnyelv (PHP, 2013) segítségével történik. A PHP igen rugalmas, C jellegű script nyelv, mely szerteágazó kiegészítésekkel rendelkezik és igen széles körben használt. A megvalósított alkalmazás PHP alapú, mely Apache webserveren (Apache, 2013) és GNU Debian operációs rendszeren (Debian, 2013) fut.

Az előállított weboldalak, melyek a klienshez eljutnak XHTML (XHTML, 2013) szabvány szerint készülnek, ezt értelmezi a böngésző és végzi el az oldal megjelenítését (rendering). Az oldalak grafikai kinézete CSS (CSS, 2013) segítségével kerül megformázásra. Hagyományos böngészés esetén minden felhasználói tevékenység eredménye a teljes oldal újratöltése. Ezt forradalmasította a WEB 2.0, miszerint a weboldalnak csak egyes részei töltődnek újra, így a hálózati forgalom jelentősen csökkenthető. A WebDLT JavaScript (JavaScript, 2013) programnyelv segítségével valósítja meg az aszinkron adatkommunikációt (AJAX) a szerver és a kliens között, így például megoldható a digitalizált pontok azonnali mentése a szerverre anélkül, hogy az egész oldalt – benne a nagyméretű kiértékelendő képpel – újra kellene tölteni, mellyel a hálózati forgalom jelentősen csökkenthető. A nagy képek mozgatása jelentős terhelést ró a hálózatra, ennek csökkentése érdekében mind a kliens-, mind a szerveroldalon gyorsítótár (cache) kerül alkalmazásra.

A felhasználói felület fontos része a képkoordináta-mérő (digitalizáló) oldal (5. ábra). A megvalósítás nehézsége a képkoordináta-rendszer és a monitorkoordináta-rendszer közti

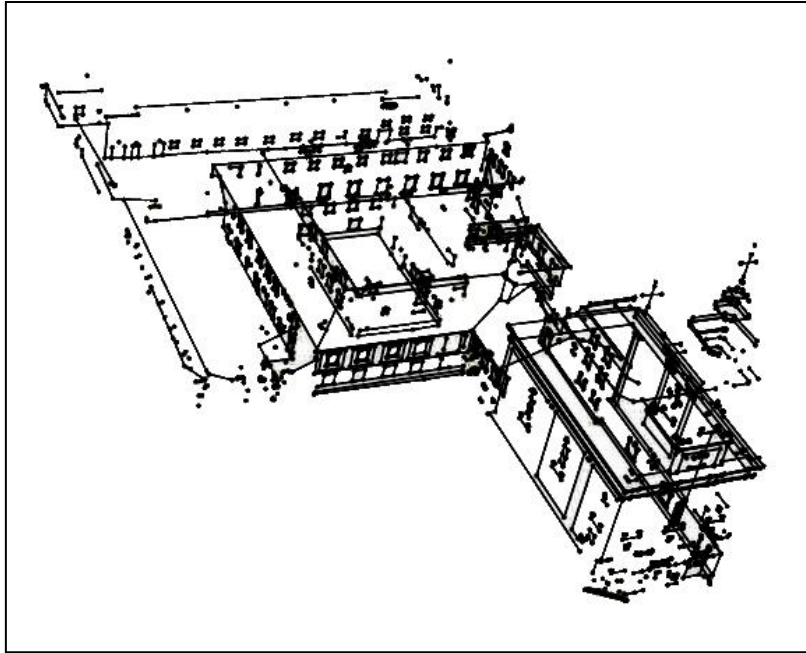
kapcsolat megteremtése úgy, hogy a kép tetszőlegesen nagyítható legyen. Itt jegyzem meg, hogy a megjelenítő modulnak köszönhetően a digitalizálást pixel alatti pontossággal tudjuk elvégezni (Molnár, 2010e). A SVG vektorgrafikus képformátum (SVG, 2013) jó lehetőséget biztosít a képek tartalmának dinamikus változtatásához (Sárközy, 2002), a WebDLT is ezt a technológiát használja.



5. ábra. Digitalizáló modul felhasználói felülete egy állkapocscsont mérésekor

Az eredménymodul a koordináta-listán kívül természetesen további információkat is szolgáltat, mint például a pontok koordinátatengelyek irányában értelmezett középhibáit, a képkoordináták kiegyenlítés utáni javításait, illetve az iteráció során Huber-módszer segítségével változtatott súlyok értékeit, melyek információt adnak a durva hibával terhelt pontokról. A durva hibával terhelt pontok utólagos, kézi javítása (újradigitalizálása) lehetséges, tehát a pontosság tovább növelhető.

Külön modul készült az eredmények megjelenítésére, melynek segítségével a térmodell interaktív formában megtekinthető (6. ábra). A modul szintén az SVG képességeit használja ki úgy, hogy a sík monitoron történő térhatású megjelenítése érdekében a térbeli pontok síkra történő projekcióját számítja ki és jeleníti meg.



6. ábra. Kiértékelt pontok és élek 3D megjelenítése

Az eredmények térbeli megjelenítésén kívül lehetőség van azok DXF formátumban történő exportálására, így további (pl. CAD) alkalmazások számára is feldolgozhatóvá válnak. A pontokon és éleken kívül a hibaellipszoidok is a DXF állományba kerülnek, így könnyebb a nagy középhibával rendelkező pontok azonosítása.

## 2. TÉZIS

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

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

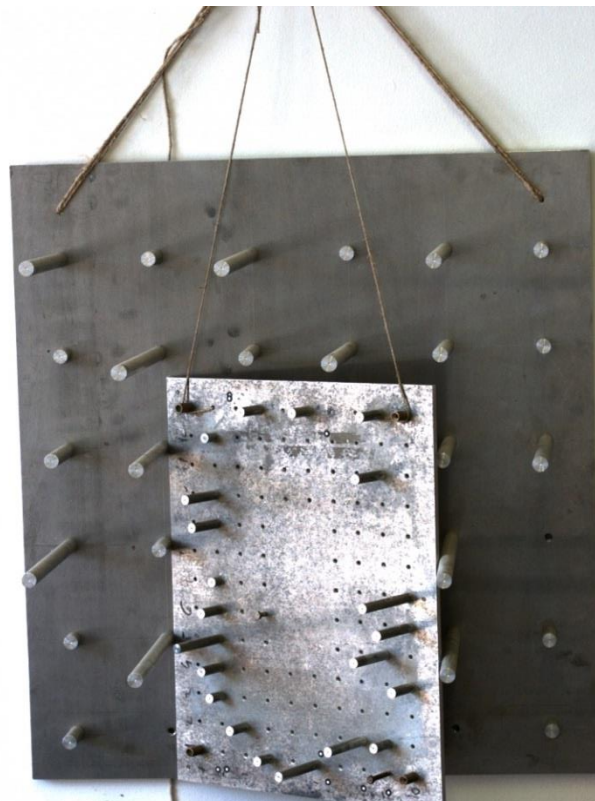
### 3.3. A WebDLT pontossági vizsgálata

A WebDLT minősítését gyakorlati megvalósításokon keresztül végeztem el. A felhasználók az alkalmazás segítségével várhatóan közelfotogrammetriai 3D rekonstrukciót (tárgymérések), illetve földi fotogrammetriai méréseket (pl. homlokzatméréseket) végeznek. Az előbbi magasabb pontossági igényekkel, jobb minőségű kamerák felhasználásával történhet,

ráadásul szakemberek által. Éppen ezért a két felhasználási irányzatnak megfelelően két pontossági vizsgálatot hajtottam végre.

A közelfotogrammetria azon területén, ahol néhány tíz cm-es és ennél kisebb tárgyak felmérésével foglalkoznak, a felmérés szokásos eljárása, hogy megépítenek egy szabatos, nagy stabilitású hálózatot, azt pontosan bemérik, és a különböző kisebb méretű tárgyakat ebbe az előre legyártott hálózatba helyezve fényképezik le és határozzák meg a szükséges geometriai paramétereket. Az egyik első ilyen hálózatot Burch és Forno építette 1984-ben (Burch és Forno, 1984), amely hálózat Manhattan felhőkarcolóinak kicsinyített mása. Az így kapott modellt a szakirodalom a későbbiekben Manhattan-modellnek vagy Manhattan-tesztmezőnek nevezte el.

Első ízben közelfotogrammetriai mérésekhez kialakított 4 kamerás fotogrammetriai mérőrendszer képeit dolgoztam fel. A pontossági vizsgálatához két, egymásba illesztett Manhattan-modellt használtam (7. ábra), az egyiket a DLT paraméterek meghatározásához, a másikat a számított pontok meghatározásához.



**7. ábra. Két Manhattan-tesztterület egymásba helyezve**

Másodízben a Máriabesnyői Bazilika és kolostor teljes homlokzatomérését végeztem el, geodéziai mérések segítségével meghatározott illesztő- és ellenőrzőpontok felhasználásával.

Ez utóbbi feldolgozás nagy elemszámú mintával történt, miközben a durva hibák hatása, illetve azok minimalizálása is minősíthetővé vált.

### 3.3.1. Közelfotogrammetriai mérés

A vizsgálat célja a kis tárgytávolságok esetén elérhető pontosság jellemzése és vizsgálata. Cél továbbá a WebDLT tervezése folyamán megfogalmazott célkitűzések teljesülésének ellenőrzése, valamint annak humánmorfológiai, azon belül arcreekonstrukciós célokra való alkalmazhatóságának ellenőrzése.

Az emberi arc mérésének nehézsége a homogén textúra és a tagolt felület, melynek következtében jelentős optikai kitakarások tapasztalhatóak. A kitakarások miatt a kamerák lehetséges bázistávolsága igen limitált, ami hegyes metszésszögeket, így csökkenő pontosságot eredményez a modellalkotás során. További nehézséget jelent hogy a mimikai izmoknak köszönhetően az emberi arc gyors alakváltozásokat mutat.

#### 3.3.1.1. Hálózattervezés

A BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszékén futó arcreekonstrukciós kutatások részét képezi egy az emberi arc térbeli modelljének meghatározására alkalmas fotogrammetriai mérőrendszer fejlesztése. A mérőrendszer négyzetesen, egymástól körülbelül 1 méterre elhelyezkedő négy PicSight P202B-GigE-AR kamerából áll (2. táblázat) (8. ábra és 9. ábra). A felvételeket maximális (1624×1236) felbontáson, veszteségmentes tömörítésű TIFF formátumban rögzítettem.



8. ábra. PicSight P202-B kamera

2. táblázat. PicSight P202-B kamera műszaki paraméterei

| Tulajdonság                   | Érték            |
|-------------------------------|------------------|
| Képrögzítési frekvencia       | 14 fps           |
| Geometriai felbontás          | 1624×1236 px     |
| Csatoló                       | GigE Ethernet    |
| Érzékelő                      | 1/1,8 CCD        |
| Szinkronizálhatóság (trigger) | igen             |
| Rekesz típus                  | „Global shutter” |
| Radiometriai felbontás        | 12 bit           |

A kamera kiválasztása során fontos szempont volt a nagy képrögzítési frekvencia, hogy az emberi arc felületének gyors változása (mozgása) ne befolyásolja a modell pontosságát (Molnár, 2008). A berendezés tervezésének részletei nem tartoznak jelen disszertáció témakörébe, annak részletei korábbi tanulmányokban olvashatóak (Schrott, 2010; Schrott, 2012). A hálózattervezés során figyelembe vett egyéb szempontok eredményeként kompromisszumként fogadtuk el az objektív jelentős geometriai elrajzolását, illetve a hegyes metszési szögeket. A felvételeket körülbelül 3 méteres tárgytávolság mellett készítettem.



9. ábra. Arcrekonstrukciós mérőberendezés

Méréseim során két Manhattan-modellt használtam, melyek illesztőpont-koordinátái mikrométer pontossággal kerültek meghatározásra (egymástól függetlenül); ezeket a minősítő vizsgálat során hibátlannak feltételeztem. A két modell méreténél fogva egymásba illeszthető, a nagyobb kiterjedésűt használtam fel a paraméterek meghatározására, míg a kisebbet a mérések és számítások minősítésére. Míg a nagyobb modellen 25, a kisebbiken 21 illesztőpont található (7. ábra).

### **3.3.1.2. Minősítés**

Az egyidejűleg készült négy kép digitalizálását a WebDLT segítségével hajtottam végre pixel alatti felbontással. A digitalizált pontok elhelyezkedését többszöri ellenőrzés után véglegesítettem, így csökkentve a durva hibák lehetőségét a pontosság növelése érdekében.

A fejlesztett robosztus kiértékelő eljárás segítségével meghatároztam a négy felvételre vonatkozó DLT paramétereket, majd a kisebb modell pontjait. Az így kapott térbeli pontokat és a kisebb tesztmező koordinátamérővel meghatározott pontjait közös rendszerbe transzformáltam, ezzel a mérés pontossága meghatározhatóvá vált. A számításhoz a Huber-féle küszöbértéket 1 pixel mértékűre vettem fel, mely így is minden illesztőpont és meghatározandó pont esetében is a hibahatáron belül volt, tehát kijelenthető, hogy a méréseket nem terheli durva hiba. A pontazonosítás pontossága jelen feltételek szerint 1 pixel értékűnek feltételezhető, melyet alátámaszt a kiegyenlítés utáni koordináta javítások szórására adódott 0,7 mm-es érték.

A végeredményeket (3. táblázat) megvizsgálva megállapíthatjuk, hogy a nem ideális metszési viszonyok ellenére a hiba maximális értéke 0,72 mm, átlagosan pedig nem éri el a 0,3 mm-t. A  $Z$  koordináta mentén nagyobb eltéréseket tapasztaltam, melyek a tárgy távolság és a bázis távolságok nem ideális arányából adódnak; a metszésviszonyok javításával a pontosság tovább növelhető. Az eredményt összevetve a hálózat tervezés során meghatározott elérhető elméleti pontossággal (Schrott, 2012), azok egy nagyságrendbe esnek, így az eredmény elfogadható. A táblázatban megjelenítésre kerültek a kiegyenlített paraméterek középhibái is.

**3. táblázat. A meghatározott koordináták eltérései és a kiegyenlítés utáni középhibái**

|        | $\Delta x$ [mm] | $\Delta y$ [mm] | $\Delta z$ [mm] | $\Delta t$ [mm] | $\mu_x$ [mm]  | $\mu_y$ [mm]  | $\mu_z$ [mm]  |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| 1      | 0,1311          | 0,0483          | 0,0906          | <b>0,1665</b>   | 0,008         | 0,007         | 0,270         |
| 2      | 0,2214          | -0,0201         | 0,0743          | <b>0,2344</b>   | 0,012         | 0,011         | 0,429         |
| 3      | -0,0190         | 0,0252          | -0,1669         | <b>0,1699</b>   | 0,017         | 0,017         | 0,602         |
| 4      | 0,0017          | 0,0134          | -0,4061         | <b>0,4063</b>   | 0,024         | 0,024         | 0,898         |
| 5      | 0,1202          | -0,0130         | 0,4003          | <b>0,4182</b>   | 0,019         | 0,019         | 0,715         |
| 6      | 0,0664          | -0,0568         | 0,0084          | <b>0,0878</b>   | 0,013         | 0,013         | 0,499         |
| 7      | -0,0591         | -0,0178         | 0,1608          | <b>0,1722</b>   | 0,017         | 0,017         | 0,640         |
| 8      | -0,2201         | -0,0606         | 0,5255          | <b>0,5729</b>   | 0,013         | 0,013         | 0,496         |
| 9      | 0,0848          | 0,0806          | -0,1424         | <b>0,1843</b>   | 0,013         | 0,011         | 0,405         |
| 10     | -0,0179         | 0,1771          | 0,0790          | <b>0,1947</b>   | 0,026         | 0,021         | 0,778         |
| 11     | -0,1626         | -0,0952         | -0,3316         | <b>0,3814</b>   | 0,012         | 0,011         | 0,421         |
| 12     | -0,2262         | -0,0062         | 0,1215          | <b>0,2568</b>   | 0,038         | 0,030         | 1,075         |
| 13     | -0,1193         | -0,0633         | -0,7088         | <b>0,7216</b>   | 0,025         | 0,023         | 0,865         |
| 14     | -0,1584         | -0,1359         | -0,1988         | <b>0,2882</b>   | 0,021         | 0,018         | 0,604         |
| 15     | -0,0858         | -0,1101         | -0,2194         | <b>0,2600</b>   | 0,026         | 0,023         | 0,777         |
| 16     | 0,0119          | -0,0052         | -0,2966         | <b>0,2969</b>   | 0,024         | 0,024         | 0,796         |
| 17     | 0,2187          | 0,0697          | 0,0644          | <b>0,2384</b>   | 0,020         | 0,021         | 0,693         |
| 18     | 0,1015          | 0,2048          | 0,2239          | <b>0,3200</b>   | 0,024         | 0,024         | 0,812         |
| 19     | -0,1183         | -0,1056         | 0,2242          | <b>0,2746</b>   | 0,009         | 0,009         | 0,295         |
| 20     | 0,0976          | 0,0232          | 0,1479          | <b>0,1787</b>   | 0,013         | 0,013         | 0,430         |
| 21     | 0,1315          | 0,0475          | 0,3499          | <b>0,3768</b>   | 0,015         | 0,016         | 0,516         |
| max    | <b>0,2214</b>   | <b>0,2048</b>   | <b>0,5255</b>   | <b>0,7216</b>   | <b>0,0380</b> | <b>0,0300</b> | <b>1,0750</b> |
| átlag  | <b>0,0000</b>   | <b>0,0000</b>   | <b>0,0000</b>   | <b>0,2953</b>   | <b>0,0185</b> | <b>0,0174</b> | <b>0,6198</b> |
| szórás | <b>0,1324</b>   | <b>0,0854</b>   | <b>0,2884</b>   | <b>0,1443</b>   | <b>0,0071</b> | <b>0,0059</b> | <b>0,2075</b> |

A vizsgált mérések alapján elmondható, hogy mérőkamera használata nélkül, alacsony geometriai felbontás mellett a DLT segítségével történő rekonstrukció esetén is elérhető a milliméteres modellalkotási pontosság.

A Huber-módszer működésének ellenőrzése érdekében további vizsgálatokat folytattam és az illesztőpontok, illetve a kapcsolópontok közül egyet-egyed durva hibával terheltem. A hiba hatására a kapcsolópontok koordinátái – a durva hibával terhelt pontot nem számítva – 0,17 mm-es maximális változást szenvedtek. A durva hibával terhelt pontok súlyai a kiegyenlítés során 0,1 alá csökkentek, a durva hibával terhelt kapcsolópont koordinátája 28 mm-es változást szenvedett, azonban ennek a pontnak a középhibája is jelentősen növekedett, így statisztikai úton szűrhető.

A minősítés teljessége érdekében kiszámítottam a még kimutatható legkisebb durva hibák értékeit az  $\alpha = 0,00$  és  $\beta = 0,05$  konfidenciaszinteken, melyre minden képkoordinátára 3 pixel feletti értéket kaptam, 0,5 feletti fölösméréshányaddal. Az eredmények teljes listáját az 3. és 4. függelék tartalmazza.

Az emberi arc modellezésekor nagy nehézséget jelent a pontok azonosítása a homogén mintázat miatt. Emellett jelentős modellhibát eredményezhet a felvételezés alatt az arcon végbemenő – mimikai izmok okozta – alakváltozás, tehát a gyakorlati felhasználás során az elérhető pontosság korlátozott. Antropológiai szempontból azonban a milliméter pontosságú felületmodell már tökéletesen megfelel a felhasználási céloknak (Kustár, 2004; Lee *et al.*, 2012; Schrott *et al.*, 2008). Az emberi archoz hasonló térbeli kiterjedésű tárgyak modellezésére alkalmas optikai szkennerek általában több egymást követő képpár rögzítésével dolgoznak. Ennek hátránya, hogy időben elnyúlik az adatrögzítés, éppen ezért a mozdulatlanság feltételezése nagyobb modellhibákat eredményez. Amennyiben csak egy képpár rögzítése alapján történik a rekonstrukció, ezzel a problémával nem szükséges számolni.

### 3.3.2. Homlokzatmérés

A homlokzatmérések során WebDLT segítségével elérhető pontosság vizsgálatára a Máriabesnyői Bazilika és kolostor (10. ábra) teljes épületegyüttesét mértem fel. A kiválasztott épületegyüttes igen tagolt, magassági értelemben is jelentős kiterjedéssel rendelkezik (13. ábra).



10. ábra. Máriabesnyői Bazilika és kolostor madártávlati látképe

A vizsgálat fő célja, hogy a kidolgozott eljárás durva hibákra való érzékenységét megmutassa, illetve a földi fotogrammetriai mérések WebDLT-vel történő feldolgozása során elérhető pontosságra mérőszámot adjon.

### 3.3.2.1. Hálózattervezés

A pontossági vizsgálat eredményét jelentősen befolyásolja a hálózattervezés minősége, éppen ezért komoly gondot fordítottam a fényképezés körülményeinek megtervezésére és az illesztőpontok meghatározására (Barsi és Mélykúti, 1999).

A fényképezéshez egy Leica Digilux 3 digitális, tükörreflexes kamerát használtam (11. ábra). A kiválasztás során fontos szempont volt, hogy kereskedelmi forgalomban kapható kamera legyen, de a kamera hibái csak minimálisan befolyásolják az elérhető pontosságot. A választott kamera 7,4 Megapixeles, CMOS érzékelővel ellátott, 5,6  $\mu\text{m}$  pixelméretű tükörreflexes fényképezőgép, az objektív Leica D 14 - 50 mm ASPH (F2,8 - F3,5). A fényképezés során, bár rögzítettem a nyers (raw) képeket is, mégis a JPG formátumba tömörített és tárolt állományokat használtam, hogy a pontossági vizsgálat ne tartalmazzon olyan körülményt, mely bármely digitális kamerát kizárna. A képeket 3136×2352 px képmérettel, 24 bit-es színmélységgel és RGB színskálán rögzítettem.

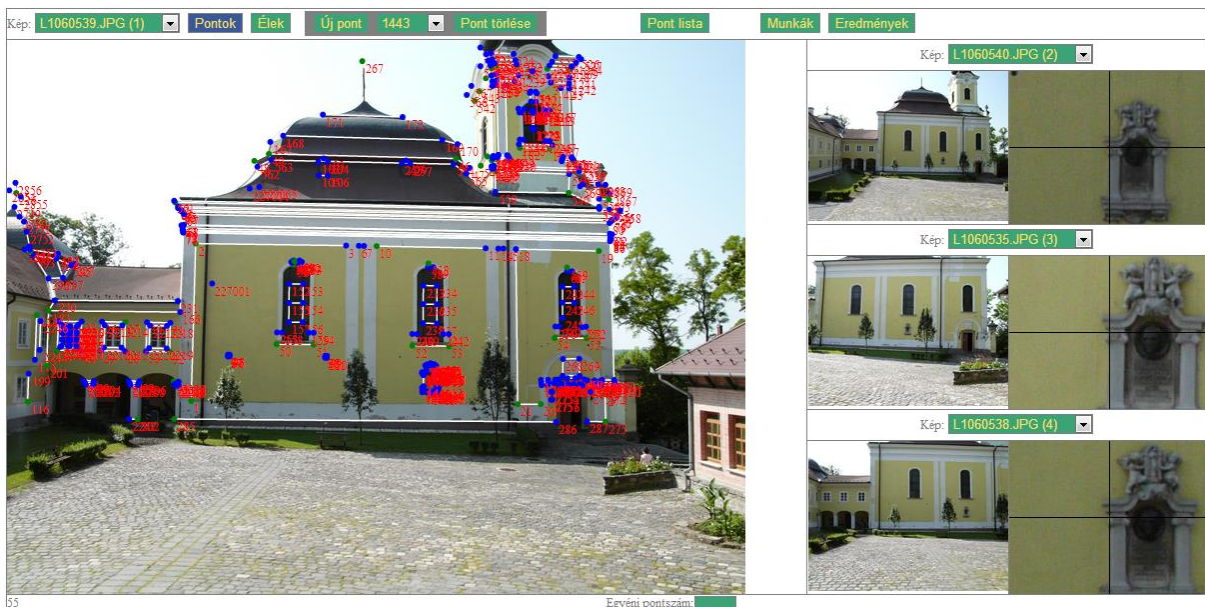


11. ábra. Leica Digilux 3 fényképezőgép

Az illesztőpontok meghatározását geodéziai mérések segítségével végeztem el, a területen sokszögvonala vezetésevel helyi hálózatot alakítottam ki. A kiegyenlített hálózat alappontjait használva, Topcon GPT-8203M műszer segítségével határoztam meg az illesztőpontok

koordinátáit. A mérés során kihasználtam a műszer prizma nélküli, úgynevezett direktreflexes távmérőjét, mellyel lehetővé vált nem megközelíthető pontok bemérése is. Itt kell megemlíteni a nagy magassági szögek, illetve a bádoggal felületekről rosszul visszaverődő jel okozta hibákat, melyek az illesztőpontok pontosságát befolyásolták.

Összesen 600 illesztőpontot határoztam meg (12. ábra), melyek az épület tagoltabb részein, illetve a tetőszerkezeten sűrűbben helyezkednek el. A számításban végül 150 képet használtam fel, a nagyobb pontosság és robusztusság érdekében ügyelve arra, hogy minden képen legalább 9 illesztőpont legyen látható, illetve a meghatározandó pontok legalább 5 képen szerepeljenek. A feldolgozás során a Huber-küszöbszámnak a 3 pixeles értéket vettem fel, tehát azon pontok mérései, amelyeknél három pixelnél nagyobb képpozíció-javítás szükséges, durva hibás mérésnek minősültek.



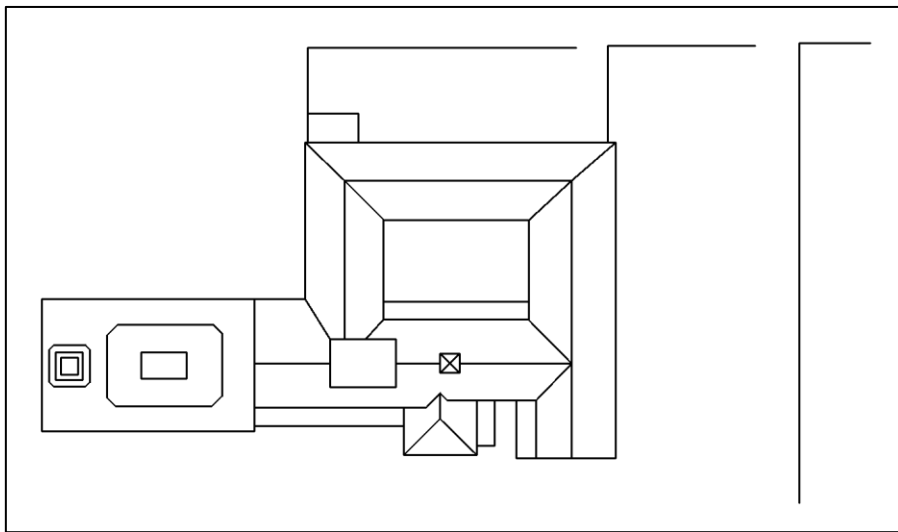
12. ábra. Kézi képpozíció-mérés eredménye a WebDLT rendszerben

### 3.3.2.2. Minősítés

A WebDLT segítségével elvégzett pontazonosítás művelete után elvégeztem a számításokat. Először az összes illesztőpontot felhasználva hajtottam végre a kiegyenlítést Huber-módszer segítségével, illetve anélkül. Ennek célja, hogy egyrészt a Huber-módszer hatékonyságát vizsgálhassam, másrészt a kiegyenlített mérések középhibája alapján az eljárást minősíteni tudjam. Ezt követően a geodéziai úton meghatározott pontok 90%-át felhasználva végeztem el a kiegyenlítést, a fennmaradó 60 pont segítségével a számított pontok és a valósak

feltételezett pontok közti különbségek kiszámításával a mérés pontossága meghatározhatóvá vált (Molnár, 2010c).

A mérések feldolgozása közben több, bádogtetőre történt geodéziai mérés hibásnak bizonyult. A lézertáv mérési technológia határait ismerve már a pontok meghatározásakor próbáltam ezen hibáknak – például a templomtorony több irányból való megméréseivel – kiküszöbölését megoldani, az ennek ellenére hibás illesztőpontokra pótméréseket végeztem, majd a számítást ismételtelen elvégeztem. Az épületegyüttes tagoltsága (13. ábra) szintén nehézséget jelentett, és a pontosságra is befolyással volt.



**13. ábra. Épületegyüttes sematikus alaprajza**

A 3000 mérendő pont legkisebb négyzetes kiegyenlítését követően az átlagos középhiba 13 mm-re adódott, míg a maximális érték 70 mm volt. Ezek az eredmények meghaladják a homlokzatmérések esetén építészek által megkövetelt 1 centiméteres pontosságot. Huber-módszerrel kiegészített kiegyenlítés után a durva hibák hatása jelentősen csökkent, így az átlagos középhiba 3 mm-es értéket mutat, míg a maximális középhiba értéke 50 mm. A kiegyenlítés során alacsony súllyal rendelkező mérések tehát durva hibával terheltek. A 28 durva hibával terhelt képpont elemzését követően sikerült több koordinátamérés során vétett személyi hibát javítani. A fennmaradó durva hibával terhelt mérések elemzése során megállapítható, hogy azok rossz metszési viszonyokkal rendelkeznek, és kevés képen azonosíthatóak. A Huber-módszerrel kiegészített legkisebb négyzetek módszere tehát megfelelően kiszűrte a durva hibás méréseket, csökkentette az emberi hibák hatását. Az eljárás nagy előnye, hogy ezen a nagy elemszámú mintán emberi beavatkozás nélkül azonosította a durva hibákat.

A számítás során az illesztőpontok koordinátáit újra meghatározva és azokat az eredeti koordinátákkal összehasonlítva átlagosan 3 mm-es eltérést tapasztaltam, a legnagyobb eltérés 160 mm-nek adódott. A kritikus pontok beazonosítása során kiderült, hogy azok a templom tetőszerkezetén, illetve a süvegen találhatóak, bádoggal felületen. Ilyen körülmények között a geodéziai mérés megbízhatósága technikai okokból – a mérőjel beesési szöge és a felület visszaverő képessége miatt – igen kérdéses, annak hibája ellenőrző mérések során bizonyítottá vált. Pótméréseket végezve, az illesztőpontok javított koordinátáit felhasználva újra elvégeztem a számítást. Fontos megjegyezni, hogy bár az illesztőpont-meghatározás több esetben pontatlan, a magasan elhelyezkedő illesztőpontok felhasználása mégis igen fontos a képek tájékozásának nagyobb stabilitása érdekében. Ebből adódóan megállapítható, hogy bizonyos esetekben az illesztőpontok tárgyoldali koordinátáit is hibával terhelt mérésnek kell kezelni.

A 3000 pont térbeli koordinátáinak meghatározása összesen 4 percet vett igénybe (Virtuális szerver, 2x2,4 GHz CPU, 2 GB RAM), összehasonlításképpen elmondható, hogy a Photomodeller kereskedelmi program segítségével egy 100 pontból álló modell számítása akár 10 percet is igénybe vehet hasonló számítási teljesítmény mellett.

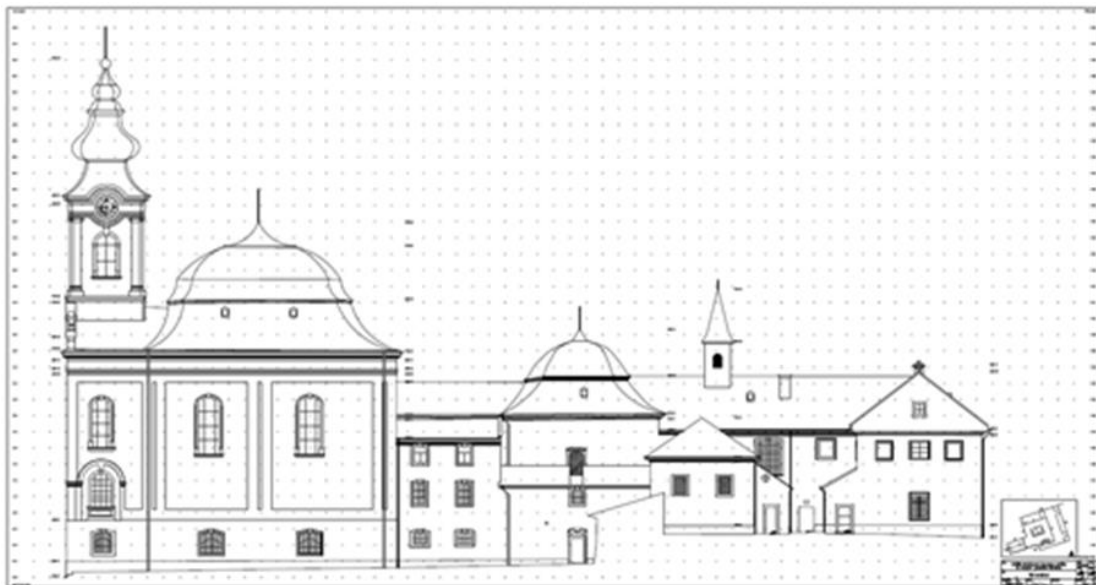
Második lépésben az illesztőpontok 1%-át minősítésre használtam fel. A fel nem használt illesztőpontok koordinátáit a WebDLT segítségével számítottam ki, azok koordinátáit a geodéziai úton felmért pontokkal összehasonlítva határoztam meg a számítás pontosságát. A minősítésre használt pontok geodéziai úton meghatározott koordinátáit ismételt mérésekkel, több álláspont alapján számítottam ki, így azok hibái minimálisnak tekinthetőek. A körülbelül 60 pont alapján végzett minősítés átlagosan 4 mm-es hibát adott, míg a maximális érték 6 mm-nek adódott (4. táblázat). Ugyanezen mérések Huber-módszer nélkül történő kiegyenlítése esetén átlagosan 10 mm-es volt a hiba, a maximális érték 23 mm-nek adódott.

A geodéziai és a fotogrammetriai úton meghatározott pontok összesen 35 esetben adtak 5 mm-nél nagyobb eltérést,  $X$  irányban 25,  $Y$  irányban 30,  $Z$  irányban 7 pont esetén. A  $Z$  irány nagyobb megbízhatósága magyarázható azzal, hogy ez az irány a képsíkokkal mindig közel párhuzamos, míg esetenként a kameratengely közel párhuzamos lehet az  $X$ - vagy  $Y$  tengellyel.

4. táblázat. A 3D rekonstrukció eredményei

| Vizsgálatok                                       | Eredmények                               |
|---|--|
| Ismeretlen pontok átlagos középhibája             | 3 mm                                     |
| Ismeretlen pontok maximális középhibája           | 50 mm (rossz metszészviszonyok)          |
| Illesztőpontok újraszámításának átlagos hibája    | 3 mm                                     |
| Illesztőpontok újraszámításának maximális hibája  | 160 mm (hibás illesztőpont-meghatározás) |
| Ellenőrző pontok átlagos eltérése                 | 4 mm                                     |
| Ellenőrző pontok maximális eltérése               | 6 mm                                     |
| Durva hibásnak ítélt mérések száma (600 mérésből) | 28                                       |

A képkoordináta-mérés során 150 képen 16 000 pont került beazonosításra. A felhasznált illesztőpontok száma 600, összesen 28 darab durva hibával terhelt mérés került kiszűrésre a Huber-módszer segítségével. Mind a kiegyenlítés utáni középhibák, mind a geodéziai módszerrel bemért pontok koordinátáitól való eltérések alapján kijelenthető, hogy a WebDLT-ben alkalmazott fotogrammetriai algoritmus az építészeti igényeknek megfelelő számítási eljárásnak és alkalmazásnak bizonyult (14. ábra).



14. ábra. Fotogrammetriai mérések alapján készített homlokzatrajz

A WebDLT alkalmazás segítségével elérhetővé vált egy alacsony költségű, térbeli rekonstrukciót lehetővé tevő fotogrammetriai mérőrendszer. A fotogrammetriai rendszer segítségével megoldható a képernyő-digitalizálás pixel alatti pontossággal. A térbeli rekonstrukciót Direkt Lineáris Transzformáció segítségével hajtja végre, míg a normálegyenleteket legkisebb négyzetek módszerével oldja meg. A becslés robusztusságát a Huber-módszer biztosítja, így az automatikus rekonstrukció nagyobb biztonsággal hajtható végre akár tapasztalatlanabb felhasználók esetén is.

## 4. Raszteres térmodellezés

A digitális fotogrammetria az elsődleges eredményeit diszkrét pontokban adja vissza, melyek a végtermék előállításához további feldolgozást igényelnek. A lézerszkennerek ugyancsak pontszerű eredményt szolgáltatnak azzal a különbséggel, hogy a látómezőt egy lézernyalábbal tapogatják le úgy, hogy – a szkennerek nullpontjából nézve – szabályos szöghálózatban (raszter) elhelyezkedő térbeli pontfelhőt adnak eredményül. Az így kapott pontfelhő azonban nagy elemszáma miatt nem alkalmas a közvetlen modellezésre, annak jelentős szűrése és a pontok osztályozása szükséges. A feldolgozás során a mérnöki modellezésben nagy jelentőséget kapnak a különböző felület- és térfogatelem-illesztő algoritmusok.

### 4.1. A lézerszkennerek

A lézerszkennerek (Light Detection And Ranging – LiDAR) a mérendő objektumról magas mintavételezési frekvenciával nagy elemszámú pontfelhőt képeznek le. Ehhez különböző karakterisztikájú lézer fénysugarat használnak fel, mely az objektumról való visszaverődését követően alkalmas távolság meghatározására, például a terjedési idő mérésével (Time of Flight – ToF). A távolságmérés történhet időmérés, fázismérés vagy elölmetszés segítségével (Vosselman és Maas, 2011; Lovas *et al.*, 2012), az alkalmazott megoldás függ a tárgy távolságtól és a pontossági igénytől. Az eljárás elnevezése is mutatja, hogy a mérendő felületet a fénysugár irányának változtatásával, pásztázva tapogatja le. A térbeli pontmeghatározás polárkoordináták segítségével történik, így a lézertáv mérés adatai mellé szükséges a pillanatnyi mérési irány rögzítése is. A lézerszkennerek megjelenése az 1990-es évekre tehető (Shan és Tóth, 2008), azóta jelentős fejlődésen mentek keresztül. Négy fő felhasználási irányuk létezik:

- a műholdas lézerszkennelés (Satellite Laser Scanning): a távolságmeghatározás időmérés elvével történik,
- a légi lézerszkennelés (Airborne Laser Scanning – ALS): az általában 1-2 km-es távolság meghatározása jellemzően időméréssel történik,
- a földi lézerszkennelés (Terrestrial Laser Scanning – TLS): a 2-6 000 m-es távolság meghatározás idő- vagy fázismérési elven történik (15. ábra),

- tárgyszkenelés: a jellemzően 0,1-5 m közötti távolság meghatározása általában előmetszéssel történik,
- mobil lézerszkennelés (Mobile Laser Scanning – MLS): mozgó platformról történő mérés, jellemzően a földi lézerszkennelés műszereit használják.

A lézereknek hullámhossz tekintetében igen széles skálája érhető el (0,2-30  $\mu\text{m}$ ), léteznek látható tartományban működő szkennerek, a lézerszkennelésben alkalmazott műszerek jellemzően 0,5-1,5  $\mu\text{m}$  tartományú lézerfényt használnak.



15. ábra. Földi lézerszkennerek: Faro Focus 3D (balra), Riegl VZ-1000 (jobbra)

A lézer jól alkalmazható tárgyak mérésére azok közvetlen érintése nélkül (távérzékelés), mindez a fény terjedési sebességének köszönhetően gyorsan és nagy mintavételezési frekvenciával valósítható meg. Napjainkban a földi lézerszkennerek jelentős része kiegészül színes képalkotással, melynek segítségével a pontfelhő a valóságnak megfelelően színeztető.

#### 4.2. Pontfelhő-feldolgozás

A lézerszkennerek által szolgáltatott nagy adatmennyiség igen látványos már közvetlenül a mérés befejezte után, azonban jelentős utófeldolgozásra van szükség a tényleges modell elkészítéséhez. Ez egyrészt köszönhető a felmérés jellegének, mégpedig hogy a pontmérés előre meghatározott raszterban (vízszintes és magassági szögek szerinti szabályos rácsban) történik és nem a ténylegesen mérendő tér pontjainak egyenkénti megirányzásával. A jellemző pontok, élek és görbék szerkesztése általában valamilyen geometriai primitív – egyenes, görbe, kör, sík, gömb, henger stb. – illesztésével, így a primitívek geometriai

jellemzőinek megadásával oldható meg. További nehézséget jelentenek a lézerszkennerek által mért téves és felesleges pontok. A felmérés tartalmazhat olyan részeket, melyekről nem szükséges információt szolgáltatni, vagy egyszerűen valamilyen tárgy optikai kitakarást eredményezett, mint például egy átrepülő madár vagy a szálló por, de ugyanígy téves mérést eredményezhet a tükröződő felület, mely az állományban szellemképet okozhat. További problémát jelentenek a többutas terjedés következtében téves távolságban meghatározott pontok; ezen pontok szűrését is el kell végezni. Összességében kijelenthető, hogy a lézerszkennerekkel történő adatnyerés igen gyors, azonban utófeldolgozást igényelő eljárás. A mérés a beállítások elvégzését követően teljesen automatikus, általában a műszer működési elvei és algoritmusai a felhasználó számára részleteiben nem ismertek.

A lézerszkenneléshez köthető kutatások éppen ezért napjainkban túllépve a térbeli adatnyerés problémakörén jellemzően a pontfelhő automatikus vagy félautomatikus feldolgozására irányulnak, ideértve a szegmentálást, az osztályozást, a szűrést és az illesztési feladatokat. A visszaverődő jel intenzitásérték-változás függvényét teljes hullámalakjának (full waveform) rögzítését lehetővé tevő műszerek – a mérési adatok kiegészítésével és új információk nyújtásával – segítik a szűrés, feldolgozás és osztályozás folyamatát (Hartzell *et al.*, 2013; Laky *et al.*, 2012).

#### **4.2.1. Szűrés, tisztítás**

A műszerek látómezője (Field of View, FOV) általában korlátozott, de a mérendő terület a legtöbb esetben kisebb, mint a látómező. Éppen ezért a szkennerek a mérés megkezdése előtt az ablakolás (maszkolás) módszerével ki lehet jelölni a mérendő területet. Ez a mérési idő csökkentése és a felesleges adatmennyiség minimalizálása tekintetében is nagy előnyt jelent. Mindennek ellenére mindig marad olyan részlet a kijelölt területen, amire nincs szükség a modellezés folyamatában. Ezeket a területeket szűréssel el kell távolítani az utófeldolgozás során (Vosselman és Mass, 2010; Lovas *et al.*, 2012; Rehány, 2013). Ugyanígy szükséges a keletkezett téves pontok eltávolítása is, illetve a tükröződő felületekről (üveg, fém) téves helyre leképezett vagy szóródott pontok eltávolítása. Tárgyszkenelés esetén fontos lehet a tárgyat tartó vagy befogó objektumokról leképződött pontok eltávolítása a pontfelhőből.

Ez a feladatrész nehezen oldható meg emberi beavatkozás nélkül, hiszen az objektumdetektálás lépése még nem történt meg. Ha a feladat kellően specifikált –

futószalagon történő gyártásminősítés vagy például kizárólag gömbök mérése – akkor a feladat automatizálható, egyéb esetekben csak kézi kijelöléssel oldható meg.

#### **4.2.2. Objektumdetektálás**

A modellalkotáshoz szükséges a pontfelhő értelmezése. A pontokat anyaguk, színük vagy egyéb tulajdonságuk alapján csoportokba rendezzük, osztályozzuk. Ezt megtehetjük a visszatérő jel intenzitásértéke, teljes hullámalakja, esetleg a szkennerek képalkotó szenzorából nyert szín alapján. A pontok tulajdonságainak külön-külön kezelése mellett fontos információ tartalommal rendelkezik a pontok egymáshoz viszonyított elhelyezkedése, topológiája (Vosselman *et al.*, 2004). Megfelelő algoritmus segítségével például a síkfelületek automatikusan azonosíthatóak a pontfelhőben. Ez azért különösen fontos, mert síkok metszéspontjának szerkesztésével meg lehet határozni például épületek – a szkennerek által közvetlenül nem mért – jellemző pontjait, éleit, törésvonalait is. A nagy elemszámú pontfelhőre történő illesztések további előnye, hogy a mérési zaj statisztikai úton eltávolítható a mérésből, amennyiben az normális eloszlást követ, így a pontonkénti mérési pontosságnál statisztikai úton nagyobb pontosság érhető el (Khoshelham, 2011).

Az objektumdetektálás tényleges végrehajtását általában megelőzi egy fontos lépés: a pontfelhő lefedése szabálytalan háromszöghálózattal (Triangulated Irregular Network – TIN) (Delaunay, 1934; Vosselman és Maas, 2011). A háromszöghálózat kialakítása történhet többek között a háromszögek területeinek minimalizálásával (Axelsson, 2000) vagy a normálisok irányainak egymástól való eltérései minimalizálásával (Kitamura, 2012). A választott megoldás függ a modellezendő objektum jellegétől is. Légi lézerszkennelések esetén általában felszín- és domborzatmodelleket hoznak létre (egyértékű függvények), míg kisméretű tárgyaknál lehetnek jelentős bemélyedések (konkáv felületek), akár visszaforduló részek is a felületen (többértékű függvények). A háromszögmodell magában hordozza a topológiai viszonyokat is, ezt gyakran az illesztési algoritmusok is felhasználják, mivel meghatározható az egymás mellett lévő felületrészek görbülete vagy annak hiánya is.

Az objektumdetektálás további előnye, hogy az állomány mérete csökkenthető, ha az illesztésbe bevont pontokat és felületeket a rájuk illesztett alakzattal helyettesítjük.

#### 4.2.2.1. Geometriai primitívek illesztése

A mérendő objektumok automatikus feldolgozása napjainkban geometriai primitívek illesztésén alapul. Az illesztések két fő lépést hajtanak végre:

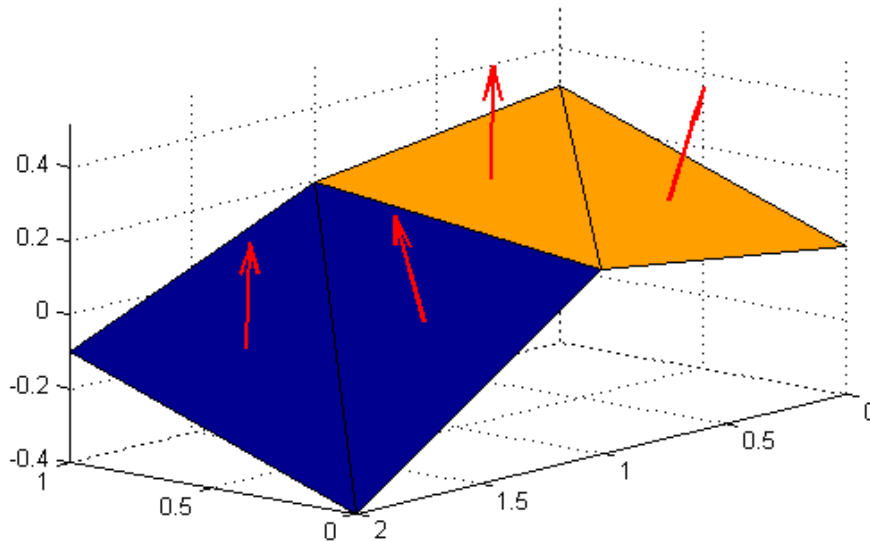
- az illesztésbe bevont pontok leválogatása: ez gyakran nehezen automatizálható feladat, különösen összetett felületeknél vagy zajos mérési eredmények esetén (Boulaassal *et al.*, 2011).
- a leválogatott pontfelhőre megadott célfüggvény alapján történő görbe vagy felület illesztése (paramétereinek meghatározása): ez általában jól automatizálható feladat, csupán az illesztendő felület morfológiájának ismerete szükséges (Rabbani, 2006).

Az illesztendő függvények lehetnek egyenesek, síkbeli alakzatokat – például görbe, kör, sík –, illetve térbeli objektumokat – például gömb, henger, téglatest – leíró formulák (Lukács *et al.*, 1998). A körök illesztése általában egy sík megadásával történik (Király *et al.*, 2007), tehát kétdimenziós illesztési feladatra vezethetőek vissza (Atherton és Kerbyson, 1999), melynek részletes tárgyalására jelen disszertáció nem tér ki.

Az illesztésbe bevonandó pontok leválogatása többek között ezen a két módon történhet: egyrészt a pontok összességének kézi megadásával, másrészt az illesztendő felület közelítő megadásával – kör esetén például 3 pont kijelölése – és egy tűrési határ beállításával. Az illesztések pontosságát befolyásolja az eredeti mérést terhelő zaj, a pontsűrűség, az illesztésbe bevont pontok száma és az illesztés célfüggvénye. A célfüggvény helyes megválasztása igen nagy szerepet játszik a végeredmény pontosságában, mindazonáltal a számítás alacsony időigénye szintén komoly elvárás a többlépcsős feldolgozás során. Az illesztések általában igen nagy, sokszor több milliós elemszámú mintára történnek, melynek hatékony számítására napjainkban gyakran használják a grafikus processzort a számítógép központi processzora helyett (Hu *et al.*, 2013).

#### 4.2.2.2. Síkillesztés

Síkillesztések esetén a szomszédsági viszonyok igen fontosak, ezért általában a szegmentáló algoritmusok ezek meghatározását végzik el első lépésként (Lari *et al.*, 2011). A pontfelhőre alkalmazott háromszögmodell segítségével számítható a pontok normálisa (Kitamura *et al.*, 2012). Amennyiben a normálisok eltérése nem halad meg egy küszöbértéket, a pontok egy síkban lévőnek tekinthetők (16. ábra és 17. ábra).



16. ábra. Pontok alapján számított felületi normális



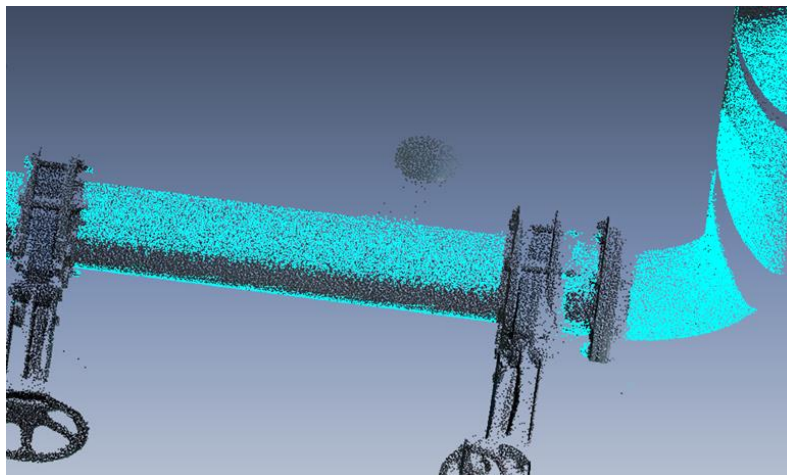
17. ábra. 3D pontfelhő (bal felül), színes kép (jobb felül), szegmentált síkok (alul) (Lari *et al.*, 2011)

A határoló pontok leválogatására Wang és Shan ad megoldást (Wang és Shan, 2009), mely a korábban bemutatott eljárásokon kívül természetesen történhet kézi kijelöléssel is. A síkillesztésbe bevonandó pontok leválogatását követően valamilyen optimalizáció segítségével történik az illesztés. Legtöbbször a síktól való eltérés minimalizálását végzik  $L_2$  norma szerint (legkisebb négyzetek módszere), de létezik főkomponens-elemzésen (Principal Component Analysis – PCA) alapuló megoldás is (Khoshelham, 2011). Ahogy azt a legkisebb négyzetek módszere esetén is hagyományosan feltételezzük, a főkomponens-elemzés is feltételezi a normális eloszlást (Barsi *et al.*, 2011).

#### 4.2.2.3. Hengerillesztés

Az ipari területek felmérésében nagy segítséget jelenthet a lézerszkennelés, éppen ezért az ilyen jellegű alkalmazásokra kiemelten fókuszál a műszer- és szoftverfejlesztés. Az ipari létesítményekben futó csőhálózatok felmérése mind hagyományos geodéziai felméréssel, mind fotogrammetriai módszerekkel igen nehézkes. A lézerszkennelést készített pontfelhők nagy részletességgel képezik le a csőrendszereket, így az apró irány- és méretváltozásokról, az idomok típusáról is kinyerhető információ. A pontfelhőre történő henger (cső) illesztése tehát fontos feladat a lézerszkennelési utómunkálatok során.

Az illesztésbe bevonandó pontok szegmentálása a csőillesztés esetén is a szomszédságok és a normálisok meghatározásával oldható meg (Kawashima *et al.*, 2011). A henger paramétereinek meghatározása történhet RANSAC (RANdom SAmple Consensus) algoritmus segítségével, mely nagy elemszám – ezért jelentős fölősméréshányad – esetén használható iterációs robusztus eljárás (Fischler és Bolles, 1981). A RANSAC a minta elemeinek csak egy bizonyos hányadát használja az előzetes értékek felvételére, ezen kívül a durva hibákra való érzéketlensége miatt nagyon jól használható különböző illesztési eljárások során (Schnabel *et al.*, 2007). Henger illesztésénél a henger geometriai egyenletéből lehet kiindulni; csövek esetén az illesztő algoritmusokat gyakran kiegészítik a csatlakozások, illetve elágazások vizsgálatával (18. ábra). Ipari területen történő méréskor felhasználható a keresés és illesztés során kezdeti információként a megépítéshez használt terv (Bey *et al.*, 2011).

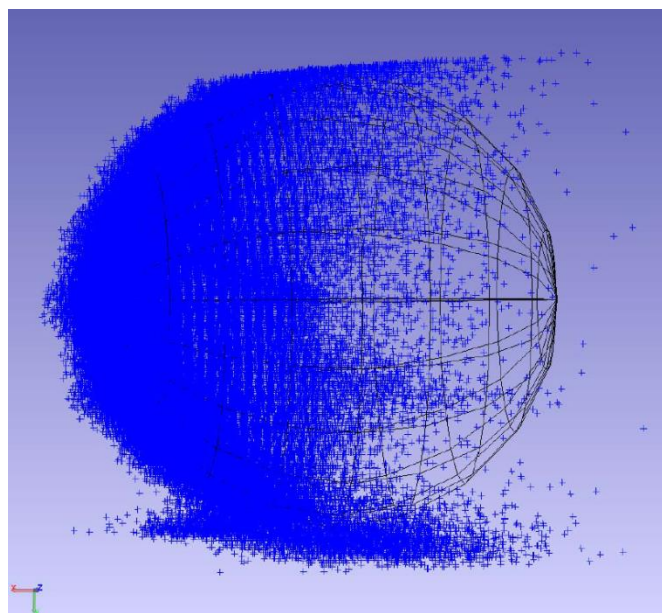


18. ábra. Csövek szegmentálása és illesztése (Rehány, 2013).

Nem csak ipari alkalmazások esetén mutatkozik igény hengerillesztésre, erdészeti lézerszkenneres mérések esetén különleges feladat a fatörzsekre való kör- és hengerillesztés. Mivel az eredeti felület jelentősen eltér a szabályos hengertől, a modellezés folyamata némi általánosítást követel meg (Király *et al.*, 2007, Brolly és Király, 2011).

#### 4.2.2.4. Gömbillesztés

Gömbök illesztése esetén (19. ábra) a szegmentálás általában egyszerű feladat, hiszen minden irányban szimmetrikus és korlátos felületről van szó. Ez a felületi normálisok vizsgálata esetén azt jelenti, hogy néhány szomszédos pont alapján megállapítható a közelítő görbület, amelyből a gömb kiterjedése is becsülhető, így az illesztéshez használandó pontok halmaza könnyen leválogatható. Az illesztés ez esetben is történhet a normálisok főkomponens-transzformációjával (Principal Component Transformation – PCT), de geometriai úton is, a gömb egyenletének felhasználásával és a méréseket terhelő hibák valamely optimalizációs eljárás alapján történő javításával. A RANSAC algoritmust különböző célfüggvényekkel igen elterjedten alkalmazzák gömbillesztés esetén is (Rabbani és van den Heuvel, 2005).

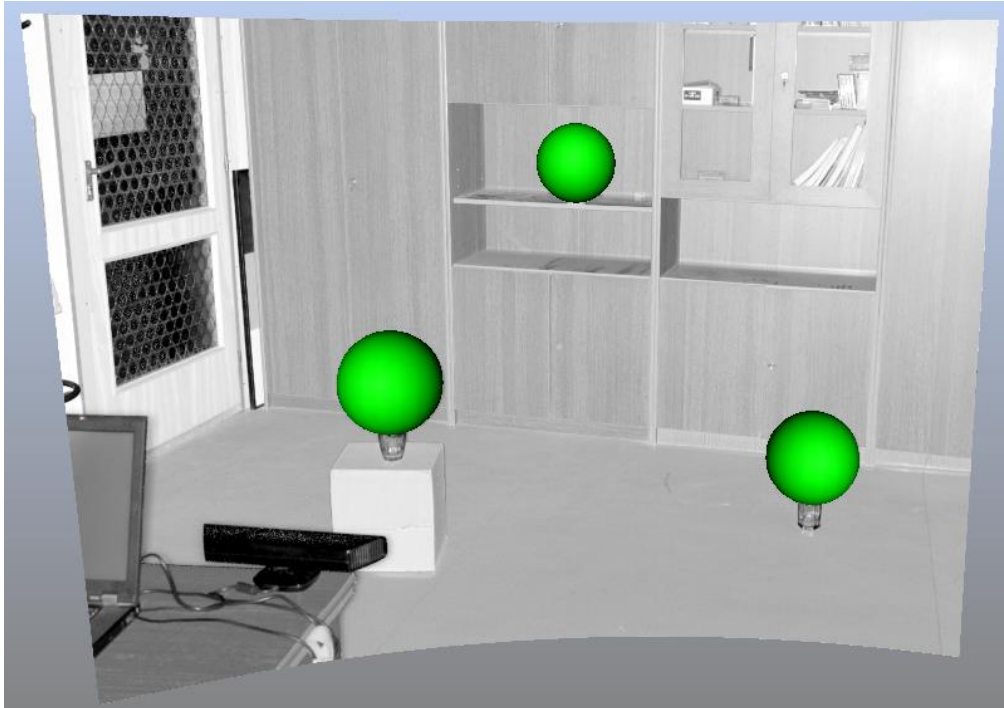


19. ábra. Jelentős hibával terhelt pontfelhő (Witzgall *et al.*, 2006)

A gömbillesztő algoritmusok nagyon hasonlatosak a síkbeli körillesztő eljárásokban alkalmazottakhoz, melynek szakirodalma igen bőséges (Bookstein, 1979; Rabbani, 2006).

Ahogy a fotogrammetriában általában, a gömb szimmetrikus mivolta miatt a pontfelhőfeldolgozás során is igen jól használható illesztőpontként (20. ábra), ezért az illesztés

pontossága különös jelentőséggel bír. Az illesztés történhet több különböző álláspontból készített pontfelhő között (kölsönös tájékozás) vagy a terepi koordináta-rendszer és a szkener koordináta-rendszer között (abszolút tájékozás).



20. ábra. Gömb illesztés beltéri lézerszkennelt pontfelhőre, illesztőpont-meghatározás céljából

A gömbillesztésekhez definiálni kell egy geometriai modellt, melyhez képest a pontfelhő pontonkénti eltérését határozhatjuk meg (Witzgall *et al.*, 2006):

$$\Delta_i = \text{diff}((x_i, y_i, z_i), \text{modell}) \quad (21)$$

ahol  $\Delta_i$  a pontonkénti eltérés,

$x_i, y_i, z_i$  a pontfelhő egy pontjának koordinátái,

*modell* a valós felület.

Az így kapott eltérésvektorok optimalizálását (minimalizálását) többek között a 2.3. fejezetben bemutatott normák szerint végezhetjük el.

A legtöbb esetben a gömb egyenletét tekintjük geometriai modellnek (Lukács *et al.*, 1998):

$$r = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2}, \quad (22)$$

ahol  $r$  a gömb sugara,

$x_0, y_0, z_0$  a gömb középpontja,

$x_i, y_i, z_i$  a gömb egy pontja,

így a  $\rho$  célfüggvény  $L_2$  norma szerint (Shakarji, 1998):

$$\rho = \sum_i \left[ \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - r \right]^2. \quad (23)$$

A minimalizálás normál egyenletek megoldását jelenti, amely a linearizálást követően többek között Gauss-eliminációval (Detrekői, 1991), Gauss–Newton-algoritmussal (Veress, 2007) vagy Levenberg–Marquardt-algoritmussal (Chernov és Lesort, 2005) történhet. A minimumkeresés konvergenciája elméletben nem mindig biztosított, de a gyakorlatban ez nem jelent problémát, egyrészt a nagy elemszám miatt, másrészt mert a paraméterek előzetes értékei is jól becsülhetőek (Detrekői, 1991). A paraméterbecslések során alkalmazott kezdőértékek helyes megválasztása fontos feltétele a konvergenciának és a globális szélsőérték-keresés sikerességének, ezen kívül az iterációk számára is kedvező hatással van, így az algoritmus hatékonysága növelhető. Ezen megfontolásból Gander az illesztés első lépéseként a pontok lineáris képlettel számítható algebrai távolsága alapján végez becslést a geometriai távolság négyzetes alakja helyett (Gander *et al.*, 1994).

Az  $L_\infty$  norma szerinti illesztés részleteit Gass, Witzgall és Harray fejtik ki tanulmányukban (Gass *et al.*, 1998).

#### 4.2.3. Pontfelhő-összekapcsolás

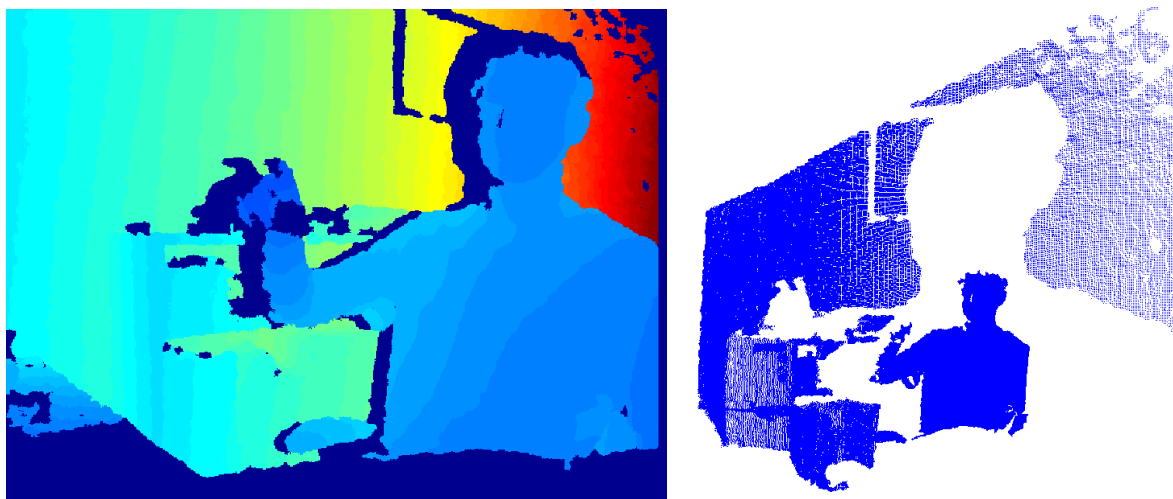
A mérendő objektumok teljes modellezéséhez az optikai kitakarás miatt általában nem elég egy álláspontból elvégezni az adatgyűjtést. Ezért a különböző adatsorok egymáshoz illesztését kell végrehajtani, gyakran egy külső referenciarendszerben. Az összekapcsolás (regisztráció, transzformáció) történhet illesztőpontok és kapcsolópontok (műszergyártótól függően több elnevezés és megvalósítás használatos: gömbök, jeltárcsák, bélyegek, target, marker, reflektor) segítségével. A földi lézerszkennerek esetén általában lehetőség van az összekapcsolást segítő pontok nagyobb felbontással és pontossággal történő mérésére, ezzel

is segítve az illesztés precízebb végrehajtását. A szükséges illesztőpontok száma a transzformáció szabadságfokától függ.

A nagy elemszámú pontfelhők esetén jól alkalmazható illesztési eljárás a felületi normálisok alapján történő regisztráció, mely történhet teljesen automatikusan vagy néhány pontpár, mint kezdőérték kézi megadásával. Az ICP (Iterative Closest Point – iteratív legközelebbi pont) igen hatékony algoritmus (Besl *et al.*, 1992), ezért valós idejű feldolgozásban főként ezt, illetve ennek kézzel megadott kapcsolópont nélküli változatait (Rusinkiewicz, 2001) használják illesztésekre (Kang, 2008). Az eljárás nagy előnye, hogy a két jelentős átfedéssel bíró pontfelhő közötti transzformációt képes elvégezni a pontfelhők közötti pontpárok keresésével. A számítás iterációk során minimalizálja a pontpárok távolságkülönbségét. Az eljárás hatékonyságát jelentősen rontja a pontfelhők közötti nagy elmozdulás vagy forgatási szög (Guo *et al.*, 2012), ezért ilyen esetekben gyakran RANSAC algoritmus segítségével határozzák meg a transzformációs paraméterek kezdőértékét. Az ICP algoritmus módosított változata lehetőséget biztosít a pont-felület távolságok minimalizálására is (Chen és Medioni, 1992).

### **4.3. A mélységkamerák**

A lézerszkennerekkel ellentétben a mélységkamerák (Flash LiDAR, Range Camera, Depth Camera, ToF Camera, 3D camera) nem pásztázó letapogatást végeznek, hanem a pillanatnyi látómezőről készítenek egy távolságképet (Oggier *et al.*, 2003; Markiel *et al.*, 2008). Ehhez (jellemzően infravörös) fényimpulzust bocsátanak ki, majd a visszaverődő jel mátrixérzékelőn történő rögzítésével adják meg képpontonként a távolságot (Lange, 2000). Az angol kifejezésben szereplő Flash (villanás) szó – a fényképezőgépeknél a vakuhoz hasonlóan – a teljes látómezőt beborító fényre, villanásra utal. A mélységképen rögzítésre kerülnek a visszaverődő fény alapján a képpontonkénti távolságok kameratengely irányú komponensei. A mélységképek kiértékelhetőek a fotogrammetria klasszikus eljárásaival is, de érdemes felhasználni a távolságok nyújtotta többletinformációt. A mélységadatok és pixelkoordináták merőleges térbeli koordinátarendszerbe való átszámításával előállítható a látómezőről leképezett pontfelhő (21. ábra). Távolságadatok mérésére a mélységkamerák jellemzően két megoldást alkalmaznak: jelterjedési (utazási) idő (ToF) mérése, illetve előmetszés (parallaxismérés). Jellemzően a mélységkamerák nem látható fénytartományban működnek, és másodpercenként 10-90 felvételt készítenek a látómezőről (21. ábra).



21. ábra. A mélységkamera nyers képe (balra) és a levezetett pontfelhő (jobbra)

A technológia ugyan nem újdonság, de széleskörű alkalmazását mind ez ideig jelentősen akadályozta a kedvezőtlen jel-zaj viszony, a csekély hatótávolság és a beruházási költség. Mostanra azonban előtérbe kerültek a számítástechnikában és a játékiparban az emberi mozgás és gesztus felismerésén alapuló alkalmazások, melynek köszönhetően komoly előrelépések tapasztalhatóak felhasznált eszközök költséghatékonysága és pontossága terén. Néhány piacon elérhető mélységkamera jellemzőit az 5. táblázat tartalmazza (Ye és Bruch, 2010; Deyle, 2010; Artec, 2013; Mesa, 2013).

5. táblázat. Néhány mélységkamera jellemzője

|                                   | MS Kinect    | Artec Eva          | Asus Xtion | Mesa SwissRanger 4000 | PMD CamCube 2.0 | PMD PhotonICS |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------|-----------------------|-----------------|---------------|
| <b>Felbontás [pixel]</b>          | 640 × 480    | N.A.               | 640 × 480  | 176 × 144             | 204 × 204       | 160 × 120     |
| <b>Felvételi frekvencia [fps]</b> | 30 (15)      | 16                 | 30         | 54                    | 25              | 90            |
| <b>Hatótávolság [m]</b>           | 0,5-3,5 (10) | 0,4-1              | 0,8-3,5    | 5-8                   | 7               | 0-2           |
| <b>Mélységadatok tárolása</b>     | 11 bit       | N.A.               | 11 bit     | 16 bit                | N.A.            | N.A.          |
| <b>Látómező [°]</b>               | 43 × 57      | 21 × 30            | 45 × 58    | 34,6 × 43,6           | 40 × 40         | 90 × 68       |
| <b>Mérési módszer</b>             | előmetszés   | előmetszés         | előmetszés | időmérés              | időmérés        | időmérés      |
| <b>Színes kép</b>                 | +            | +                  | +          | -                     | -               | -             |
| <b>Hullámhossz [nm]</b>           | 828,6        | látható, nem lézer | 828,6      | 850                   | N.A.            | 850           |
| <b>Névleges pontosság [mm]</b>    | N.A.         | 0,1                | N.A.       | 4                     | N.A.            | N.A.          |
| <b>Ár</b>                         | \$100        | \$18500            | \$200      | \$9000                | \$12000         | N.A.          |

A sűrű mintavételezés megköveteli a gyors érzékelőkiolvasást – ez egyben indokolja is az érzékelők viszonylag kis geometriai felbontását – ezért általában CMOS (Complementary metal–oxide–semiconductor) szenzorok találhatóak a mélységkamerákban (Blais, 2004; Wikipedia – Image sensor, 2013). Több eszköz tartalmaz a mélységkamerán kívül egy színes kamerát is, mely a két kamera kölcsönös tájékozását (relatív tájékozás, regisztráció) követően lehetővé teszi valós időben színes pontfelhő előállítását. A kamerák kölcsönös tájékozásának megvalósítása több tudományos vizsgálat tárgyát képezi (Konolige és Mihelich, 2010). Az előmetszés elvét használó kamerákkal ellentétben a terjedési idő mérésén alapuló eszközök színekre érzékenyek, a jel változó intenzitásán túl téves távolságértéket adhatnak vissza (Chow *et al.*, 2012). Az elérhető pontosság általában függ a tárgy távolságtól, valamint a mélységképen való elhelyezkedéstől, ugyanis a képek sarkain jelentős torzítás figyelhető meg (Kahlman *et al.*, 2006). Fontos megjegyezni, hogy a közeli infravörös (NIR) tartományban működő eszközök kültéri (természetes fény melletti) használata korlátozott.

Az eszközök árában jelentős különbség figyelhető meg, melynek forrása egyrészt az eltérő geometriai pontosság, de jelentős tényező az évente legyártott darabszám is.

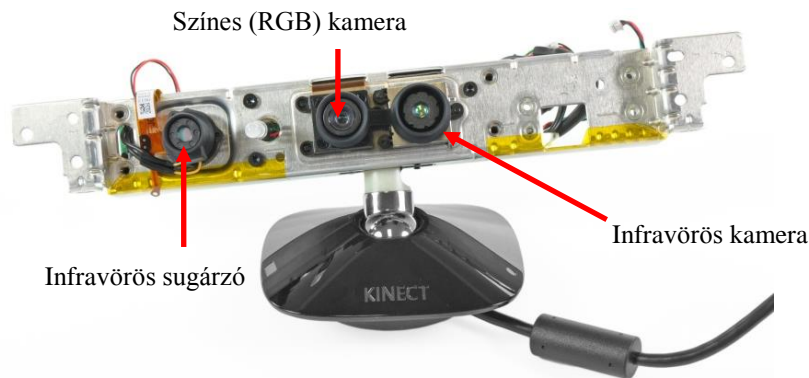
#### **4.3.1. Microsoft Kinect mélységkamera**

Az 5. táblázatban felsoroltak közül kedvező ára miatt kutatási szempontból is igen ígéretes szenzornak tűnik a Microsoft Kinect (Microsoft, 2010) (22. ábra). A Microsoft XBOX 360 játékkonzol kiegészítőjeként forgalmazott érzékelő a számítógépes játékok emberi mozgással történő irányítását teszi lehetővé. Az eszköz sikerességének kulcsa a tömeggyártás, így az ára is alacsonyan tartható. A szenzort eredetileg a PrimeSense (PrimeSense, 2013) cég fejlesztette, majd ennek jogait vásárolta meg a Microsoft. A Kinect azonban nemcsak játék irányítására használható, hanem egy számítógéphez csatlakoztatva, teljes értékű mélységkameraként (Khoshelham, 2011; Wikipedia – Kinect, 2013) működhet.



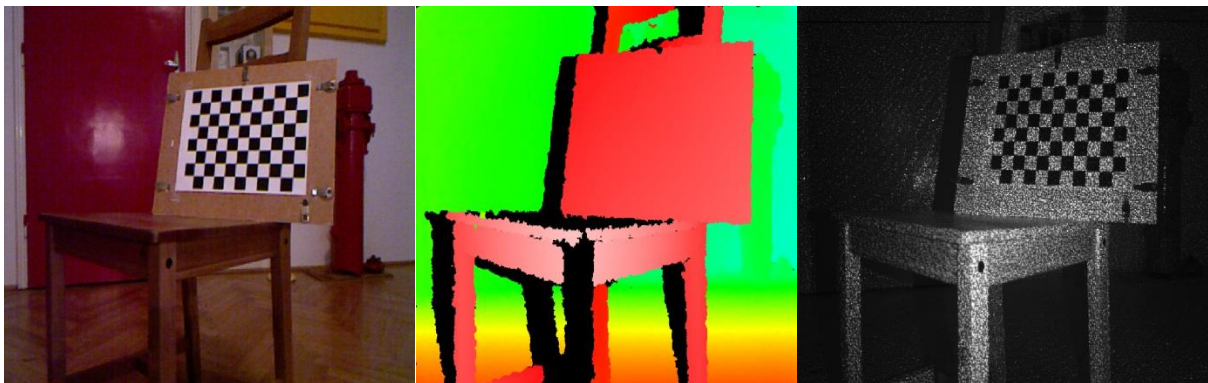
**22. ábra. MS Kinect**

A Kinect felépítését tekintve két CMOS kamerából (1280×1024 px, de csak 640×480 px érhető el), egy infravörös sugárzóból, sztereó mikrofonból és egy gyorsulásmérőből áll (23. ábra és 1. függelék) (IFixIt, 2010). A szenzorok által rögzített mérési eredményeket a Kinectben található áramkörök előzetesen feldolgozzák; a szenzor a gyorsulásmérő adatait vélhetően a kép stabilizálására és az érzékelő mozgásának detektálására használja fel.



**23. ábra. A Microsoft Kinect felépítése (IFixIt, 2010)**

Az előfeldolgozott adatok – a színes kép, a mélységkép és az intenzitáskép (24. ábra) – USB 2.0 kapcsolaton keresztül jutnak el a számítógéphez.



**24. ábra. Kinect által szolgáltatott adatok: színes kép (balra), mélységkép (középen), intenzitáskép (jobbra)**

A Kinect sikerének további kulcsa a szabadon elérhető eszközmeghajtók (driver) és fejlesztői környezetek (Software Development Kit – SDK) elérhetősége. A Microsoft maga is nyújt ilyet, de nyílt forráskódú megvalósítások is használhatóak, mint például: a SensorKinect (Github – SensorKinect, 2013), a Nite, az OpenNI (OpenNi, 2013) együttese, illetve az OpenKinect (OpenKinect, 2013). Igen sok végfelhasználói program építi így be meglévő vagy új szoftverébe a Kinectten alapuló modellezési lehetőségeket. Az elérhető szoftvereket és az általuk használt függvénykönyvtárak összefoglalását tartalmazza a 6. táblázat.

6. táblázat. Kinectet használó programok és a mögöttük lévő függvénykönyvtárak

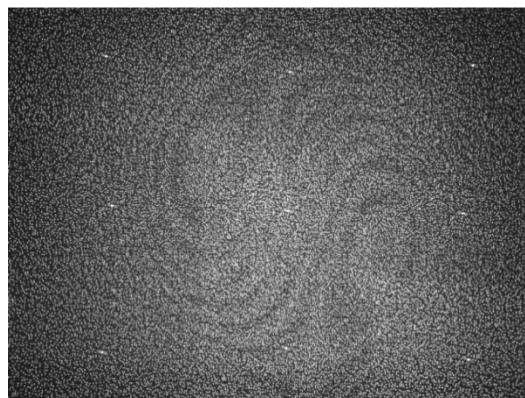
|            | Matlab<br>Kinect-mex | RGB-<br>Demo | Faro<br>Scene | Artec Studio | MRPT | Kscan3D | ReconstructMeQt |
|------------|----------------------|--------------|---------------|--------------|------|---------|-----------------|
| MS SDK     |                      |              |               | +            |      |         |                 |
| OpenNI     | +                    | +            | +             | +            |      | +       | +               |
| OpenKinect |                      | +            |               |              | +    |         |                 |

A Kinect tehát joggal vált a tudományos kutatások tárgyává: történtek vizsgálatok a kültéren való használhatóságát illetően (El-laithy *et al.*, 2012), egyéb szenzorokkal kiegészített robotfejlesztés terén (Woodwall és Bevly, 2012) vagy mozgássérültek számára kerekesszék irányításához (Chang *et al.*, 2011). A Kinect alkalmazása a robotika kutatásokban is igen elterjedt, mert viszonylag kis méretű, az adatfeldolgozás pedig jól automatizálható (25. ábra).



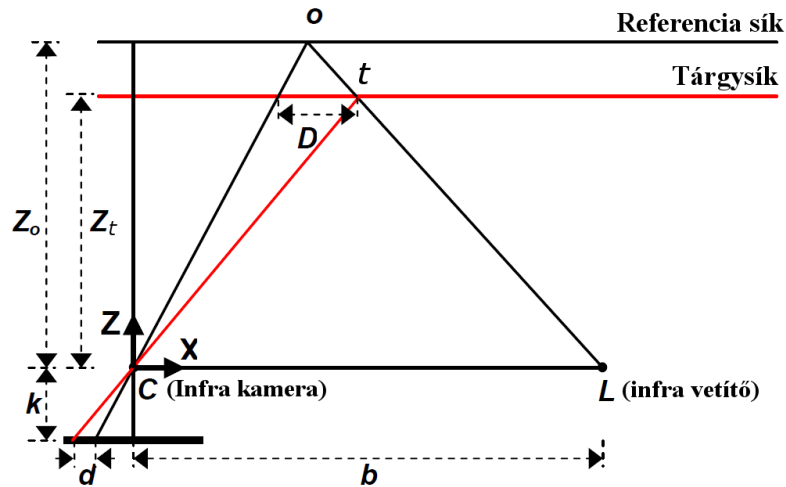
25. ábra. Kinect a BME MOGI – MTA-ELTE Összehasonlító Etológiai Csoport (MAT: 01 031) által épített roboton

A Kinect távolságmérése az előmetszés elvén alapul. Az infravörös vetítő nem homogén fényt, hanem egy állandó mintázatot (pattern) vetít, melynek egy referenciasíkon lévő vetülete a gyártás során rögzítésre kerül a Kinect memóriájában. Az egyedi mintázat jól megfigyelhető a színes és a mélységképen kívül az intenzitásképen is (26. ábra).



26. ábra. Az infravörös vetítő által vetített mintázat

A távolságmérés a referenciakép és a pillanatnyi kép azonos pontja parallaxisának ( $X$  irányú koordináta különbsége) meghatározásával történik (27. ábra).



27. ábra. A Kinect távmérési elve (Khoshelham, 2011)

Az ábrán látható elnevezésekkel élve a  $t$  pont mélységének ( $Z_t$ ) meghatározása a  $d$  parallaxis mérése alapján történik. A  $Z_0$  referenciasíktól bizonyos távolságra lévő  $t$  ponton átmenő sugárnyaláb által bejárt út alapján, a hasonló háromszögeket figyelembe véve, a következő összefüggés írható fel (Khoshelham, 2011):

$$\frac{D}{b} = \frac{Z_0 - Z_t}{Z_0}, \quad (24)$$

és

$$\frac{d}{k} = \frac{D}{Z_t}, \quad (25)$$

- ahol  $Z_t$  a  $t$  pont tárgyátvolsága a tárgyoldali koordináta-rendszerben,  
 $b$  a bázistávolság,  
 $k$  a képtávolság,  
 $D$  a  $t$  pont parallaxisa a tárgyoldali koordináta-rendszerben,  
 $d$  a  $t$  pont parallaxisa a képkoordináta-rendszerben.

$D$  kifejezése és a (24) képletbe való behelyettesítése után a következőt kapjuk:

$$Z_t = \frac{Z_0}{1 + \frac{Z_0}{kb} d} \quad (26)$$

$Z_0, k, b$  illetve a később használt  $\delta x$  és  $\delta y$  paraméterek kalibráció során meghatározhatóak (Khoshelham, 2011), így a kameratengely irányú ( $Z$ ) tárgykoordináta az  $k$  képtávolsággal való megszorzását követően számítható. A kameratengelyre merőleges koordináták a következő képletekkel fejezhetőek ki:

$$\begin{aligned} X_t &= -\frac{Z_t}{k} (x_t - x_0 + \delta x), \\ Y_t &= -\frac{Z_t}{k} (y_t - y_0 + \delta y), \end{aligned} \quad (27)$$

ahol  $x_t, y_t$  a képkoordináták,  
 $x_0, y_0$  a képfőpont koordinátái,  
 $\delta x, \delta y$  az objektív elrajzolás értékei.

A Kinect műszaki paramétereinek összefoglalását a 7. táblázat tartalmazza.

7. táblázat. Kinect tulajdonságai

| Tulajdonságok                                    | Paraméterek                                   |
|--|---|
| Csatoló  | USB 2.0                                       |
| Színes kamera érzékelő                           | SXGA (1280×1024)                              |
| Infravörös kamera érzékelő                       | SXGA (1280×1024)                              |
| Színes kamera továbbított kép                    | VGA (640×480)                                 |
| Infravörös kamera továbbított kép                | VGA (640×480)                                 |
| Színes pixelméret                                | 2,8 $\mu\text{m}$                             |
| Infravörös pixelméret                            | 5,2 $\mu\text{m}$                             |
| Képrögzítési frekvencia                          | 30 fps  |
| Névleges működési tartomány                      | 0,5-3,5 m (akár 10 méterig is kiterjeszthető) |
| Távolság értékek ábrázolása                      | 11 bit  |
| Látószög   | 57°x43°                                       |
| Infravörös hullámhossz                           | 828,6 nm                                      |
| Bázistávolság a színes és infravörös kamera közt | ~75 mm  |
| Képtávolság                                      | ~528 px (~2,75 mm)                            |
| Feldolgozó függvénykönyvtárak (Microsoft)        | SDK, Visual Studio 2010, DirectX              |
| Feldolgozó függvénykönyvtárak (Nyílt forrású)    | Több megoldás, SDK, C++, Matlab               |
| Ár   | ~\$100 (házánkban: ~30 000 Ft)                |

#### 4.3.1.1. Kalibráció

A mélységkamerák elrajzolási paraméterei kalibráció során meghatározhatóak, így azok hibája könnyen kiküszöbölhető a fotogrammetriában szokásos módszerekkel. A kalibráció egy a 24. ábrán is bemutatott mező segítségével történhet, mivel a négyzetrács a mélységkamera intenzitásképén jól azonosítható. A kalibrációs mező különböző térbeli helyzetben történő felvételezése alapján számíthatóak az elrajzolási paraméterek ( $K_1$  és  $K_2$ ), az eljárással több tanulmány is foglalkozik (Chow *et al.*, 2012; Khoshelham, 2011).

A Kinecthez hasonlóan a mélységkamerák egy része rendelkezik színes kamerával is, melyet a mélységkamera képéből levezetett pontfelhők színezésére használnak. Ehhez szükséges a két eszköz kölcsönös tájékozási adatainak (a kamerák egymáshoz viszonyított helye és helyzete a felvétel készítésekor) meghatározása.

Chow (Chow *et al.*, 2012) meghatározta az infravörös vetítő és az infravörös kamera közti, illetve az infravörös kamera és a színes kamera közötti kölcsönös tájékozási adatokat egy adott Kinect szenzorra úgy, hogy a kalibrációs mezőt 3 különböző síkra helyezte (8. táblázat). Továbbá megadta a színes kamera belső tájékozási adatait is egysíkú és többsíkú kalibrációs mezőt használó eljárás segítségével (9. táblázat).

8. táblázat. Chow által meghatározott kölcsönös tájékozási paraméterek

|                 | Infravörös kamera - infravörös vetítő |                | Infravörös kamera - színes kamera |                |
|-----------------|---------------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|
|                 | Szög és távolság érték [° / m]        | Szórás ["/ mm] | Szög és távolság érték [° / m]    | Szórás ["/ mm] |
| $\Delta\omega$  | -0,002                                | 29             | -0,775                            | 362            |
| $\Delta\varphi$ | -0,006                                | 38             | -0,119                            | 312            |
| $\Delta\kappa$  | -0,003                                | 14             | -0,359                            | 207            |
| $\Delta b_x$    | 75,080                                | 0,3            | 25,017                            | 1,3            |
| $\Delta b_y$    | 0,000                                 | 0,1            | -0,008                            | 1,4            |
| $\Delta b_z$    | 0,000                                 | 0,1            | 0,007                             | 2,7            |

9. táblázat. Chow által meghatározott belső tájékozási paraméterek a színes kamerára

|                           | Egy sík               |                      | Több sík              |                      |
|---------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
|                           | Érték                 | Szórás               | Érték                 | Szórás               |
| $x_p$ [mm]                | 0,06                  | 0,005                | 0,02                  | 0,002                |
| $y_p$ [mm]                | 0,18                  | 0,005                | -0,17                 | 0,002                |
| $c$ [mm]                  | 2,97                  | 0,008                | 2,95                  | 0,004                |
| $k_1$ [mm <sup>-2</sup> ] | $1,71 \cdot 10^{-2}$  | $4,47 \cdot 10^{-4}$ | $1,62 \cdot 10^{-2}$  | $4,04 \cdot 10^{-4}$ |
| $k_2$ [mm <sup>-4</sup> ] | $-3,03 \cdot 10^{-3}$ | $1,14 \cdot 10^{-4}$ | $-3,15 \cdot 10^{-3}$ | $1,03 \cdot 10^{-4}$ |

A Kinect színes és infravörös kamerája közötti kölcsönös tájékozási adatok hasonló megoldásokkal könnyen meghatározhatóak, így lehetővé válik a mélységkamera képéből levezetett pontfelhő színezése. A vizsgálatok során használt Kinect szenzorok kalibrációs adatait a 2. függelék tartalmazza. Az általam ismert Kinect fejlesztői könyvtárak (SDK) tartalmaznak közelítő kölcsönös tájékozási adatokat, így a pontfelhő színezése kalibráció nélkül is – természetesen rosszabb minőséggel – megoldható.

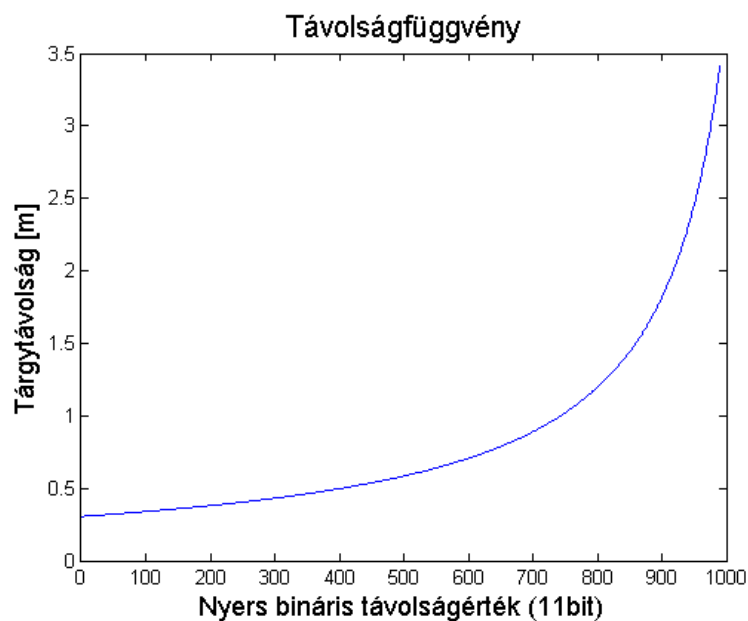
#### 4.3.2. Kvantált pontfelhő

A Kinect egyik különlegessége az adatok továbbításának módja, ami jelentősen befolyásolja modellezésre való felhasználhatóságát. A nagy sebességű adatnyerés következménye, hogy nagy mennyiségű adatot kell a feldolgozó számítógép felé továbbítani. Erre a Kinect USB 2.0 csatlót használ, melynek sávszélessége limitált (480 Mbps), ezért a mélységinformációkat 11 bit-es egész számként ábrázolva továbbítja. A kerekítés sajátossága, hogy a számok és a tárgytávolság közti összefüggés nem lineáris (28. ábra), tapasztalati úton meghatározott alakja a következő (OpenKinect):

$$D = \text{round} \left( 2842,5 \left( \text{atan} \left( \frac{d}{0,1236} \right) - 1,1863 \right) \right), \quad (28)$$

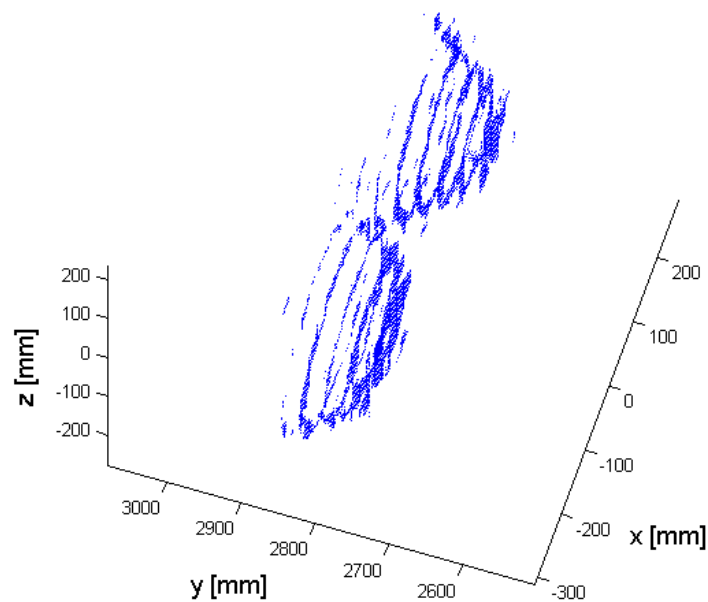
ahol  $d$  a kameratengely irányú tárgytávolság méterben,

$D$  a tárgytávolság 11 bit-es mélységkód.



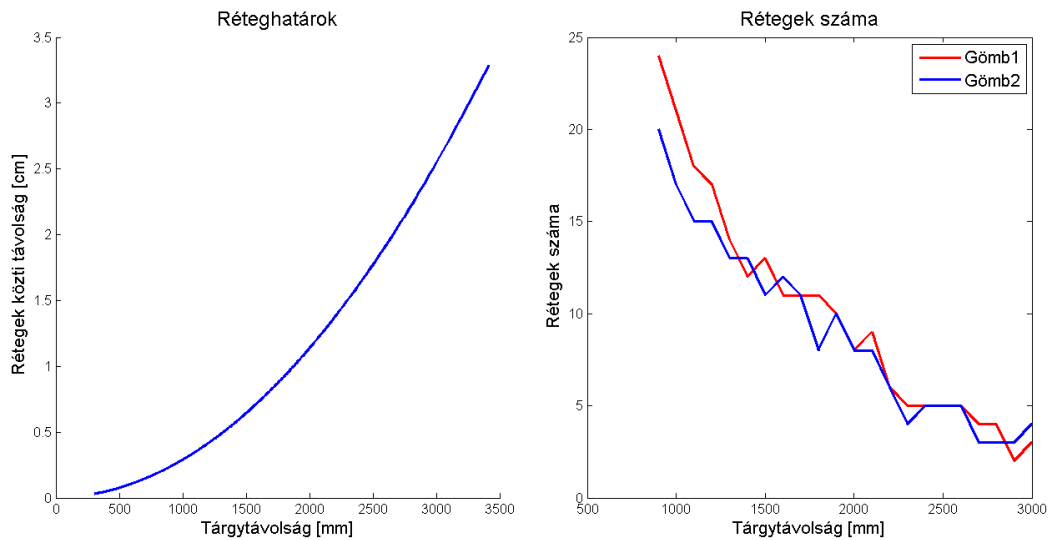
28. ábra. Távolságfüggvény

További összefüggéseket határozott meg Nathan (Nathan, 2011), illetve az OpenKinect (OpenKinect – Imaging Information, 2013) projekt is, melyek azonban nem különböznek jelentősen az ismertetett formulától. Az egész számok a Kinect processzorának segítségével, kerekítés útján állnak elő, ami a mélységképből levezetett pontfelhő rétegződését (29. ábra) vonja maga után, ahol a rétegek közti ugrások mértéke a tárgy távolság függvényében változik (Macknoja *et al.*, 2012). A kerekítés a tárgy távolság kameratengellyel párhuzamos komponensén történik a mélységképen, ezért a pontfelhő rétegek síkokat alkotnak, és nem vetítési középpontú gömbfelületeket.



**29. ábra. Kvantálásból adódó réteges pontfelhő**

A mélységkamera pontfelhője  $Z$  irányban jelentősen ritkábban vehet fel értékeket, mint a hagyományosan megszokott, pl. lézerszkennelt pontfelhők esetében tapasztalható. A rétegek közötti ugrás métereken belüli tárgy távolságok esetén 1 mm, míg 3 méter felett a kerekítés értéke elérheti az 3 cm-t is (30. ábra). Ez egyben azt is jelenti, hogy egy tárgy a Kinecthez közel több rétegen képződik le, mint nagyobb tárgy távolságon (30. ábra).



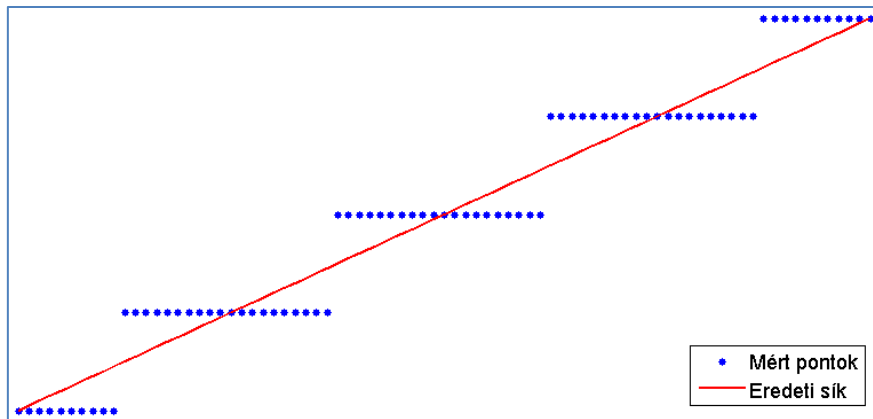
**30. ábra. A rétegek közötti ugrás mértéke a tárgytávolság függvényében (balra) és az egy gömbre eső rétegek száma (jobbra)**

A kerekítés tehát egy szabályos hibaforrás, ami a távolság függvényében befolyásolja a mérések pontosságát (29). A távmérés elvéből és annak képletéből következik, hogy a pontosság a tárgytávolsággal négyzetes összefüggésben áll. Ez indokolja a kvantálás mértékének változását is.

$$\varepsilon = 2842,5 \left( \operatorname{atan} \left( \frac{d}{0,1236} \right) - 1,1863 \right) - \operatorname{round} \left( 2842,5 \left( \operatorname{atan} \left( \frac{d}{0,1236} \right) - 1,1863 \right) \right), \quad (29)$$

#### 4.3.2.1. Alulméretezés

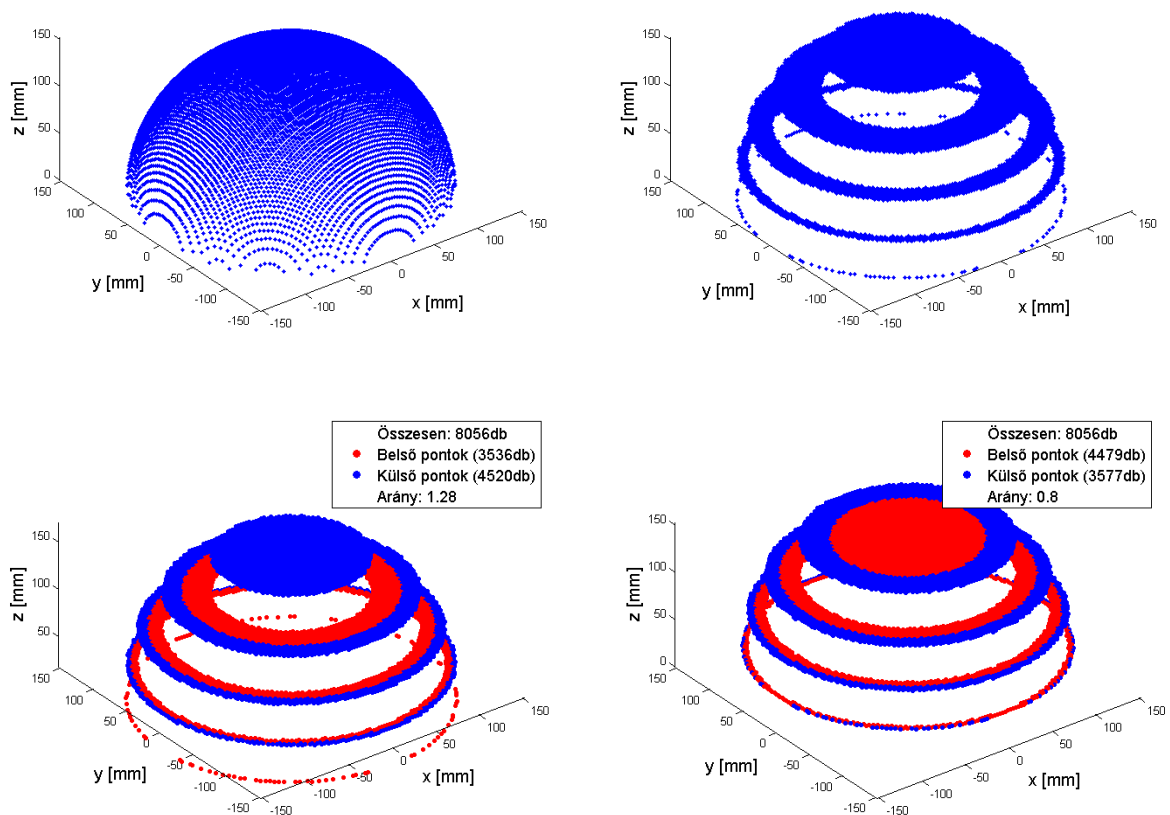
A kvantálás tehát a mérési eredményeket szabályos hibával terheli, melynek hatása ugyan egyes esetekben a mérési körülményekből fakadóan kiesik, de nagy tárgytávolságok esetén jelentős hibát eredményez. Sík mérése esetén például a hiba gyakran kiesik, mert a  $Z$  irányú hibák várható értékének nagysága, illetve a hibák számossága a sík –  $Z$  értelemben vett – két oldalán megegyezik (31. ábra). A síkillesztés történhet a síkra merőleges irányú hibák vagy a rétegekre merőleges irányú hibák (Shan és Toth, 2008) minimalizálása alapján.



31. ábra. Síkillesztés esetén a kvantálási hiba kiesik

Ha a sík közel párhuzamos a rétegekkel, és két réteg közöttes tartományába esik, akkor a szabályos hiba értéke elérheti a kerekítés nagyságát.

Zérustól különböző görbületű felületek esetén a kvantálás jelentős hibát okoz. Vizsgálataimat a felület egyszerűsége miatt gömbökön végeztem (Molnár *et al.*, 2012a), így a hiba hatását is ezen szemléltetem (32. ábra).

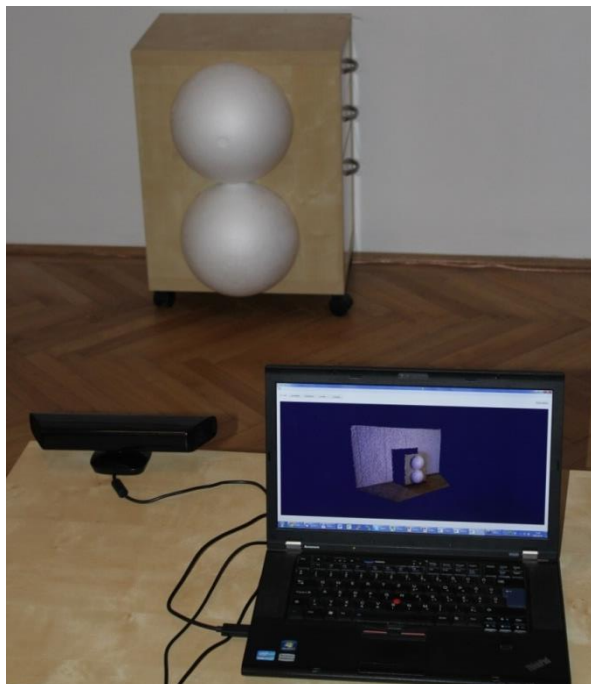


32. ábra. Elméleti gömbi pontok (balra felül), réteges pontok (jobbra felül), a hiba előjele alapján színezett rétegek (balra alul), a hiba előjele alapján színezett rétegek (Z irányban 18 mm-rel eltolva) (jobbra alul)

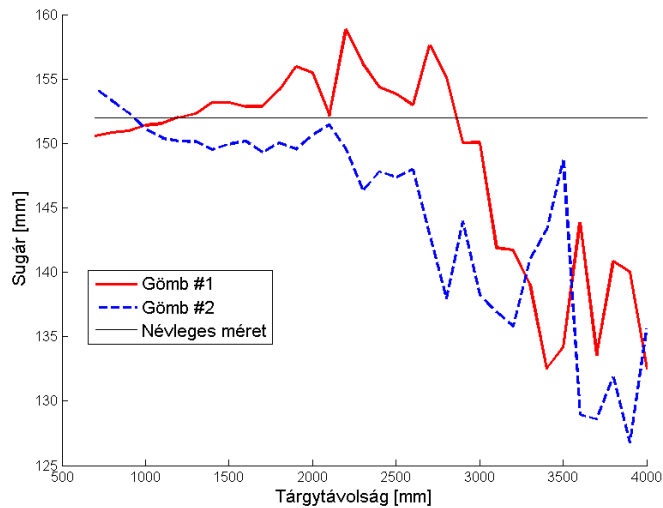
Megfigyelhető, hogy a gyűrűs rétegeken az elméleti gömbfelületen belül eső pontok száma (az ábrán pirossal jelölve) jelentősen nagyobb, mint a kívül esők (kékkel jelölve). Az ábrákon az is látható, hogy a gömb szenzorhoz legközelebb eső pontjának (felső) réteghez viszonyított helyzete szintén jelentősen befolyásolja a gömbön belülrre, illetve kívülre vetített pontok számának arányát.

Az elemszámok aránytalansága miatt a hagyományos gömbillesztési algoritmusok méretezési hibát eredményeznek, mely általában alulméretezést jelent. Megállapítható továbbá, hogy a kerekítésből adódó hibák mértéke az elméleti gömb és a réteg metszéspontjától távolodva nem lineárisan változik, ami szintén téves eredményhez vezet azon gömbillesztési algoritmusok használata esetén, melyek az egyes pontokat terhelő hibák alapján – azonos súllyal – végzik az illesztést. Azon illesztő algoritmusok sem vezetnek megfelelő eredményre, melyek a felületi normálisok alapján végzik a paraméterbecslést, hiszen a kvantált pontfelhőre illesztett TIN modell normálisai egy rétegen belül egymással és a kameratengellyel párhuzamosak.

Az alulméretezés mértéke a távolság hatására növekszik, ahogy az a következő gyakorlati példából is kitűnik: két egymás mellett elhelyezkedő (33. ábra) ismert sugarú (152 mm) expandált polisztirol („hungarocell”) félgömböt mértem egyre növekvő tárgy-távolság mellett (34. ábra). Az ábra alapján látható, hogy az alulméretezés mértéke eléri a 2,5 centimétert.



33. ábra. Relatív pontosság méréséhez használt mérési elrendezés

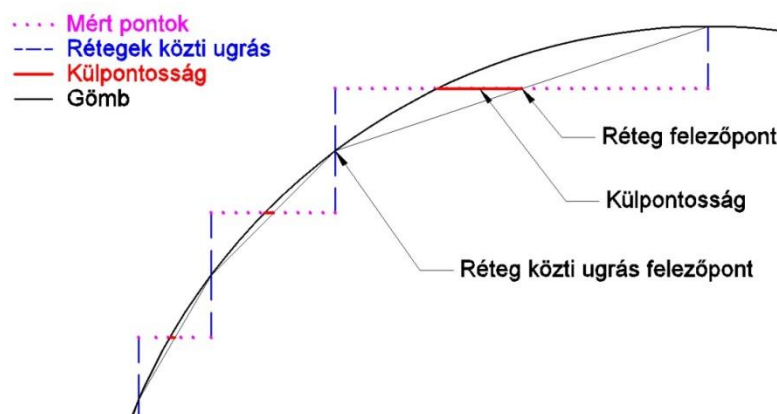


34. ábra. Illesztett sugár méretváltozása a tárgy távolság függvényében

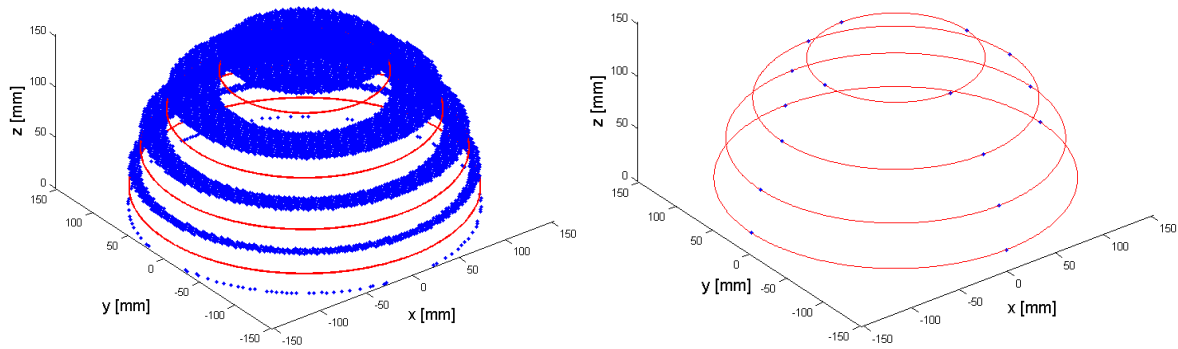
#### 4.3.2.2. Gömbillesztési algoritmus kvantált pontfelhőre

A 4.2.2.4. fejezetben ismertetett gömbillesztési eljárások tehát kvantált pontfelhő esetén téves eredményt adnak. Ezért új illesztési eljárást dolgoztam ki, mely a hasonló, réteges pontfelhők esetén megfelelő becslést ad a gömb középpontjának helyére és sugarára.

Az eljárás geometriai megfontolások alapján küszöböli ki a szabályos hiba forrását. Az egyes gyűrűk középvonalai nem gömbfelületi görbék, a réteg és a gömb metszéspontja minden esetben azon kívül található (35. ábra), ennek következménye az alulméretezés. Ezzel szemben a rétegek közötti ugrások felezőpontjai gömbfelületi pontok összességét alkotják. Két réteg közti ugrás egy, a kameratengelyre merőleges kört kell, hogy meghatározzon, távolsága a két határoló réteg távolságának átlagaként adható meg, így az egyes rétegugrások közt koncentrikus körök határozhatóak meg. Ha tehát ezen körök térbeli helyzetét meg tudjuk határozni, a körökre történő gömbi paraméterbecslés matematikai értelemben helyes eredményre fog vezetni (36. ábra).

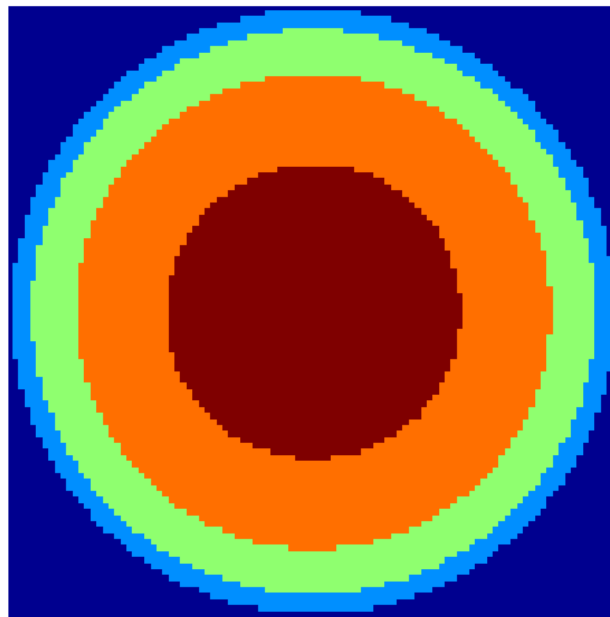


35. ábra. Gömb metszete és a görbületből adódó alulméretezés



**36. ábra. A rétegugrások felezőpontjában lévő körök**

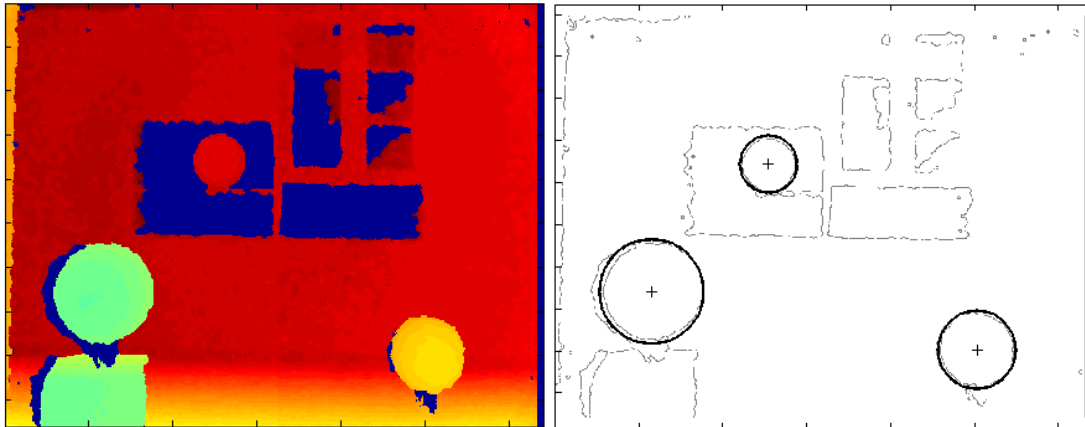
A feladat megfelelő végrehajtásához tehát a rétegugrások helyének azonosítását kell végrehajtanom, ezt a mélységkamerák által gyűjtött nyers eredményein, a mélységképeken (37. ábra) célszerű megtenni, képfeldolgozó algoritmusok segítségével. A mélységképen látható körök és gyűrűk határainak azonosítására Hough-transzformációt használok, melynek hatásfoka jelentősen növekszik, ha ezt a színes kép helyett élkereséssel előfeldolgozott képen alkalmazzuk (Tóth, 2009).



**37. ábra. Koncentrikus körgyűrűk a mélységképen (szimulált adat)**

Az élkeresési eljárások általában az intenzitásértékek első és második deriváltjainak számításán alapuló konvolúciós szűrők (Prewit, Sobel, Laplace). Ezek hátránya, hogy vagy igen érzékenyek a képzajra, vagy utólagos szűréseket igényelnek, annak érdekében, hogy bináris képet kapjunk eredményül. Ezen problémák kiküszöbölésére megoldást jelent a Canny által kidolgozott képerátor (Canny, 1986), amely négy lépésben hajtja végre az élkeresést. Elsőként Gauss-szűréssel simítja a képet, majd elvégzi a gradiensek

meghatározását, ezt követően a nem lokális maximumhelyeket elhagyja, végül a következő gradiens függvény bináris vágást hajtja végre hiszterézissel (Tóth, 2009). A hiszterézis használatának előnye, hogy nem szükséges a határértékek pontos ismerete. Az eljárás további haszna, hogy a detektált élek nem szakadozottak (38. ábra).



38. ábra. Élkeresés és kör detektálás eredménye a mélységképen

A fényképeken való alakzatfelismerés fontos lépése a képek automatikus mérésének, kiértékelésének. Hough (Hough, 1959) dolgozta ki a képeken látható egyenes paramétereinek meghatározására alkalmas algoritmust, mely elv körök detektálására is alkalmazható. A Hough-transzformáció során a kép értékes pixeleit a Hough-térbe transzformálja, mely térnek a dimenziószáma a keresett paraméterek számával egyezik meg. Éppen ezért az eljárást a legegyszerűbb eseten keresztül, egyenesek detektálása során érdemes áttekinteni.

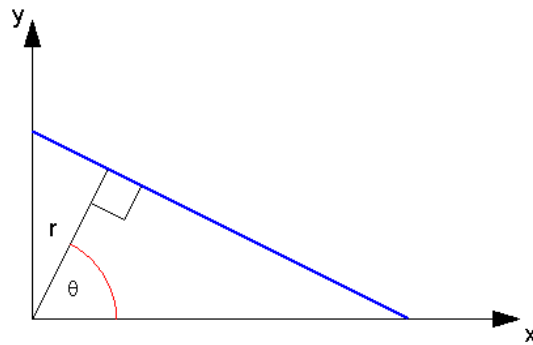
Legyen adott  $n$  darab kollineáris elhelyezkedésű értékes pixelünk, keressük a rájuk illeszkedő egyenest egyértelműen definiáló  $m$  és  $b$  paramétert:

$$y = mx + b. \quad (30)$$

Az egyenes így felírt alakja nem alkalmas a függőleges egyenesek leírására, így a gyakorlatban az egyenes Euler-féle felírását használjuk (Haralick és Shapiro, 1992):

$$r = x \cos(\theta) + y \sin(\theta), \quad (31)$$

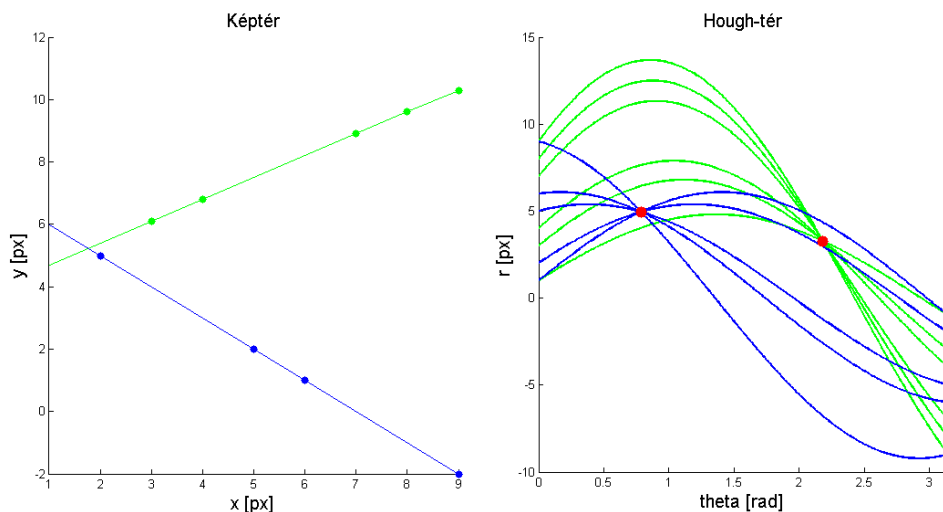
ahol  $\theta$  az egyenes  $x$  tengellyel bezárt szöge,  $r$  az egyenes távolsága az origótól (39. ábra).



39. ábra. Egyenes poláris és derékszögű koordinátákkal adott implicit megadása

Ebben az esetben a Hough-tér kétdimenziós lesz.

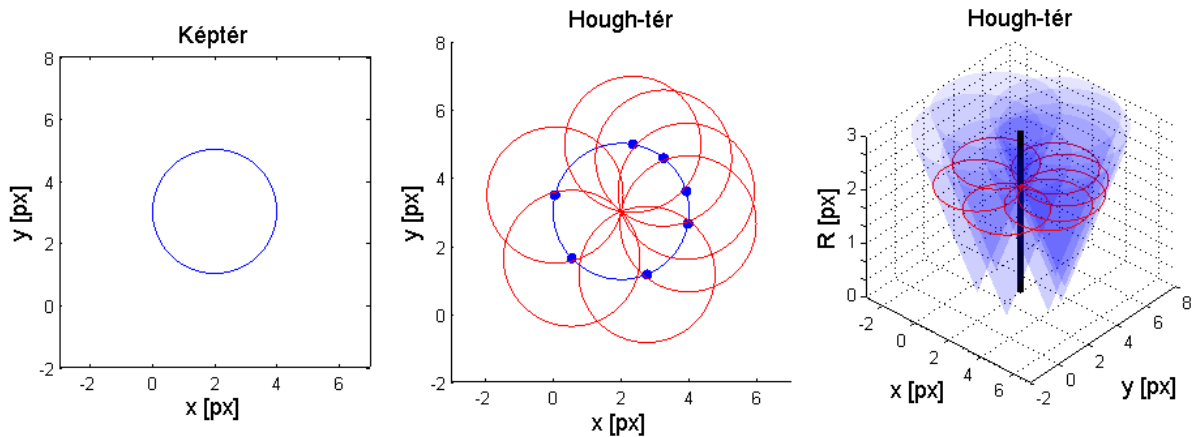
A képtér és a Hough-tér közti kapcsolat a következő: a kép minden értékes pixelére a paraméterek összes értelmezett kombinációja által képzett görbe (sinogram) – folytonos változók esetén ez végtelen sok – ábrázolásra kerül a Hough-térben. A tér azon pontjain, ahol a görbe áthalad, az értékek eggyel nőnek. A kollineáris pontok görbéi egy pontban metszik egymást (40. ábra), a metszési pontokban a Hough-tér értékei lokális maximumot képeznek. Végezetül a feladat a Hough-tér maximumainak keresése, melyek leírják a keresett paraméterek értékeit. A Hough-teret az egyre növekvő értékek miatt nevezik akkumulátortérnek is. A Hough-tér megjelenítése az élkeresés eredményeként kapott pixelek, illetve a detektálható pontok számától függően válik összetettebbé.



40. ábra. Hough-transzformáció két egyenes esetén

Kör detektálása esetén háromdimenziós Hough-térre van szükség  $(x, y, R)$ , azonban a számítás hatékonyságának növelése érdekében általában megkötjük a sugár értékét. Ebben

az esetben az akkumulátortér változói megegyeznek a képp koordinátákkal és körök metszéspontjait (41. ábra), ismeretlen sugár esetén pedig kúpok metszéspontjait keressük.



41. ábra. Hough-transzformáció ismert és ismeretlen sugarú kör esetén

A Hough-transzformáció olyan kör esetén, melynek a sugara 5 pixelnél kisebb, nem ad megbízható eredményt (MathWorks – *Imfindcircles*, 2013).

A 4.3.2.1. fejezetben részletezett alulméretezés hatásának kiküszöbölésére gömbillesztő eljárást dolgoztam ki *KvantFit* néven. A bemutatott körkereső algoritmus segítségével a mélységképeken kialakult réteghatárok jól azonosíthatóak. A körök tárgykoordinátarendszerbe való transzformálása az  $X$ - $Y$ , kameratengelyre merőleges síkban a centrális vetítés elve alapján történik,  $Z$  irányú elhelyezésük a térben a rétegugrások középsíkjaiba történik. Az így meghatározott koncentrikus körökre történő gömbillesztés már helyes illesztést eredményez (Molnár *et al.*, 2012b).

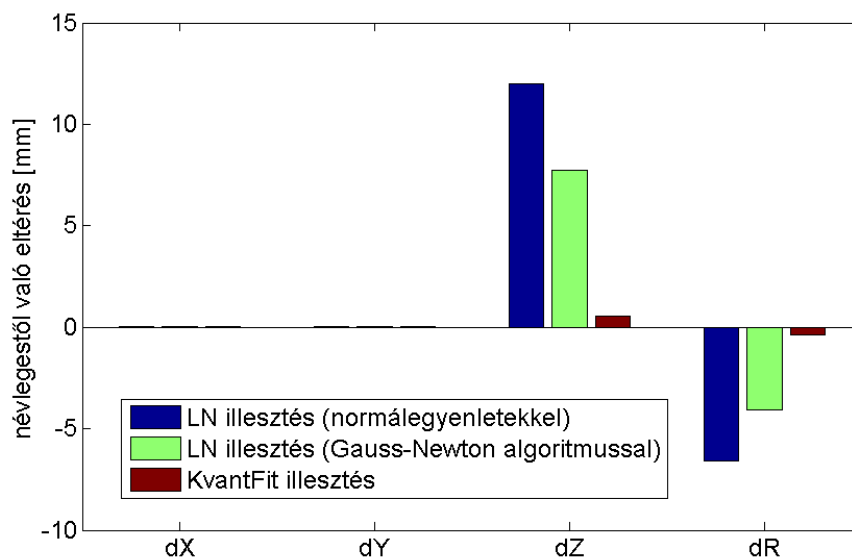
Összefoglalva az általam tervezett *KvantFit* illesztés lépései tehát a következők:

- a gömbillesztésbe bevonandó képpontok leválogatása,
- a gömbre vetülő rétegek elkülönítése a mélységképen,
- rétegenként történő körkeresés ( $x$ ,  $y$ ,  $R$ ),
- az így kapott képpontok transzformálása a metrikus koordináta-rendszerbe,
- a körök  $Z$  irányú eltolása a megfelelő rétegugrások felezőpontjaiba,
- a körök alapján történő legkisebb négyzetes becslés a gömb paramétereire.

Fontos megjegyezni, hogy a mélységkamerához legközelebb eső körök sugara gyakran nem éri el az 5 pixelt, ilyen esetekben a Hough-transzformáció nem megbízható, amit érdemes vagy súlyozással, vagy teljes elhanyagolással figyelembe venni. Ezen kívül fontos, mérést

befolyásoló tényező lehet a távméréshez használt fény beesési szöge, amely a gömb peremén számottevő hibaforrást jelenthet, így itt is érdemes valamilyen súlyozással élni.

A KvantFit algoritmust összehasonlításképpen a 4.2.2.4. fejezetben bemutatott legkisebb négyzetes algoritmusokkal vetettem össze (42. ábra). A vizsgálatokat szimulált, egyéb hibaforrástól mentes adatokon végeztem.



**42. ábra.** Kvantált pontfelhőre történő illesztések paramétereinek összehasonlítása a névleges értékekkel

Az eredményekből jól látható (42. ábra), hogy a kvantálást figyelembe nem vevő illesztések a kameratengelyre merőleges síkban megfelelő eredményt szolgáltatnak, azonban a kameratengely irányában, illetve a sugár meghatározásában jelentős hibát ejtenek, míg a KvantFit itt jelentősen jobb eredményeket szolgáltat. A véletlen hibával nem terhelt, szimulált adatok esetén is tapasztalható hiba a sugár és a mélységkomponensben a KvantFit eljárással történő illesztés során, azonban ez sehol sem haladja meg a fél milliméteres értéket. Ez alapján kijelenthető, hogy réteges pontfelhőre történő gömbillesztés esetén a KvantFit jól alkalmazható, nagy pontosságú eljárás.

Hasonló illesztési nehézségekkel találkozott Clouse (Clouse, 2002), aki égitest alapján történő űrjármű-navigációhoz fejlesztett illesztő algoritmust. Esetében a problémát a gyorsan mozgó – ezért a mélységképen ellipszoidnak látszó – égitest okozta. Megoldásként a mélységkamera érzékelőjének pixelkiolvasási sorrendjét kihasználva ért el pontosabb eredményeket.

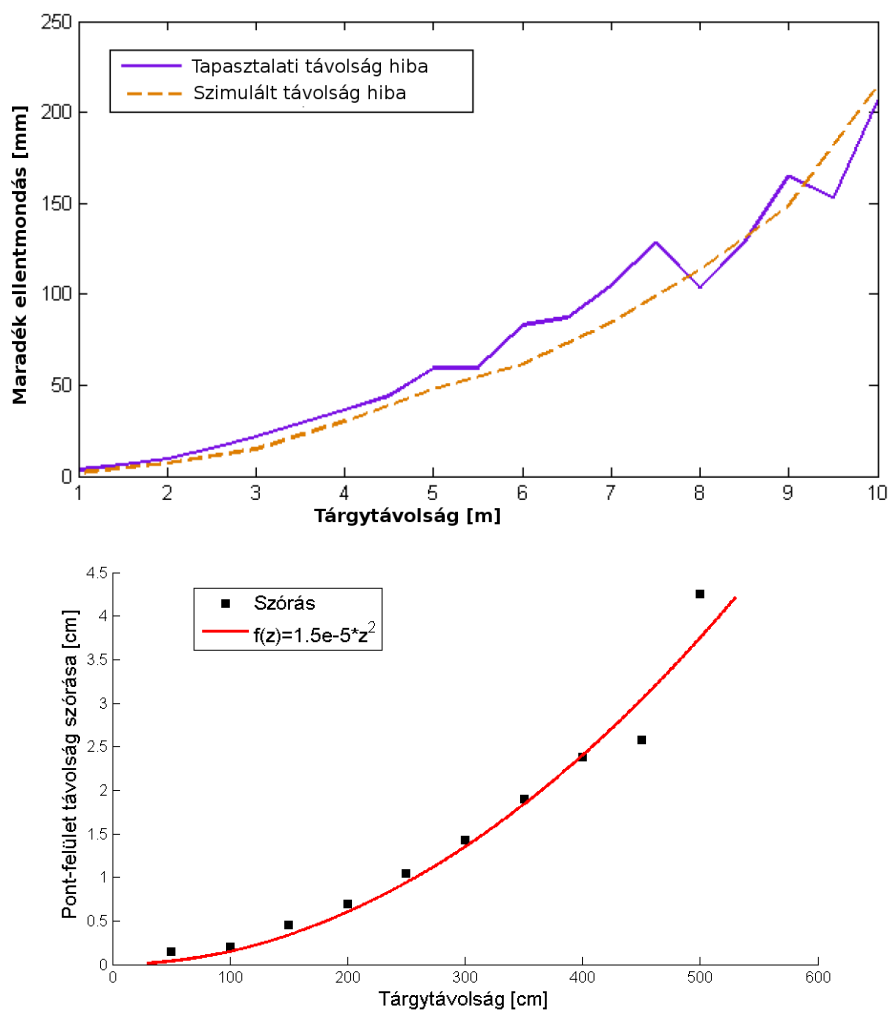
### 3. TÉZIS

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

#### 4.3.3. Pontossági vizsgálat

A Kinect pontosságát illetően több vizsgálatot is végeztek (Chow *et al.*, 2011; Khoselham, 2011), melyekhez sík mérését vették alapul, ezért a kerekítésből fakadó hibák hatása nem mutatkozik meg (43. ábra).



43. ábra. Kinect pontossági vizsgálatok: (a) Chow, 2011 (b) Khoselham, 2011

A távolságszámítás összefüggéséből kiindulva a távolság függvényében négyzetesen romlik a pontosság, amivel a tapasztalati vizsgálatok is összhangban vannak.

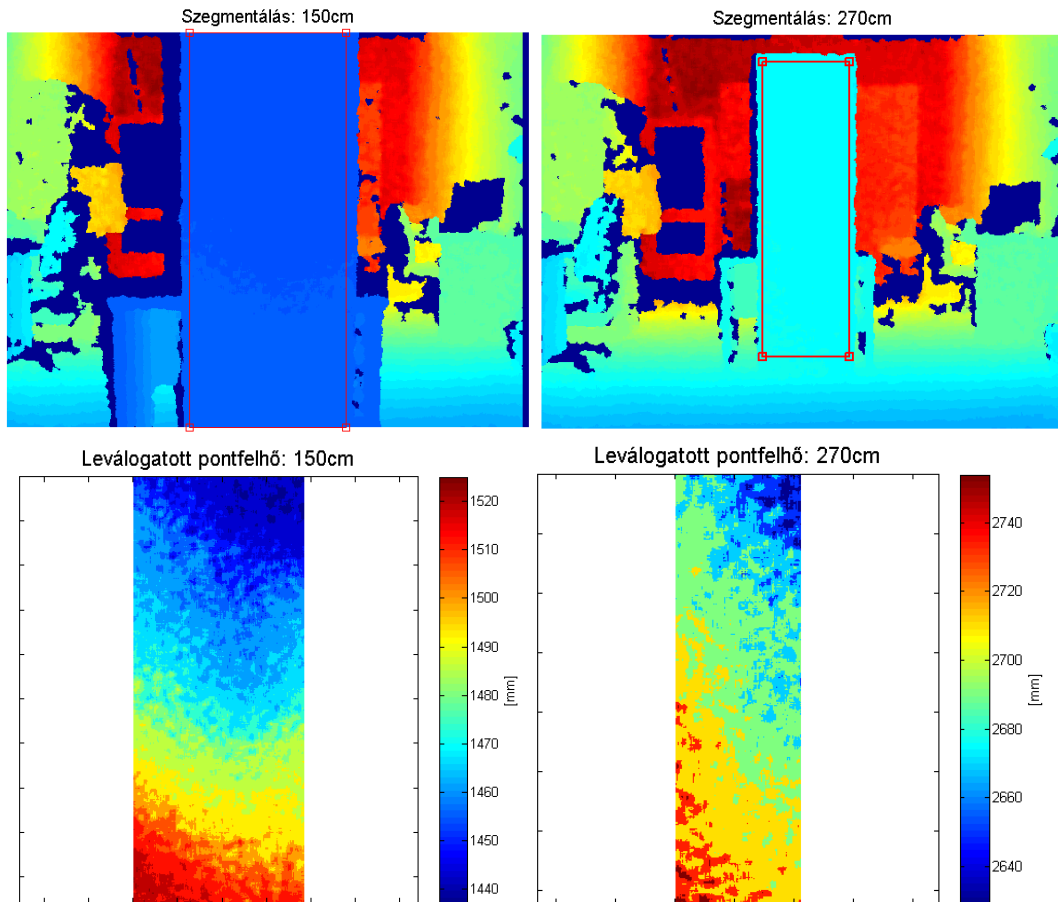
A Kinect pontosságát részletesebb vizsgálatok során határoztam meg, melyek ismétléses méréseket, illetve síklapúság-vizsgálatokat foglalnak magukba, továbbá a már bemutatott algoritmus segítségével, gömbök mérésével relatív és abszolút pontossági vizsgálatokat is (10. táblázat) végeztem Matlab (MathWorks, 2013) programkörnyezetben. A vizsgálatok tervezése során ügyeltem arra, hogy azok a mélységképekből levezetett kvantált pontfelhő esetén jelentkező különleges jellemzők minősítésére is alkalmasak legyenek. A minősítés gyakorlati alkalmazását a Kinect által mért adatokkal valósítottam meg úgy, hogy minden vizsgálati típus esetén ismétléses méréseket végeztem annak érdekében, hogy a mérési eredmények szórását is felhasználhassam a minősítés során.

**10. táblázat. A mélységkamera pontossági vizsgálatainak fajtái és a célzott tulajdonságok**

| Vizsgálat                      | Célzott tulajdonság              |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ismétlési pontossági vizsgálat | képpontonkénti szórás            |
| Síklapúság-vizsgálat           | Z irányú pontosság               |
| Relatív pontossági vizsgálat   | X, Y, Z irányú pontosság         |
| Abszolút pontossági vizsgálat  | Külső mérésekkel való egybevetés |

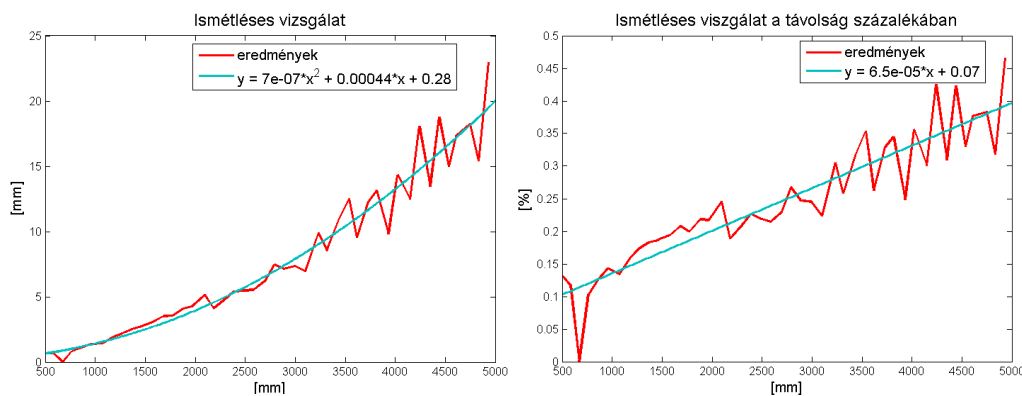
#### **4.3.3.1. Ismétlési pontosság**

Mivel a mélységkamerák által szolgáltatott eredmények a zajviszony tekintetében általánosan rosszul teljesítenek, először ismétléses méréseket végeztem. Egyazon álláspontból, egyazon felületet mértem hat alkalommal, így a mélységképek pixelenkénti eltérését vettem statisztikai elemzések alá változatlan látómező és szenzorhelyzet mellett. A méréseket 10 cm-enként növekvő tárgytávolságból (0,5 – 5 méteres tartományon) végeztem el, hogy a pontosság a távolság függvényében is meghatározható legyen. Az elemzések során nem a teljes látómezőt (mélységképet) vettem figyelembe; az egységes tárgytávolság miatt minden esetben egy 180 cm x 60 cm méretű, a kameratengelyre merőleges sík lapot mértem (44. ábra), ezzel a képsarkok közelében tapasztalható erős párnatorzítás hatását is csökkenteni tudtam. A tárgytávolság függvényében tehát a vizsgálathoz felhasznált képpontok száma is változott 10 000-200 000 pont tartományban. Érdeemes továbbá megjegyezni, hogy a sík minden igyekezet ellenére nem volt merőleges a kameratengelyre.



44. ábra. Nyers mérési eredmények és a vizsgálathoz használt sík felület 150 cm (balra) és 270 cm (jobbra) tárgy távolságban

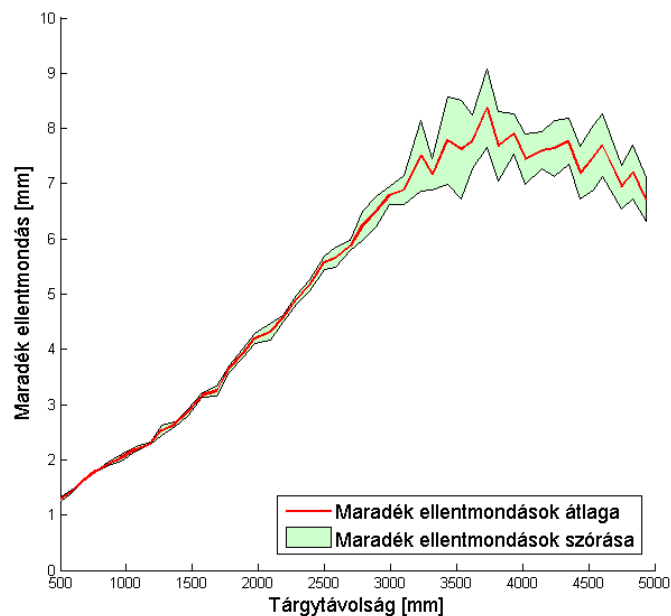
A képpontenkénti ismételt távolságvértékek középhibáit és azok átlagát számítva megállapítható, hogy a Kinect ismétlési pontossága nem haladja meg a távolság 0,5%-át (45. ábra). Az ábrán jól látható, hogy a három métert meghaladó tárgy távolság esetén az előbb leírtak alapján meghatározott görbe jelentős zajjal terhelt, melynek oka nagyrészt a réteges pontfelhő alkotásában keresendő (Toth et al., 2012). 3 méter alatti tartományon a szórás a tárgy távolság 0,3%-a alatt marad.



45. ábra. Ismétléses vizsgálat eredménye a távolság függvényében (balra), illetve a távolság arányában (jobbra)

#### 4.3.3.2. Síklapúsági vizsgálat

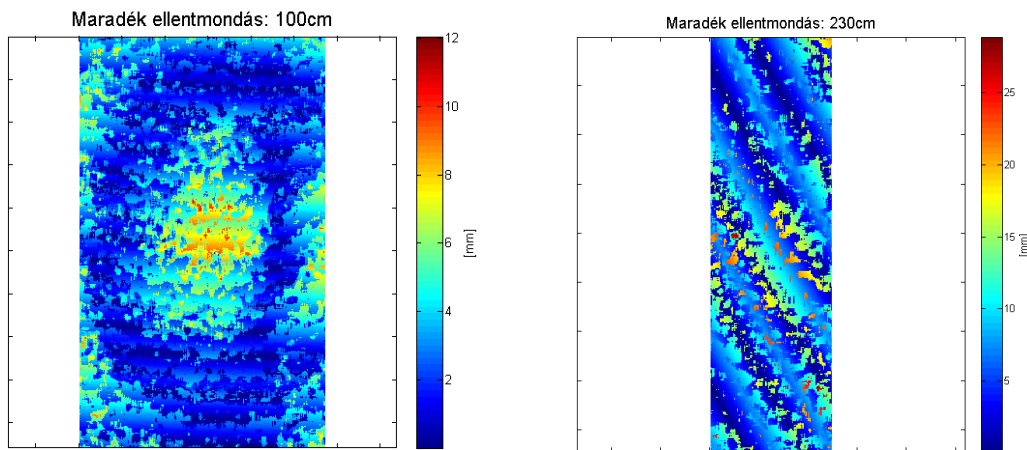
A 4.3.3.1. fejezetben bemutatott sík felületről készült pontfelhőre végeztem síkillesztést a 4.2.2.2. fejezetben említett főkomponens-transzformáció segítségével. A maradék ellentmondások síkra merőleges irányú komponensei szórásainak – ismételt mérések alapján számított – szórását vizsgálva megállapítható, hogy a szórások szórása 3 méter felett ugrásszerűen nő, ezért 3 méter felett a mérések felhasználása nem célszerű. A grafikon trendjének megváltozása 3 méter felett annak köszönhető, hogy a kvantálás mértéke nagyobb, mint a sík ferdesége és a kerekítés előtti, nyers adatok feltételezett szórása (46. ábra). Fontos megjegyezni, hogy jelen vizsgálat nem tér ki az abszolút pontosságra, azaz a valósággal való egyezést nem vizsgálja.



46. ábra. Maradék ellentmondások szórásának szórása és szélső értékei

Az ismétléses mérések során tapasztalható maradék ellentmondás maximális értéke és azok szórásai között nagyjából ötszörös szorzó állapítható meg. A mérések ebben az esetben is azt mutatják, hogy a Kinect által szolgáltatott adatok szórása a távolság 0,3%-a alatt, míg a maximális eltérések 2% alatt maradnak 3 méter alatti tárgytávolságok esetén. A 3 méter feletti tárgytávolságok esetén a sík jelentős döntése szükséges a kvantálás hatásának kiküszöbölése érdekében.

A maradék ellentmondások térbeli eloszlását vizsgálva az optikai elrajzolás (a körkörös mintázat mutatja a sarkokon tapasztalható nagyobb torzításokat), valamint a kvantálás (réteghatárok mentén ismétlődő mintázat) hatásait fedezhetjük fel (47. ábra).



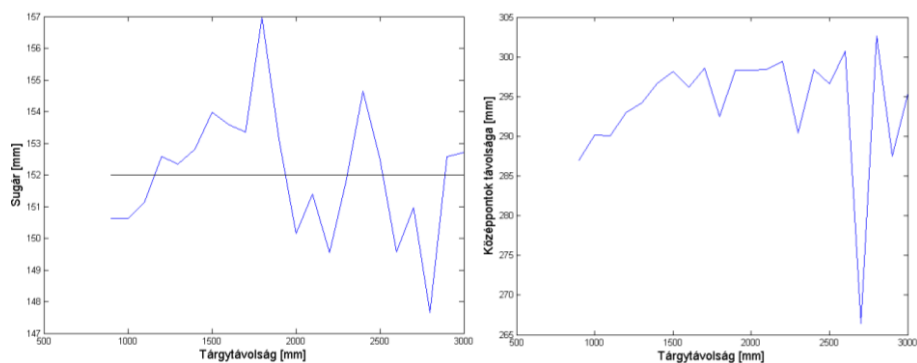
47. ábra. Maradék ellentmondások geometriai eloszlása 100 cm (balra), illetve 230 cm (jobbra) tárgytávolság esetén

Az így végrehajtott pontossági vizsgálat a – Kinect esetében a kerekített – távmérési értékek minősítésére használható.

#### 4.3.3.3. Relatív pontossági vizsgálat

A mérési adatok térbeli, relatív elhelyezkedésének vizsgálatára gömbök mérését és illesztését jelöltem ki feladatul és végeztem el. Az illesztéshez a már bemutatott KvantFit eljárást használtam. A méréseket ebben az esetben hét alkalommal ismételttem, a tárgytávolságokat 10 centiméteres lépésközzel növeltem a 0,5-4 méteres tartományban. Két egymás mellé helyezett 152 mm sugarú félgömb (33. ábra) esetén vizsgáltam azok sugarának eltérését a valós, mérőszalaggal mért sugar adatoktól. A gömbközpontok közti távolságok valósággal való egyezőségét is vizsgáltam, így a mért felületről leképezett pontok  $x$  és  $y$  irányú koordinátáinak hibái is a minősítés részévé váltak.

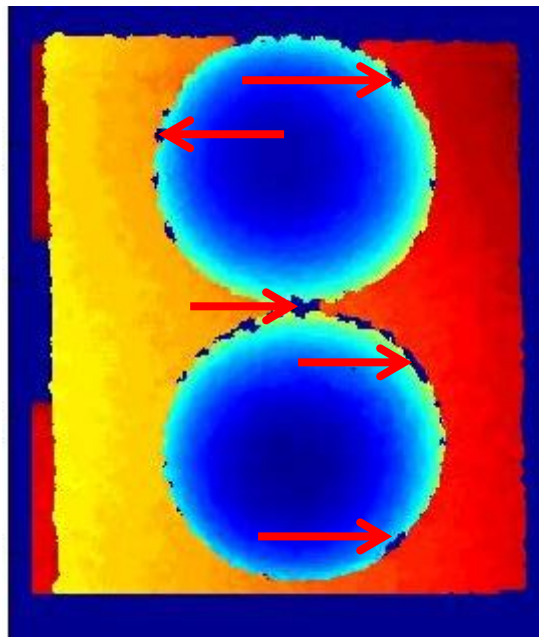
Az eredmények alapján látható, hogy a Kinect mélység szenzora a méréseket meglepően nagy pontossággal végzi el (48. ábra), azonban a kerekítés jelentős romlást idéz elő, ahogy ez a 4.3.2.1. fejezetben is olvasható.



48. ábra. Sugár (balra) és középpont (jobbra) meghatározásának eredménye

A KvantFit eljárással történő sugár meghatározása esetén látható, hogy a mérési hiba a mérési tartomány egyik pontján sem éri el az 1 centimétert, a hibák szórása kisebb, mint 3,5 mm (Molnár *et al.*, 2012b).

A gömbökről készült mélységképen érdemes megfigyelni, hogy gömbök peremein nagyon kis terület (49. ábra) az, ahonnan nem érkezett vissza jel a beesési szög alacsony volta miatt, ráadásul az itt mért értékeket terhelő hibák nem kiugróan magas értékek. A tapasztalható hiányos pixelek jelentős része nem a beesési szög, hanem az optikai kitakarás miatt nem került leképezésre.



49. ábra. Gömbök mélységképe – a szenzor rossz beesési szögek mellett is ad eredményt

A gömbközpont-meghatározás többszöri megismétlését elvégezve látható, hogy a mérések jelentősen nem térnek el egymástól, és jól közelítik a valóságot (11. táblázat).

11. táblázat. Ismételt gömbmeghatározás

|        | X [mm] | Y [mm] | Z [mm] | R [mm] |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1      | 2807,9 | 309,8  | 281,0  | 148,3  |
| 2      | 2825,7 | 301,0  | 283,4  | 154,9  |
| 3      | 2822,4 | 302,0  | 287,9  | 152,6  |
| 4      | 2825,5 | 300,9  | 283,1  | 155,4  |
| 5      | 2814,9 | 302,0  | 282,3  | 150,6  |
| 6      | 2823,8 | 302,4  | 283,0  | 154,8  |
| 7      | 2821,6 | 300,7  | 283,3  | 153,3  |
| Átlag  | 2820,3 | 302,7  | 283,4  | 152,8  |
| Szórás | 6,552  | 3,218  | 2,135  | 2,621  |

#### 4.3.3.4. Abszolút pontossági vizsgálat

A vizsgálatok utolsó csoportja az abszolút pontossági vizsgálat, melynek során Faro Focus3D földi lézerszkennerek segítségével nyert pontfelhővel hasonlítottam össze a Kinect által előállított pontfelhőt. A különböző pontsűrűség miatt a kölcsönösen egyértelmű pontmegfeleltetés nem lehetséges, így többek közt a következő két megoldás kínálkozik: a pontfelhők illesztése ICP algoritmussal és a maradék ellentmondások meghatározása, illetve bizonyos objektumok illesztőpontként való felhasználása és az azok alapján történő transzformáció (Weinmann, 2011).

A vizsgálat során több álláspontból végeztem méréseket a gömbökre, és azok térbeli helyzetét vetettem össze a lézerszkennerek által szolgáltatott adatokkal.

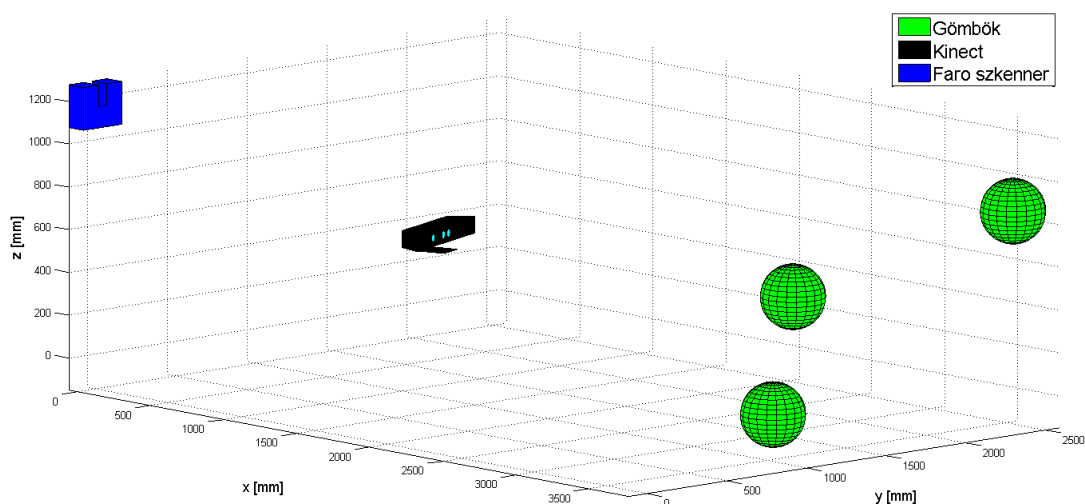
A minősítés ezen részéhez Faro Focus3D földi lézerszkennerek segítségével mérést végeztem három darab 152 mm sugarú gömbre, a Kinect szenzor burkolatára és a Kinect látómezijében található objektumokra (50. ábra). A Faro szkennerek pontossága a gyártó által meghatározott adatok szerint 10 méter alatti tárgytávolságok esetén 2 mm (Faro, 2013). Ezen adat és a jelentősen nagyobb pontsűrűség alapján – mely a gömbillesztés során a pontonkénti pontosság átlagolásával jelentős pontosságnövekedést eredményez – a lézerszkennerek eredményeit hibátlan méréseknek tekintem, és referenciaként használom.



50. ábra. Faro lézerszkenneres mérés a minősítéshez

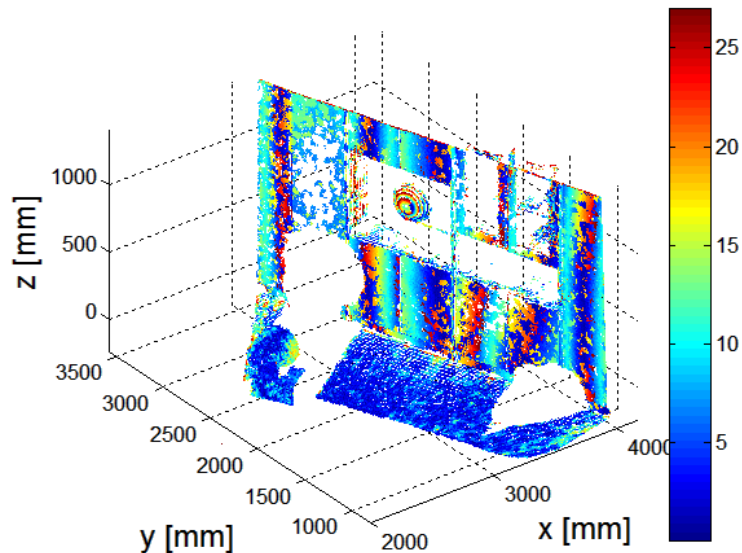
A lézerszkennő által nyert adatok feldolgozását és a gömbök koordinátáinak meghatározását a Faro Scene program segítségével hajtottam végre. Bár a program gömbillesztő eljárása nem dokumentált, a számítás a valósággal megegyező gömbsugarat (152 mm) adott eredményül.

Az ICP eljárás során lehetőség van a pontfelhők között nem megfeleltethető pontok, illetve a durva hibával terhelt illeszkedések szűrésére. Ez azért is szükséges, mert a Kinect és a lézerszkennelt pontfelhő sűrűsége jelentősen különbözik. Továbbá a lézerszkennelést végeztem a Kinect szenzor burkolatára is – az abszolút eltérés vizsgálatának lehetősége érdekében – azonban ezen pontoknak nincs megfeleltethető párjuk a Kinect pontfelhőben. Az ICP által számított transzformációs paraméterek segítségével a lézerszkennő és a Kinect műszerkoordináta-rendszere közti kapcsolat megteremthető (51. ábra).



**51. ábra. A gömbök, a lézerszkennő és a Kinect egy rendszerben ábrázolva**

Az ICP illesztés eredményeként a transzformáció maradék ellentmondásainak átlaga a két pontfelhő között 2,25 mm, a maximális eltérés 3,95 mm, az eltérések szórása 0,75 mm-re adódott (3 méteres átlagos tárgy távolság mellett). A hibák térbeli eloszlása jól szemlélteti a Kinect által szolgáltatott réteges pontfelhőt (52. ábra), a függőleges mintázat a ferde falsík és a rétegek metszéspontjai szerint ismétlődik.



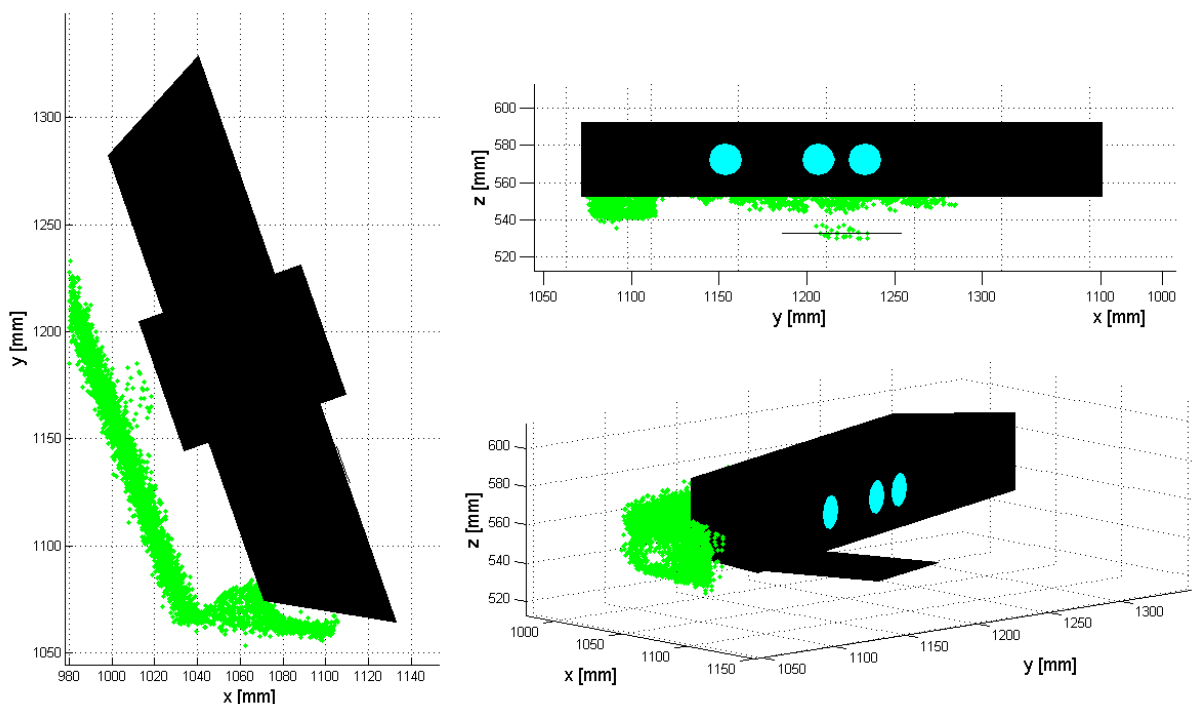
52. ábra. ICP illesztés maradék ellentmondásai

Az ICP illesztést több paraméterérték mellett is lefuttattam, melyek alapján jól látszik, hogy az illesztésbe nem vonható be a teljes pontfelhő, hiszen vannak pontok, amelyek nem találhatók meg mindkét állományban. A különböző pontsűrűség miatt a legközelebbi szomszédságon alapuló pont-pont távolság helyett kísérletet tettem a lézerszkennelt pontfelhő Delaunay-háromszögelését követő pont-felület távolság meghatározása alapján történő illesztésre, azonban ez utóbbi nem vezetett a pontosság növekedéséhez (12. táblázat). Az illesztésben nagyságrendileg 300 000 pontot (640×480) használtam fel, melyek közül az ICP algoritmus a maradék ellentmondások alapján választja ki az illesztésben ténylegesen részt vevő pontokat.

12. táblázat. Az ICP különböző paraméterekkel történő számításának eredménye

| Illesztés elve | Számításba bevont pontok aránya | Maradék ellentmondás [mm] | Maximális eltérés [mm] | Eltérések szórása [mm] |
|----------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| pont-pont      | 100%                            | 80,36                     | 515,00                 | 61,66                  |
| pont-felület   | 100%                            | 84,74                     | 421,21                 | 66,51                  |
| pont-pont      | 90%                             | 33,65                     | 131,32                 | 21,75                  |
| pont-felület   | 90%                             | 34,84                     | 152,25                 | 27,61                  |
| pont-pont      | 80%                             | 20,2                      | 47,79                  | 11,04                  |
| pont-felület   | 80%                             | 16,70                     | 47,17                  | 9,85                   |
| pont-pont      | 70%                             | 9,68                      | 22,89                  | 5,78                   |
| pont-felület   | 70%                             | 14,76                     | 27,03                  | 8,91                   |
| pont-pont      | 10%                             | 2,35                      | 3,82                   | 0,81                   |
| pont-felület   | 10%                             | 2,25                      | 3,95                   | 0,75                   |

Az abszolút pontossági vizsgálat keretében az ICP illesztés által meghatározott transzformációs paraméterek segítségével a Kinect mélységszenzorának vetítési középpontját átszámítottam a lézerszkennerek koordináta-rendszerébe. A lézerszkennerek által a szenzor burkolatáról rögzített pontok és a vetítési középpont burkolaton belüli közelítő pozíciója alapján a két pontfelhőben lehetséges a vetítési középpont összehasonlítása. Az így végzett összehasonlítás eredményeként az eltérés 3 centiméternek adódott, azonban látható, hogy a hiba fő komponense kameratengely irányú, mely a vetítési középpont helyének pontos ismeretének hiányából fakad (53. ábra).



**53. ábra. A Kinect abszolút hibája a lézerszkennelt pontfelhőhöz (zöld) viszonyítva (különböző nézetekből)**

A Faro Scene programmal meghatározott gömbi középpontok távolságai és a Kinect pontfelhőben azonosított, KvantFit eljárással meghatározott gömbi középpontok távolságai is összehasonlításra kerültek. Az összehasonlítást 30 álláspontban végeztem el (a több álláspontban készült mérések részletezése a 4.3.4.4. fejezetben olvasható), a középpontok távolságainak különbségei egyik esetben sem adtak nagyobb értéket 1,2 centiméternél.

#### **4.3.3.5. A pontossági vizsgálatok összegzése**

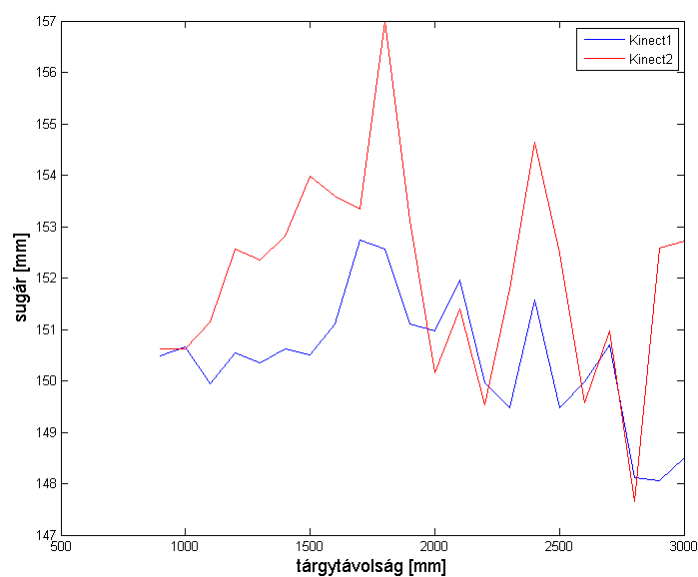
Méréseim során kíváncsi voltam arra is, hogy a Kinect pontossága mennyire eszközfüggetlen, ezért a méréseket különböző eszközökkel is elvégeztem. Annak érdekében, hogy a

lehetőségekhez képest ugyanazokat a mérési körülményeket biztosítsam, két Kinect szenzort helyeztem egymás fölé, és egyidejűleg végeztem méréseket (54. ábra).



54. ábra. Két Kinect a vizsgálat közben

Az összehasonlító görbe alapján látható, hogy a gömbmeghatározás pontossága nem tér el szignifikánsan (t-próbával vizsgálva, 95%-os konfidencia szinten  $p=1,00$ ), sőt, korreláció ( $R=0,98$ ) is megfigyelhető (55. ábra). Ennek oka a tárgy kerekítési határokhoz viszonyított elhelyezkedése lehet, mely a két gömbre a szenzorok és gömbök elhelyezéséből kifolyólag minden tárgytávolság esetén azonos.



55. ábra. Két Kinect összehasonlítása

A kidolgozott vizsgálatok a kvantálás okozta hatások figyelembevételére is fókuszálnak, azonban más eszközszer specifikus jellemzőt nem vesznek figyelembe, ezért azok általánosan alkalmasak mélységkamerák minősítésére. A vizsgálat gyakorlati megvalósítását a korábban leírtak alapján Kinect mélységkamerák segítségével hajtottam végre, melyek eredményeit az összehasonlíthatóság érdekében a 13. táblázat foglalja össze.

**13. táblázat. A mélységkamera minősítésének eredménye Kinect szenzor esetén (3 méter alatti tárgytávolság esetén)**

| 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                                  |

#### 4. TÉZIS

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

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

##### 4.3.4. Szenzorpozíció és trajektóriameghatározás

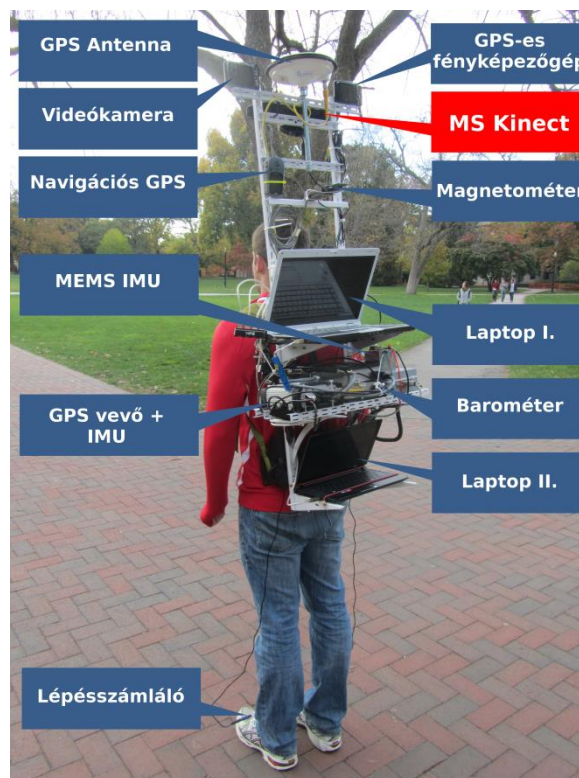
A mélységkamerák azon képessége, hogy nagy időbeni frekvenciával (~30 fps) képesek mintavételezni, lehetővé teszi időben változó felületek modellezését, illetve mozgó szenzor esetén a szenzorpozíció meghatározását és nagyobb terek automatikus felmérését. Mindkét esetben szükséges az egymást követő mélységképek közös rendszerbe történő transzformálása. Ez megoldható illesztőpontok, illetve a 4.2.3. fejezetben kifejtett pontfelhőillesztési algoritmusok segítségével. A látómezőben érzékelhető felületek homogenitása mindkét esetben csökkenti az illesztés pontosságát.

A homogenitás elkerülése érdekében is hatásos módszer jellegzetes alakzatok elhelyezése a látómezőben. Gömbök alkalmazása – tekintettel a Kinect kvantálási sajátosságaira – jó megoldásnak tekinthető, ráadásul azok illesztő- vagy kapcsolópontokként is felhasználhatóak.

A Kinect a mobil térképező rendszerekhez (Mobile Mapping System – MMS) hasonlóan, jellemzően nagy mennyiségű adatot gyűjt, ezek feldolgozása kézi módszerekkel nem megvalósítható, ezért automatizált térképező rendszert alakítottam ki, mely az érzékelő pillanatnyi helyének és helyzetének hátrametszés elvén alapuló meghatározását végzi, így leírható a mozgási trajektória, végül pedig lehetővé válik a pontfelhők egymáshoz illesztése.

#### 4.3.4.1. Motiváció

A mélységkamera segítségével való térképezést egy az Ohio Állami Egyetemen (The Ohio State University) folyó beltéri, emberi navigációs rendszer fejlesztésével foglalkozó kutatás ihlette, melynek célja, hogy azokon a helyeken is nagy pontosságú, helyhez kötött információt lehessen gyűjteni, ahol a szabadban alkalmazható műholdas helymeghatározás nem lehetséges. A kutatás célja továbbá a minél több érzékelővel történő adatgyűjtés (56. ábra) volt, melynek segítségével egyrészt a pillanatnyi érzékelő pozícióját határoztuk meg, másrészt a környezetről gyűjtöttünk információt (Zaydak *et al.*, 2012).



56. ábra. Adatgyűjtés személyi navigációhoz (Toth *et al.*, 2012)

#### 4.3.4.2. Gömbazonosítás és szegmentálás

Az automatizálás fontos lépése, hogy az illesztőpontok – jelen kutatás esetében gömbök – felismerése ne igényeljen emberi beavatkozást. Ezért algoritmust fejlesztettem a mélységkép

alapján való objektumdetektálásra, mely nagy megbízhatósággal azonosítja a gömbök helyét, így lehetővé válik a mélységkép azon részeinek meghatározása, ahol illesztőpontok vannak. A gömbi pontok mélységképről történő leválogatását követően KvantFit algoritmussal lehetővé válik azok pontos helyének meghatározása.

A gömbök detektálásához a mélységképek – mint elérhető nyers mérési eredmények – feldolgozását vettem alapul. Az eljárásban a gömbillesztés KvantFit algoritmus segítségével történik, így az illesztőpont-detektálás esetében is az ott felhasznált eszköztár került alkalmazásra.

A monokróm mélységképen a – 4.3.2.2. fejezetben ismertetett – Canny-élkereső algoritmus fut, ugyanis a Sobel és egyéb élkereső algoritmusok igen töredezett éleket adnak eredményül, az azok alapján történő gömbazonosítás tapasztalataim szerint nem vezet megfelelő eredményre. A Canny-élkeresés paramétereit – a gradiens küszöbértékeket – úgy választottam meg, hogy azok minden esetben megfelelő eredményt szolgáltatassanak, így a  $K_1 = 0,04$ , illetve a  $K_2 = 0,016$  értékeket vettem fel.

Az élkeresés eredményeként kapott bináris képen a – 4.3.2.2. fejezetben ismertetett – Hough-transzformációt alkalmaztam. A Hough-transzformáció előnye, hogy az akkumulátortérben adódó lokális csúcsok értéke alapján az azonosított körök sorba rendezhetőek, így egy küszöbszám segítségével a nem egyértelmű körök kiszűrhetőek. A Hough-transzformáció során végzett gradiens számítás is paraméterezhető a Matlab megvalósítás (Mathworks – Imfindcircles, 2013) segítségével. Mivel a gömbök 4 méteres tárgy távolság esetén is legalább 10 pixel sugárral jelennek meg a mélységképen, így a Hough-transzformáció sugárra vonatkozó korlátja nem jelent nehézséget.

#### **4.3.4.3. Hátrametszés**

A szenzor helyének és helyzetének meghatározását illesztőpontok segítségével, hátrametszéssel oldom meg. Abból a körülményből kiindulva, hogy beltéri navigáció esetén főként sík területen zajlik a mozgás, az affin transzformációs paramétereiből a vízszintes ( $X$  és  $Y$ ) tengelyek menti elfordulást elhanyagolhatónak tekintem. A korábbi pontossági vizsgálatok alapján a Kinect által szolgáltatott adatok méretarányhelyesnek tekinthetőek, így a méretarány-tényezők egységnyi felvétele elfogadható. Ezen feltételezések mellett a helymeghatározás szabadságfoka négy (három eltolás és egy elforgatás), így a feladat

megoldásához két illesztőpont elegendő (a feladat egyértelműsége érdekében az illesztőpontok különböző  $Z$  magasságokban helyezkednek el). A számítást II. kiegyenlítési csoporttal (Detrekői, 1991) végzem el, bár szinguláris mátrixok a kiegyenlítés során nem valószínűsíthetőek, a normálegyenletek megoldásához – az 2.5. fejezetben részletezett – szinguláris érték szerinti felbontást használtam.

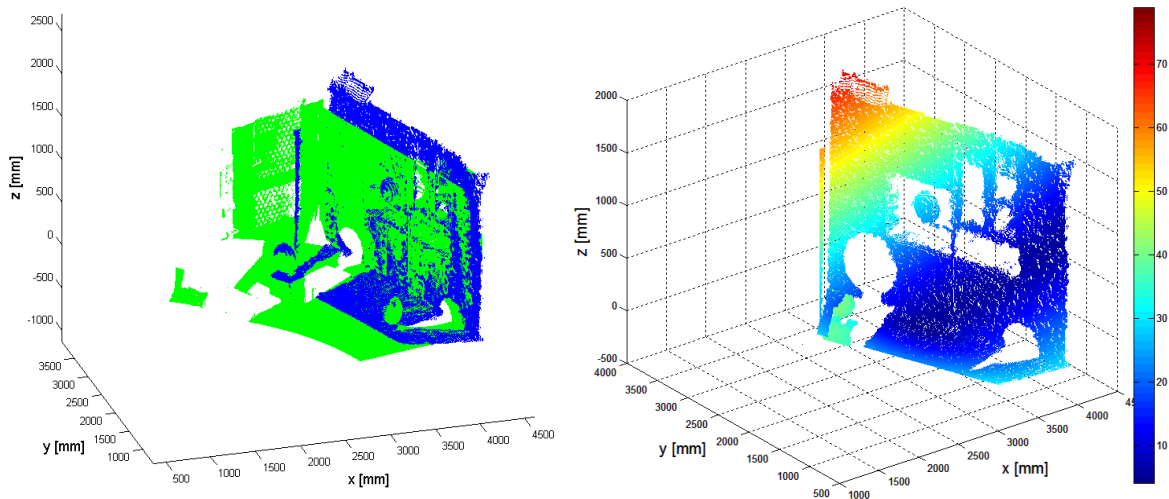
Álló helyzetben, mérések megismétlésével vizsgáltam a helymeghatározás pontosságát és stabilitását (14. táblázat).

**14. táblázat. Az ismételt hátrametszés eredménye**

|               | X [mm]        | Y [mm]        | Z [mm]        |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>1</b>      | 1448,8        | 1019,5        | -602,7        |
| <b>2</b>      | 1443,1        | 1007,9        | -596,1        |
| <b>3</b>      | 1459,9        | 995,7         | -608,6        |
| <b>4</b>      | 1466,0        | 995,7         | -607,8        |
| <b>5</b>      | 1448,8        | 1004,3        | -604,6        |
| <b>6</b>      | 1440,4        | 1032,5        | -596,2        |
| <b>7</b>      | 1442,2        | 1015,8        | -591,0        |
| <b>Átlag</b>  | <b>1449,9</b> | <b>1010,2</b> | <b>-601,0</b> |
| <b>Szórás</b> | <b>9,66</b>   | <b>13,39</b>  | <b>6,65</b>   |

A hátrametszés során meghatározott szenzorhelyzet, illetve a számítás során meghatározott transzformációs paraméterek segítségével a Kinect pontfelhő is transzformálható az illesztőpontok által definiált koordináta-rendszerbe (57. ábra). Az ábrán is látható, hogy a két pontfelhő az illesztőpontok által közrefogott területen jól illeszkedik, azokon kívül az apró elcsavarodás hatása a széleken megnő, így ott nagyobb hibák tapasztalhatóak. Az elcsavarodás elkerülhető az illesztőpontok számának növelésével, illetve azok jobb térbeli elhelyezésével. Az illesztőpont alapú és az ICP alapú pontfelhőillesztés forgatási mátrixa közti különbség ( $\Delta R$ ) minimálisnak tekinthető:

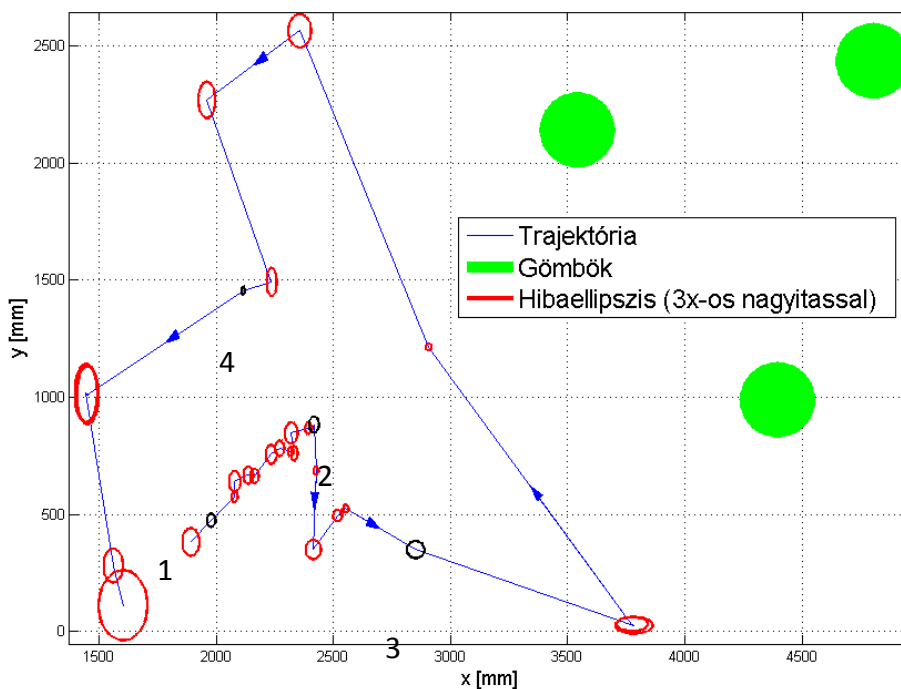
$$\Delta R = \begin{bmatrix} 1,0000 & -0,0001 & -0,0016 \\ 0,0001 & 1,0000 & -0,0007 \\ 0,0016 & 0,0007 & 1,0000 \end{bmatrix}. \quad (32)$$



57. ábra. Hátrametszés alapján transzformált (balra) Kinect pontfelhő és az eredeti lézerszkennelt pontfelhő valamint a két pontfelhő közötti eltérés (jobbra)

#### 4.3.4.4. Trajektóriameghatározás

Az időben változó szenzorpozíciók egy mozgási trajektória mentén helyezkednek el. Ha bizonyos mintavételezési frekvenciával meghatározható a szenzor helye, akkor a valódi trajektória jól közelíthető. Ezen megfontolás alapján végezhető el a Kinect által a személyi navigáció és térképezés. A szenzor pozíciójának meghatározása a korábban bemutatott eljárás alapján történt, igyekeztem a mérés során a pontosságra nézve várhatóan veszélyes helyek – kevés illesztőpont, a mélységképnek csak kis részén megjelenő illesztőpontok, képsarkokon megjelenő illesztőpontok – mentén mozgatni a szenzort (58. ábra).



58. ábra. Meghatározott trajektória

A kiegyenlítés során a négy transzformációs paraméter –  $X$ ,  $Y$  és  $Z$  irányú eltolás, valamint  $Z$  tengely körüli elforgatás – középhibája alapján lehetséges a meghatározás minősítése. A méréseket a trajektóriameghatározás esetében is hét alkalommal ismételttem a szórás kiszámíthatósága és a minősítés érdekében (15. táblázat). Jól látható, hogy a helymeghatározás másfél centiméter alatti középhibával oldható meg.

15. táblázat. A meghatározott trajektória egyes pontjai és azok középhibái

|   | X [mm] | Y [mm] | Z [mm] | $\kappa$ [°] | $\mu_x$ [mm] | $\mu_y$ [mm] | $\mu_z$ [mm] | $\mu_\kappa$ [°] |
|---|--------|--------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| 1 | 1978,6 | 475,2  | -653,7 | 24,4         | 6,5          | 9,9          | 3,4          | 0,2              |
| 2 | 2417,5 | 883,3  | -657,4 | 26,7         | 7,5          | 11,8         | 4,8          | 0,3              |
| 3 | 2850,7 | 349,6  | -848,5 | 45,9         | 13,2         | 12,5         | 6,3          | 0,4              |
| 4 | 2114,3 | 1455,0 | -839,0 | 10,4         | 3,1          | 6,4          | 1,9          | 0,2              |

## 5. TÉZIS

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

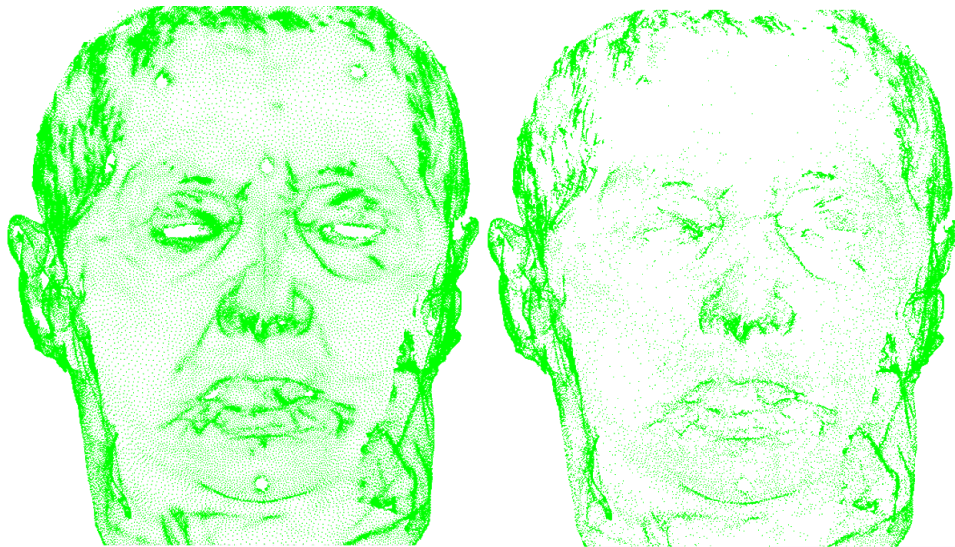
Kapcsolódó publikációk: Molnár és Toth, 2013a; Molnár és Toth, 2013b; Molnár *et al.*, 2012b

## 5. Kitekintés a humánmorfológia világába

A humánmorfológiai mérések az orvoslás több területén is nagy jelentőséggel bírnak. Az emberi test alakjának és mozgásának modellezése új lehetőségeket kínál az orvostudomány számára. A mozgások elemzése nagy előrelépést jelenthet különböző balesetek utáni rehabilitációk során éppúgy, mint sportolók számára a leghatékonyabb mozgás kialakításában. Ugyanígy fontos szakterület a plasztikai sebészet, mely a veleszületett vagy későbbi sérülések következtében kialakult rendellenességek korrekációjában, illetve az esztétikai beavatkozások terén nyújt segítséget sokak számára. Mindkét esetben nagyon fontos az emberi test morfológiájának ismerete. Az anatómia tudományának metrikus adatokkal való kiegészítésére tehát számos területen mutatkozik igény.

A humánmorfológiai mérések egyik ága az arckonstrukció, mely az emberi arc morfológiájának – általában koponyacsont alapján történő – helyreállításával foglalkozik (Gerasimov, 1971; Vanezisa *et al.*, 2000; Molnár *et al.*, 2010). Az arckonstrukciót gyakorta alkalmazzák régészeti leletek vizsgálatakor vagy igazságügyi eljárások folyamán, de természetesen orvosi beavatkozások során is. A sikeres arckonstrukcióhoz szükséges valamilyen modell használata, mely származhat egy korábbi mintavételből, vagy antropológiai alkalmazások esetén több ember arcáról készült nagy elemszámú adatbázis alapján. Az arc felületmodelljén kívül az adatbázisban szerepelnie kell a koponya modelljének is, mely CT és MR felvételek alapján gyűjthető (Molnár *et al.*, 2008).

A sikeres arckonstrukció egyik kulcsa, hogy mekkora elemszámú adatbázis áll rendelkezésre. Az adatgyűjtés és -tárolás éppen ezért előzetes kutatások alapján történhet. Az emberi arc tagoltabb, nagyobb felületi görbülettel rendelkező részein több adatra van szükség (jellemző pontok), míg egyes területeken a pontok bizonyos hányada elhagyható (Varga *et al.*, 2008) (59. ábra), ami az adattárolás és -feldolgozás szempontjából jelent nagy könnyebbséget.



**59. ábra. Emberi arc pontfelhője (balra) és annak görbületei alapján történt szűrésének (39%) eredménye (jobbra) (Varga et al., 2008)**

A BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszékén kutatás indult az emberi arc automatikus morfológiai mérésére, melynek végeredménye az arc térbeli modellezése. Kutatásaim során lehetőségem nyílt több jeles magyar történelmi személyiség – mint például Janus Pannonius, Szent László, illetve Széchenyi Pál érsek (60. ábra) – arcreekonstrukciós vizsgálataiban részt venni.



**60. ábra. Janus Pannonius (balra), Szent László (középen) és Széchenyi Pál érsek (jobbra) arcreekonstrukciós mérése**

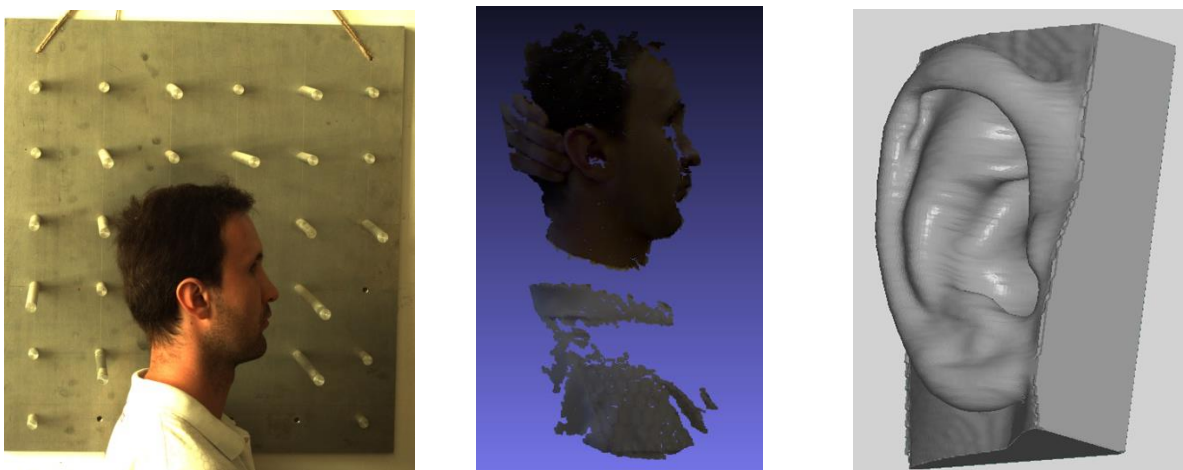
A kutatás részeként az automatikus modellalkotás két fontos elemével foglalkozom: a modellalkotás folyamatában előnyt jelentő előzetes értékek mélységkamerák segítségével történő meghatározásával, illetve a 3.1.1. fejezetben bemutatott fotogrammetriai úton történő számítási algoritmussal. A folyamat során mélységképek és színes képek készítésén keresztül, a fotogrammetria módszerével határozzuk meg a felület alakját. Az előzetes értékek jelen esetben a modellezendő felület közelítő ismeretét jelentik, ami egyrészt a

modell számítása során használható fel kezdeti értéként, másrészt az összetartozó képpontok képeken történő azonosításában jelent segítséget.

Az optikai szkennerek esetében különböző mintázatú strukturált fény vetítése mellett ismételt mérések segítségével oldják meg a homogén textúrájú felületek esetén a pontpárok azonosítását. Az ismételt mérések gyorsan változó felületek esetén, mint például az emberi arc, nem szolgáltat kielégítő eredményt. Hasonlóan a mélységkamerák azok alacsony pontossága miatt csak ismételt mérések mellett alkalmasak a megfelelő modell előállítására (Menna *et al.*, 2012; Boehm, 2012). A feladat megoldására a mélységkamerák és a fotogrammetria együttes alkalmazása és feldolgozása ad lehetőséget.

A képpont-párok keresésére (image matching) általánosan alkalmazott a SIFT algoritmus (Scale-Invariant Feature Transform – Méretarány-független objektumtranszformáció) (Lowe, 1999), mely jó metrikával jellemzi a képpontok azonosságát. A pontpárok keresése jellemzően epipoláris egyenesek mentén történik, hogy a keresési idő csökkenthető legyen. A mérendő felület előzetes ismerete lehetőséget ad a keresési terület további csökkentésére, ezért a mélységkamera által szolgáltatott előzetes modell jelentősen segíti az arcrekonstrukciós méréseket.

Az arcrekonstrukciós kutatások keretében fülimplantátum beültetéséhez készítettem modelleket (61. ábra), melyekhez a bemutatott fotogrammetriai mérőrendszert használtam, Kinect által szolgáltatott előzetes adatokból kiindulva.



**61. ábra. Az arcrekonstrukciós mérés (balra), az előzetes modell (középen) és a modellezett fül (jobbra)**

## 6. Összefoglalás

Kutatásaim során a fotogrammetria és a mélységkamerák segítségével történő térmodell előállítását vizsgáltam. A térbeli modellezés két fő jellemzője a pontosság valamint a felmérési és feldolgozási időigény. A pontosság tekintetében megkülönböztetünk elméleti és gyakorlati pontosságot. A valóságban méréseinket gyakran terhelik durva hibák, melyek hatásának csökkentése fontos feladat. A méréseket szabályos hibák is terhelik, melyek szintén jelentős hatással vannak az elérhető pontosságra, de megfelelő mérés technikával vagy utólagos számítással ennek mértéke csökkenthető. A feldolgozáshoz szükséges időigény optimalizálása két paraméter mentén történhet: elsősorban az emberi időráfordítás csökkentésével, másodsorban az automatizált számítás idejének csökkentésével.

Fotogrammetriai elveken nyugvó térbeli rekonstrukciós eljárást terveztem, mely a durva hibák hatását minimalizálja. Az eljárásban használt Direkt Lineáris Transzformáció lehetővé teszi bármely kamera, így nem kalibrált kamerák használatát is. A fotogrammetriai számítások stabilitását a gyakran előforduló szinguláris alakmátrixok csökkentik, így a megalkotott eljárás stabilitását SVD szerinti megoldással növeltem. A mérések végrehajtásához web alapú kiértékelő alkalmazást hoztam létre, mely segíti a fotogrammetria hétköznapi elterjedését és annak könnyű használatát az internet segítségével helyhez kötöttség nélkül.

Kutatásaim során vizsgáltam a mélységkamerák világát, mely alapján kijelenthető, hogy napjainkra a mélységkamerákat pontosságuk alkalmassá teszi a mérnöki célokra való felhasználásra. Az MS Kinect szenzor elemzése során tapasztaltam a kerekítésből adódó réteges pontfelhő képződést, mely az adatrögzítés szabályos hibájaként – modellhibaként – értelmezhető. A modellhibából adódóan a homogén térbeli eloszlásra építő illesztési eljárások nem alkalmazhatóak, ezért új eljárást dolgoztam ki. Gömbök esetén jelentős pontossági növekedést értem el a KvantFit eljárással, melynek köszönhetően három méteres tárgy távolság alatt vált lehetővé a centiméter alatti középhibájú modellezés. Az általam elért eredmények alapján a gömb illesztőpontok detektálása és térbeli helyzetének meghatározása nagy pontossággal végrehajtható, így azok beltéri navigációs és térképezési feladatok során jól alkalmazhatóak. Fontos felhasználási területet jelent a robotika, melynél a valós idejű képelemzés és modellalkotás kiemelt jelentőséggel bír. Az általam kidolgozott

pontossági vizsgálati sor lehetőséget biztosít a mélységkamerák összehasonlítására, mely jól alkalmazható ipari feladat során alkalmazandó céleszköz kiválasztásakor.

A mélységkamerák által alkotott térbeli modellek jól alkalmazhatóak kiindulási adatként a robosztus fotogrammetriai mérések során, így a modellalkotás pontossága növelhető és feldolgozási ideje jelentősen csökkenthető.

### **1. TÉZIS**

*A térkiértékelésre szolgáló Direkt Lineáris Transzformáció (DLT) módszerét robosztus 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 szerverkliens 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 publikáció: 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 tárgytávolság mellett, Microsoft Kinect szenzor alkalmazása esetén centiméter alatti középhiba érhető 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 valós idejű, centiméter pontosságú trajektóriameghatározást tesz lehetővé.*

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

## **7. Köszönetnyilvánítás**

Elsősorban szeretnék megemlékezni kutatói munkám irányítójáról, témavezetőmről, Dr. Detrekői Ákosról, aki iránymutatásaival és kritikáival segítette disszertációm elkészültét. Sajnos segítsége eredményét nem érhettem meg.

Szeretném megköszönni továbbá Dr. Fekete Károlynak az orvosi fotogrammetria világa felé való terelését és segítő munkáját.

Köszönettel tartozom továbbá Dr. Tóth Károlynak a The Ohio State University – Center for Mapping intézetében eltöltött időért, a mélységkamerákkal való megismerkedés lehetőségéért és az azóta is tartó támogató munkájáért.

További köszönet illeti Dr. Barsi Árpádot a témavezetői feladat átvételéért és az átfogó szakmai irányításért.

Köszönettel gondolok a disszertációm elkészültét szakmai irányítás helyett lelkesítéssel és biztatással támogató családomra.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” című. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR–2010-0002 program támogatja.

## Hivatkozások

1. Abdel-Aziz Y. I., Karara H. M. (1971): Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates, ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry, Urbana, Illinois, pp. 1-18.
2. Atherton T. J., Kerbyson D. J. (1999): Size invariant circle detection, Image and Vision Computing, Vol. XVII, Issue 11, pp. 795-803.
3. Atkinson K. B. (1996): Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing, Latheronwheel, Scotland, UK, p. 384.
4. Axelsson P. (2000): DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIII-B4/1, pp. 110-117.
5. Barsi Á., Berényi A., Lovas T. (2011): Valószínűségi eloszlások földi lézerszkenneres prizmaméréseknél. Geomatikai Közlemények, XIII/2 kötet, pp. 81-86.
6. Barsi Á., Mélykúti G. (1999): Épülethomlokzat kiértékelés digitális környezetben, Geodézia és Kartográfia, LI kötet 5. szám, pp. 8-14.
7. Besl P., and McKay H. (1992): A method for registration of 3-D shapes, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. XIV, pp. 239-256.
8. Bey A., Chaine R., Marc R., Thibault G., Akkouche S. (2011): Reconstruction of Consistent 3D CAD Models from Point Cloud Data Using a Priori CAD Models, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-5/W12, pp. 289-294.
9. Blais F. (2004): Review of 20 Years of Range Sensor Development, Journal of Electronic Imaging, Vol 13/1, pp. 231-243.
10. Boehm J. (2012): Natural User Interface Sensors for Human Body Measurement, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B3, pp. 531-536.
11. Bookstein F. (1979): Fitting conic sections to scattered data, Computer Graphics and Image Processing, Vol. IX Part 1, pp. 56-71.
12. Bopp H., Kraus H. (1978): An Orientation and Calibration Method for Non-Topographic Applications, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. XLIV Part 9, pp. 1191-1196.
13. Boulaassal H., Landes T., Grussenmeyer P. (2011): Reconstruction of 3D Vector Models of Buildings by Combination of ALS, TLS and VLS Data, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-5/W16, pp. 239-244.
14. Brolly G., Király G. (2011): Automatizált törzstérképezés földi lézerszkennelés adatainak objektum-orientált feldolgozásával, Geomatikai Közlemények, XIV/1 kötet, pp. 139-148.
15. Burch J. M., Forno C. (1984): Progress with the NPL Centrax Camera System, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Rio, Vol. XXV Part V, pp. 149-150.
16. Canny J. (1986): A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. VIII Part 6, pp. 679-698.

17. Chang Y.-J., Chen S.-F., Huang J.-D. (2011): A Kinect-based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities, *Research in Developmental Disabilities*, Vol. XXXII Issue 6, pp. 2566-2570.
18. Chen Y., Medioni G. (1992): Object modeling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing (IVC)*, Vol. 10, Issue 3, pp. 145-155.
19. Chernov N., Lesort V. (2005): Least Squares Fitting of Circles, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, Vol. XXIII Issue 3, pp. 239-252.
20. 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.
21. Clouse D. (2002): Estimating the Position of a Sphere from Range Images, *Aerospace Conference Proceedings, IEEE*, Vol. V, pp. 2193-2204.
22. Coxeter H. S. M. (1986): *Projektív geometria*, Gondolat, Budapest, p. 180.
23. Delaunay B. N. (1934): Sur la sphère vide. In: *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR* 7, Nr. 6, pp. 793-800.
24. Des Bouvrie, B. (2011): *Improving RGB-D Indoor Mapping with IMU data*, Diplomamunka, Delft University of Technology, Netherlands, p. 66.
25. Detrekői Á. (1991): *Kiegyenlítő számítások*, Tankönyvkiadó, Budapest, p. 685.
26. Eckart C., Young G. (1936): The approximation of one matrix by another of lower rank, *Psychometrika*, Vol. I Part 3, pp 211-218.
27. El-laithy R. A., Huang J., Michael Yeh M. (2012): Study on the Use of Microsoft Kinect for Robotics Applications, *Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012 IEEE/ION*, pp. 1280-1288.
28. Fekete K. (2006): *Közelfotogrammetria és néhány orvosi alkalmazása*, PhD értekezés, Budapest, p. 111.
29. Fekete K. (2010): Fotogrammetriai hálózatok súlykoefficiens mátrixai, *Geomatikai Közlemények*, XIII/1 kötet, pp. 35-38.
30. Fellbaum M. (1996): PROMPT - A New Bundle Adjustment Program using Combined Parameter Estimation, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXI-B3, pp. 192-195.
31. Fischler M. A., Bolles R. C. (1981): Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Comm. of the ACM*, Vol. XXIV Issue 6, pp. 381-395.
32. Fraser C.S. (1996): *Network design*, in: *Atkinson: Close-range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing UK, pp. 256-282.
33. Gander W., Golub G. H., Strelbel R. (1994): Least-squares fitting of circles and ellipses, *BIT Numerical Mathematics*, Vol. XXXIV Issue 4, pp 558-578.
34. Gass S. I., Witzgall C., Harary H. H. (1998): Fitting Circles and Spheres to Coordinate Measuring Machine Data, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. I Issue 1, pp. 5-25.
35. Gerasimov M. M. (1971): *The Face Finder*, Hutchinson, p. 199.

36. Grussenmeyer P., Drap P. (2001): Possibilities and limits of Web photogrammetry - Experiences with the ARPENTEUR web based tool, Heidelberg, Photogrammetric Week 01, Wichmann Verlag, pp. 275-282.
37. Guo W., Du T., Zhu X., Hu T. (2012): Kinect-based real-time RGB-D image fusion method, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B3, pp. 275-279.
38. Haralick R., Shapiro L. (1992): Computer and Robot Vision, Vol. I, Addison-Wesley, p. 630.
39. Hartzell P. J., Glennie C. L., Finnegan D. C. (2013): Calibration of a terrestrial full waveform laser scanner, ASPRS 2013 Annual Conference, Baltimore, Amerikai Egyesült Államok, 2013.03.24-2013.03.28.
40. Hatze H. (1988): High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach, Journal of Biomechanics, Vol. XXI, pp. 533-538.
41. Hough P.V.C. (1959): Machine Analysis of Bubble Chamber Pictures, Proc. Int. Conf. High Energy Accelerators and Instrumentation, Vol. VII, pp. 554-556.
42. Hu T., Zhu X., Guo W., Dai Y. (2013): Data fusion method based on Kinect depth images, ASPRS 2013 Annual Conference, Baltimore, Amerikai Egyesült Államok, 2013.03.24-2013.03.28.
43. Huber P. J. (1981): Robust Statistics, John Wiley & Sons, New York, p. 312.
44. Jancsó T. (2006): Nemlineáris modellek fotogrammetriai alkalmazása a geokörnyezettudományban, Doktori értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem Soproni Egyetemi Karok, p. 140.
45. Kahlmann T., Remondino F., Ingensand H. (2006): Calibration for increased accuracy of the range imaging camera SwissRanger, ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', Dresden, Germany, pp. 136-141.
46. Kang Z. (2008): Automatic Registration of Terrestrial Point Cloud Using Panoramic Reflectance Images, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII. Part B5, pp. 431-436.
47. Karara H. M. (1989): Non-Topographic Photogrammetry, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Virginia, p. 445.
48. Kawashima K., Kanai S., Date H. (2011): Automatic Recognition of a Piping System from Large-Scale Terrestrial Laser Scan Data, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-5/W12, pp. 283-288.
49. 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.
50. Király G., Brolly G., Márkus I. (2007): Földi lézerszkennelés alkalmazása egyes fák vizsgálatára, Geomatikai Közlemények, X. kötet, pp. 241-250.
51. Kitamura K., Kochi N., Kaneko S. (2012): Automated Feature Based TLS Data Registration for 3D Building Modeling, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B5, pp. 205-210.
52. Kraus K. (1998): Fotogrammetria, Tertia Kiadó, Budapest, p. 386.

53. Krauter A. (1995): Geodézia, Műegyetem Kiadó, Budapest, p. 372.
54. Kustár Á. (2004): Humán morfológiai variációk az arcon és a koponyán - A koponya és az arc morfológiai összefüggéseinek alkalmazása a plasztikus arcrekonstrukcióban, PhD disszertáció.
55. Laky S. (2012): Metaheurisztikus optimalizáció a geodéziában, Doktori értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, p. 115.
56. Laky S., Zaletnyik P., Toth C., Molnar B. (2012): Sparse Representation of Full Waveform LiDAR Data, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2012: Remote Sensing for a Dynamic Earth, München, Németország, 2012.07.22-2012.07.27, pp. 7496-7499.
57. Lange R. (2000): 3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS/CCD Technology, PhD. értekezés, University of Siegen, p. 223.
58. Lari Z., Habib A. F., Kwak E. (2011): An Adaptive Approach For Segmentation of 3D Laser Point Clouds, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-5/W12, pp. 103-108.
59. Lee W.-J., Wilkinson C. M., Hwang H.-S. (2012): An Accuracy Assessment of Forensic Computerized Facial Reconstruction Employing Cone-Beam Computed Tomography from Live Subjects, Journal of Forensic Sciences, Vol. 57, pp. 318-327.
60. Lovas T., Berényi A., Barsi Á. (2012): Lézerszkennelés. Terc kiadó, Budapest, p. 166.
61. Lowe D. G. (1999): Object recognition from local scale-invariant features, Proceedings of the International Conference on Computer Vision, Vol. II, pp. 1150-1157.
62. Luhmann T. (2000): Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, p. 586.
63. Lukács G., Martin R., Marshall D. (1998): Faithful Least-Squares Fitting of Spheres, Cylinders, Cones and Tori for Reliable Segmentation, Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision, Vol. I, pp. 671-686.
64. 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.
65. Markiel N., Toth C. K., Grejner-Brzezinska D. A. (2008): An Algorithm for Automated Feature Extraction from Laser Ranging Data, ASPRS PECORA Conference, Denver, CO, November 19-21.
66. Menna F., Remondino F., Battisti R., Nocerino E. (2011): Geometric investigation of a gaming active device, Proc. SPIE 8085, Videometrics, Range Imaging, and Applications XI, Vol. 80850G (June 21, 2011).
67. Molnár B. (2008): Optikai szkennelők építése arcrekonstrukciós célokra, Doktori kutatások a BME Építőmérnöki karán. Budapest Budapest, Magyarország, pp. 1-7, In print.
68. Molnár B., Schrott P., Fekete K. (2008): Comparative accuracy survey of 3D medical models made by photogrammetric, CT and scanning methods, Proceedings of the Third Hungarian Conference on Biomechanics, Budapest, Magyarország, 2008.07.04-2008.07.05., pp. 211-216.

69. Molnár B. (2010a): Developing a web based photogrammetry software using DLT, *Pollack Periodica* Vol. V Number 2/Aug 2010, pp. 49-56.
70. 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.
71. Molnár B. (2010c): Web alapú fotogrammetriai alkalmazás pontossági vizsgálata, *Geomatikai Közlemények*, XIII/2 kötet, pp. 101-106.
72. Molnár B. (2010d): Robosztus becslést és DLT-t alkalmazó web alapú fotogrammetriai alkalmazás fejlesztése, *Geomatikai Közlemények*, XIII/1 kötet, pp. 91-95.
73. Molnár B. (2010e): Robosztus becslések használata web alapú fotogrammetriai kiértékeléshez, *Geodézia és Kartográfia*, LXII kötet 1. szám, pp. 24-27.
74. Molnár B., Fekete K., Schrott P. (2010): Human morphologic measurements by photogrammetry, *Biomechanica Hungarica*, Vol. III Part 1, pp. 159-163.
75. 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.
76. 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, 2012.10.29-2012.11.01.
77. Molnár B., Toth C. K. (2013a): MS Kinect - Flash LiDAR pontossági vizsgálat és gömbillesztés, *Geomatikai Közlemények*, XVI/1 kötet, In print.
78. 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.
79. Oggier T., Lehmann M., Kaufmann R., Schweizer M., Richter M., Metzler P., Lang G., Lustenberger F., Blanc N. (2003): An All-Solid-State Optical Range Camera for 3D Real-Time Imaging with subCentimeter Depth Resolution (SwissRanger™), *Proceeding of the SPIE*, Vol. 5249, pp. 634-645.
80. Rabbani T., van den Heuvel F. (2005): Automatic Point Cloud Registration Using Constrained Search for Corresponding Objects, *7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, pp. 177-186.
81. Rabbani T. (2006): Automatic Reconstruction of Industrial Installations Using Point Clouds and Images, *Publications on Geodesy 62*. Netherlands Geodetic Commission, Delft, May 2006, p. 175.
82. Rehány N. (2013): Összefüggő épületek külső modelljének előállítás és belső térrel való összekapcsolása lézershakennelt adatokból, *Diplomamunka*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, p. 83.
83. Rusinkiewicz S. , Levoy M (2001): Efficient Variants of the ICP Algorithm, *Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 145-152.
84. Schnabel R., Wahl R., Klein R. (2007): Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection, *Computer Graphics Forum*, Vol. XXVI Part 2, pp. 214-226.

85. Schrott P., Szabo Gy., Fekete K. (2008): Data Acquisition Possibilities for face Reconstruction Purpose. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B5, pp. 817-822.
86. Schrott P. (2010): Emberi arc fotogrammetriai felmérésének hálózattervezési kérdései, Geomatikai Közlemények, XIII/1 kötet, pp. 39-43.
87. Schrott P., Detrekői Á., Fekete K. (2012): Photogrammetric Network for Evaluation of Human Faces for Face Reconstruction Purpose, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B3, pp. 549-552.
88. Shakarji C. M. (1998): Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithmic testing system, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. CIII, pp. 633-640.
89. Shan J., Toth C. K. (szerk.) (2008): Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, CRC Press, p. 590.
90. 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.
91. Tóth Z. (2009): Az automatizáció lehetőségei a térinformatikai célú fotogrammetriai kiértékeléseknél, Doktori értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, p. 90.
92. Vanezisa P., Vanezisa M., McCombea G., Niblett T. (2000): Facial reconstruction using 3-D computer graphics, Forensic Science International, Vol. 108, Issue 2, pp. 81-95.
93. Varga E., Hegedűs I., Földváry L. (2008): Optimization of Density and Distribution of Stereograph Measurement Points for a Face, Proceedings of the Third Hungarian Conference on Biomechanics, Budapest, Magyarország, 2008.07.04-2008.07.05, pp. 387-394.
94. Vosselman G., Gorte B.G.H., Sithole G., Rabbani T. (2004): Recognising Structure in Laser Scanner Point Clouds, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLVI-8/W2, Freiburg, Germany, October 4-6, pp. 33-38.
95. Vosselman G., Maas H.-G. (szerk.) (2010): Airborne and Terrestrial Laser Scanning, CRC press, p. 318.
96. Wang J, Shan J. (2009): Segmentation of LiDAR Point Clouds for Building Extraction, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference, Baltimore, Maryland, March 9-13.
97. Weinmann M., Wursthorn S., Jutzi B. (2011): Semi-automatic image-based co-registration of range imaging data with different characteristics, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-3/W22, pp. 119-124.
98. Witzgall C, Cheok G. S., Kearsley A. J. (2006): Recovering Spheres from 3D Point Data, AIPR 35th, Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop (AIPR'06), pp. 1-6.
99. Woodall W. J., Bevilacqua D. (2012): Using the Microsoft Kinect for 3D Map Building and Teleoperation, Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012 IEEE/ION, pp. 1054-1061.
100. Ye, C., Bruch M. (2010): A visual odometry method based on the SwissRanger SR4000, Unmanned Systems Technology XII. Edited by Gerhart, Grant R.; Gage, Douglas W.; Shoemaker, Charles M. Proceedings of the SPIE, pp. 76921I-76921I-9.

101. Závoti J. (1999): A geodézia korszerű matematikai módszerei, Geomatikai Közlemények, II. kötet, pp. 1-149.
102. Zaydak A., Toth C. K., Grejner-Brzezinska D. A., Molnár B., Yi Y., Markiel J. N. (2012): 3D Image-based Navigation in Collaborative Navigation Environment, Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), Nashville, Amerikai Egyesült Államok, 2012.09.17-2012.09.21., pp. 2462-2468.

Internetes hivatkozások:

103. Apache (2013): <http://www.apache.org/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
104. Artec (2013): [http://www.artec3d.com/3d\\_scanners\\_for\\_professionals/artec-eva/specifications/](http://www.artec3d.com/3d_scanners_for_professionals/artec-eva/specifications/) (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
105. AutoDesk (2013): <http://www.123dapp.com/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
106. CSS (2013): <http://www.w3.org/Style/CSS/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
107. Debian (2013): <http://www.debian.org> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
108. Deyle T. (2010): <http://www.hizook.com/blog/2010/03/28/low-cost-depth-cameras-aka-ranging-cameras-or-rgb-d-cameras-emerge-2010> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
109. Faro (2013): <http://www.faro.com/site/resources/share/944> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
110. Github – SensorKinect (2013): <https://github.com/avin2/SensorKinect> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
111. iFixIt (2010) <http://www.ifixit.com/Teardown/Microsoft+Kinect+Teardown/4066/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
112. JavaScript (2013): <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/Ecma-262.pdf> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
113. Konolige K., Mihelich P. (2010): Technical description of Kinect calibration, [http://www.ros.org/wiki/kinect\\_calibration/technical](http://www.ros.org/wiki/kinect_calibration/technical), (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
114. MathWorks - Imfindcircles (2013): <http://www.mathworks.com/help/images/ref/imfindcircles.html> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
115. MathWorks (2013): <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
116. Mesa (2013): [http://www.mesa-imaging.ch/pdf/SR4000\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www.mesa-imaging.ch/pdf/SR4000_Data_Sheet.pdf) (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
117. Microsoft (2010): Kinect. <http://www.xbox.com/en-us/kinect/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
118. MySQL (2013): <http://www.mysql.com/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
119. Nathan C. (2011): <http://mathnathan.com/2011/02/depthvsdistance/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
120. Octave (2012): GNU Octave – A high-level interpreted language, primarily intended for numerical computations. <http://www.gnu.org/software/octave/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)

121. OpenKinect – Imaging Information (2013): [http://openkinect.org/wiki/Imaging\\_Information](http://openkinect.org/wiki/Imaging_Information) (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
122. OpenKinect (2013): [http://openkinect.org/wiki/Main\\_Page](http://openkinect.org/wiki/Main_Page) (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
123. OpenNi (2013): <http://www.openni.org/openni-programmers-guide/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
124. PHP (2013): <http://www.php.net> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
125. PrimeSense (2013): <http://www.primesense.com> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
126. Sárközy Ferenc (2002): [http://www.agt.bme.hu/tutor\\_h/presentationhu/0h.svg](http://www.agt.bme.hu/tutor_h/presentationhu/0h.svg) (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
127. SVG (2013): <http://www.w3.org/Graphics/SVG/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
128. Tóth Gy. (2004): Korszerű matematikai módszerek a geodéziában. Egyetemi egyzet, BME. Elérhetőség: <http://sci.fgt.bme.hu/~gtoth/doktmat/KorszeruMatematikaJegyzet.pdf> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
129. Veress K. (2007): A Newton és Gauss-Newton módszerek alkalmazása egyenletrendszerek megoldására és nemlineáris optimalizálásra (<http://www.inf.u-szeged.hu/~verkri/bin/newton-gauss.pdf>) (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
130. Wikipedia – Image sensor (2013): [http://en.wikipedia.org/wiki/Image\\_sensor](http://en.wikipedia.org/wiki/Image_sensor) (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
131. Wikipedia - Kinect (2013): <http://en.wikipedia.org/wiki/Kinect> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)
132. XHTML (2013): <http://www.w3.org/TR/xhtml1/> (legutóbbi hozzáférés: 2013.01.16.)

## Függelék

### 1. A Kinect alkotórészei

(<http://www.ifixit.com/Teardown/Microsoft+Kinect+Teardown/4066>)



## 2. A vizsgálat során használ Kinect szenzorok belső és kölcsönös tájékozási adatai ROS formátumban

|  |  |  |
|--|--|--|
| <pre>%YAML:1.0 rgb_intrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d   data: [ 5.1892733871102678e+002, 0., 3.1849379581497874e+002, 0., 5.1886071524176828e+002, 2.4295021261111077e+002, 0., 0., 1. ] rgb_distortion: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 5   dt: d   data: [ 2.0906851211864236e-001, -7.0090183035044706e-001, -2.8042944679986148e-003, -2.8757052744848047e-004, 7.1434782897138782e-001 ] depth_intrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d   data: [ 5.1892733871102678e+002, 0., 3.1849379581497874e+002, 0., 5.1886071524176828e+002, 2.4295021261111077e+002, 0., 0., 1. ] depth_distortion: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 5   dt: d   data: [ 2.0906851211864236e-001, -7.0090183035044706e-001, -2.8042944679986148e-003, -2.8757052744848047e-004, 7.1434782897138782e-001 ] R: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d   data: [ 1., 0., 0., 0., 1., 0., 0., 0., 1. ] T: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 1   dt: d   data: [ 0., 0., 0. ] R_extrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d</pre> | <pre>%YAML:1.0 rgb_intrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d   data: [ 5.2046921314750375e+002, 0., 3.1513453558445644e+002, 0., 5.2104839430094012e+002, 2.5121807345895257e+002, 0., 0., 1. ] rgb_distortion: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 5   dt: d   data: [ 2.2090942785580986e-001, -6.7806764294931754e-001, 4.1697714357013882e-003, 2.1089168729983795e-003, 6.8145985539730969e-001 ] depth_intrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d   data: [ 5.2046921314750375e+002, 0., 3.1513453558445644e+002, 0., 5.2104839430094012e+002, 2.5121807345895257e+002, 0., 0., 1. ] depth_distortion: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 5   dt: d   data: [ 2.2090942785580986e-001, -6.7806764294931754e-001, 4.1697714357013882e-003, 2.1089168729983795e-003, 6.8145985539730969e-001 ] R: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d   data: [ 1., 0., 0., 0., 1., 0., 0., 0., 1. ] T: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 1   dt: d   data: [ 0., 0., 0. ] R_extrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d</pre> | <pre>%YAML:1.0 rgb_intrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d   data: [ 5.1746459350494251e+002, 0., 3.1570135061546767e+002, 0., 5.1750676595373557e+002, 2.4942125996537837e+002, 0., 0., 1. ] rgb_distortion: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 5   dt: d   data: [ 2.1893438605996973e-001, -6.9199834837895702e-001, 2.1423483975973210e-003, 2.3477527963884897e-003, 6.9920963749450571e-001 ] depth_intrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d   data: [ 5.1746459350494251e+002, 0., 3.1570135061546767e+002, 0., 5.1750676595373557e+002, 2.4942125996537837e+002, 0., 0., 1. ] depth_distortion: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 5   dt: d   data: [ 2.1893438605996973e-001, -6.9199834837895702e-001, 2.1423483975973210e-003, 2.3477527963884897e-003, 6.9920963749450571e-001 ] R: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d   data: [ 1., 0., 0., 0., 1., 0., 0., 0., 1. ] T: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 1   dt: d   data: [ 0., 0., 0. ] R_extrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 3   dt: d</pre> |
|--|--|--|

|  |  |  |
|--|--|--|
| <pre> data: [ 1., 0., 0., 0., 1., 0., 0., 0., 1. ] T_extrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 1   dt: d   data: [ 0., 0., 0. ] rgb_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] raw_rgb_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] depth_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] raw_depth_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] depth_base_and_offset: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: f   data: [ 7.50000030e-002, 1090. ] </pre> | <pre> data: [ 1., 0., 0., 0., 1., 0., 0., 0., 1. ] T_extrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 1   dt: d   data: [ 0., 0., 0. ] rgb_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] raw_rgb_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] depth_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] raw_depth_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] depth_base_and_offset: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: f   data: [ 7.50000030e-002, 1090. ] </pre> | <pre> data: [ 1., 0., 0., 0., 1., 0., 0., 0., 1. ] T_extrinsics: !!opencv-matrix   rows: 3   cols: 1   dt: d   data: [ 0., 0., 0. ] rgb_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] raw_rgb_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] depth_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] raw_depth_size: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: i   data: [ 640, 480 ] depth_base_and_offset: !!opencv-matrix   rows: 1   cols: 2   dt: f   data: [ 7.50000030e-002, 1090. ] </pre> |
|--|--|--|

3. A még kimutatható legkisebb durva hiba képkoordináta-mérés esetén [px]:

|    | image00120120807.jpg |       | image00220120807.jpg |       | image00320120807.jpg |       | image00420120807.jpg |       |
|----|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| 1  | 3,820                | 3,84  | 3,959                | 4,182 | 4,042                | 4,698 | 3,981                | 4,159 |
| 2  | 3,676                | 3,688 | 3,876                | 3,844 | 3,976                | 3,936 | 3,867                | 3,872 |
| 3  | 3,624                | 3,485 | 3,776                | 3,646 | 3,869                | 3,743 | 3,803                | 3,666 |
| 4  | 3,605                | 3,622 | 3,789                | 3,789 | 3,878                | 3,887 | 3,784                | 3,815 |
| 5  | 3,665                | 3,546 | 3,802                | 3,702 | 3,905                | 3,785 | 3,852                | 3,708 |
| 6  | 3,846                | 3,922 | 4,045                | 4,103 | 4,134                | 4,230 | 4,018                | 4,146 |
| 7  | 3,691                | 3,911 | 3,891                | 4,068 | 3,990                | 4,135 | 3,870                | 4,248 |
| 8  | 3,636                | 3,65  | 3,768                | 4,098 | 3,86                 | 3,962 | 3,811                | 3,866 |
| 9  | 3,34                 | 3,384 | 3,479                | 3,531 | 3,56                 | 3,613 | 3,499                | 3,548 |
| 10 | 5,057                | 3,563 | 5,609                | 3,741 | 6,182                | 4,042 | 5,64                 | 3,984 |
| 11 | 3,403                | 3,388 | 3,54                 | 3,524 | 3,625                | 3,612 | 3,557                | 3,547 |
| 12 | 3,652                | 3,756 | 3,814                | 3,911 | 3,902                | 4,035 | 3,807                | 3,972 |
| 13 | 3,46                 | 3,442 | 3,608                | 3,595 | 3,691                | 3,687 | 3,626                | 3,621 |
| 14 | 3,375                | 3,389 | 3,522                | 3,542 | 3,604                | 3,614 | 3,538                | 3,547 |
| 15 | -                    | -     | 3,522                | 3,493 | 3,606                | 3,583 | 3,539                | 3,519 |
| 16 | 3,535                | 3,625 | 3,657                | 3,807 | 3,745                | 3,925 | 3,681                | 3,850 |
| 17 | 3,593                | 3,894 | 3,824                | 4,096 | 3,902                | 4,193 | 3,785                | 4,123 |
| 18 | 3,455                | 3,455 | 3,602                | 3,604 | 3,687                | 3,690 | 3,621                | 3,626 |
| 19 | 3,750                | 4,247 | 3,997                | 4,823 | 4,101                | 5,205 | 3,917                | 5,228 |
| 20 | 3,812                | 3,776 | 3,943                | 3,949 | 4,041                | 4,017 | 4,016                | 3,942 |
| 21 | 3,814                | 5,851 | 4,939                | 6,416 | 5,001                | 6,242 | 4,264                | 5,949 |
| 22 | 5,535                | 3,83  | 6,167                | 4,639 | 6,246                | 4,873 | 5,647                | 4,615 |
| 23 | 3,819                | 3,765 | 3,937                | 3,941 | 4,025                | 4,045 | 3,970                | 3,958 |
| 24 | 4,346                | 4,097 | 4,494                | 4,296 | 4,604                | 4,36  | 4,573                | 4,262 |
| 25 | 4,642                | 4,348 | 4,704                | 4,567 | 4,798                | 4,759 | 4,807                | 4,634 |

4. A mérésekre jutó fölösmérés hányad [db]:

|          | image00120120807.jpg |       | image00220120807.jpg |       | image00320120807.jpg |       | image00420120807.jpg |       |
|----------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| 1        | 0,707                | 0,700 | 0,716                | 0,707 | 0,719                | 0,755 | 0,716                | 0,706 |
| 2        | 0,763                | 0,758 | 0,747                | 0,759 | 0,743                | 0,758 | 0,759                | 0,757 |
| 3        | 0,785                | 0,849 | 0,787                | 0,844 | 0,785                | 0,839 | 0,784                | 0,844 |
| 4        | 0,794                | 0,786 | 0,781                | 0,781 | 0,781                | 0,778 | 0,792                | 0,780 |
| 5        | 0,768                | 0,821 | 0,776                | 0,819 | 0,770                | 0,820 | 0,765                | 0,825 |
| 6        | 0,697                | 0,671 | 0,686                | 0,666 | 0,688                | 0,657 | 0,703                | 0,660 |
| 7        | 0,757                | 0,675 | 0,741                | 0,678 | 0,738                | 0,687 | 0,757                | 0,719 |
| 8        | 0,780                | 0,774 | 0,79                 | 0,797 | 0,789                | 0,748 | 0,781                | 0,759 |
| 9        | 0,925                | 0,901 | 0,927                | 0,900 | 0,927                | 0,900 | 0,926                | 0,901 |
| 10       | 0,895                | 0,813 | 0,916                | 0,801 | 0,927                | 0,827 | 0,907                | 0,830 |
| 11       | 0,891                | 0,899 | 0,895                | 0,903 | 0,894                | 0,901 | 0,897                | 0,902 |
| 12       | 0,774                | 0,731 | 0,771                | 0,734 | 0,772                | 0,722 | 0,783                | 0,719 |
| 13       | 0,862                | 0,871 | 0,862                | 0,868 | 0,862                | 0,864 | 0,863                | 0,865 |
| 14       | 0,906                | 0,898 | 0,905                | 0,894 | 0,905                | 0,900 | 0,906                | 0,902 |
| 15       | -                    | -     | 0,904                | 0,92  | 0,903                | 0,915 | 0,906                | 0,916 |
| 16       | 0,825                | 0,785 | 0,839                | 0,774 | 0,838                | 0,763 | 0,837                | 0,765 |
| 17       | 0,799                | 0,68  | 0,767                | 0,669 | 0,772                | 0,668 | 0,792                | 0,667 |
| 18       | 0,864                | 0,864 | 0,865                | 0,864 | 0,864                | 0,863 | 0,865                | 0,863 |
| 19       | 0,734                | 0,757 | 0,702                | 0,785 | 0,699                | 0,813 | 0,739                | 0,822 |
| 20       | 0,710                | 0,724 | 0,721                | 0,719 | 0,719                | 0,728 | 0,703                | 0,73  |
| 21       | 0,709                | 0,899 | 0,800                | 0,906 | 0,800                | 0,893 | 0,743                | 0,883 |
| 22       | 0,871                | 0,704 | 0,870                | 0,788 | 0,863                | 0,797 | 0,857                | 0,774 |
| 23       | 0,707                | 0,728 | 0,724                | 0,722 | 0,725                | 0,718 | 0,72                 | 0,724 |
| 24       | 0,546                | 0,615 | 0,556                | 0,608 | 0,554                | 0,618 | 0,542                | 0,624 |
| 25       | 0,479                | 0,546 | 0,507                | 0,538 | 0,510                | 0,519 | 0,491                | 0,528 |
| <b>Σ</b> | <b>36,998</b>        |       | <b>38,999</b>        |       | <b>38,998</b>        |       | <b>38,999</b>        |       |