



Hálózat tervezési kérdések a közelfotogrammetriában

Dr. Fekete Károly

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

1. Bevezetés

A fotogrammetriának látszólag a tárgy távolság alapján történő csoportosítása a távol vagy űrfotogrammetria, légi fotogrammetria, közelfotogrammetria és mikrofotogrammetria. A közelfotogrammetria meghatározása különböző. *Kraus* szerint az 1–100 m közötti felvételi tartományból készült felvételek feldolgozását nevezzük így (*Kraus*, 1998). Más meghatározás 300 m-ben limitálja a tárgy távolságát a közelfotogrammetriában (*Karara*, 1989). *Karara* azonban kifejti azt a véleményét is ugyanott, hogy a nem topográfiai célú fotogrammetria elnevezést szerencsésebbnek tartja. A mi megítélésünk szerint mára a közelfotogrammetria (angolul: close-range photogrammetry) annyira elterjedt és az ISPRS (Nemzetközi Fotogrammetriai és Távérzékelési Társaság) megfelelő munkacsoportját is így nevezik, hogy a kifejezést a magyar szakirodalomban is meg kell tartani, de el kell szakadni attól, hogy a fotogrammetria ezen csoportosítása a tárgy távolság alapján történik. Ezt megerősíti az is, hogy nem lehet olyan tartományt mondani, ami ezaként módon, közmegegyezéssel definiálná a fotogrammetria ezen ágát. Mi úgy gondoljuk, hogy a fotogrammetriát a jellege szerint csoportosíthatjuk távol-, légi- és közelfotogrammetriaként. Állításunk igazolására összefoglaltuk a légi- és közelfotogrammetria legfontosabb, jellegbeli különbségeit (*Fekete*, 2004).

A közelfotogrammetriai hálózatokat pontjaikkal helyettesítjük. A hálózati pontokhoz hozzátartoznak a felvételi álláspontok, a felmérni kívánt objektum általában jelölt pontjai. A közelfotogrammetria mai tendenciája, hogy a felvételi álláspontokat többnyire nem határozzák meg, nem adnak azoknak koordinátákat a felmérés kezdetén, hanem csak az objektumon elhelyezett jelölt pontok közül néhánynak adnak a felmérés elején koordinátákat, ezek az illesztőpontok. A felvételezés ezután általában

ún. több álláspontú, konvergens hálózatokként történik. Ennek a megoldásnak a lényege, hogy az új pontot nem két képből, nem két közel párhuzamos metszéből, hanem több konvergens képből, több konvergens metszéből határozzák meg, amely megoldás már a geometriai szemléletünk alapján is pontosabb végeredményre kell, hogy vezessen.

A több álláspontú, konvergens hálózatok létrehozása óhatatlanul is felvet olyan kérdéseket, hogy honnan fényképezzünk, mivel fényképezzünk, milyen legyen a kép méretaránya, milyen legyen a hálózat geometriája stb. Ezek és az ezekhez hasonló kérdések a hálózat tervezés témakörébe sorolhatók. Jelen publikációkkal az a célunk, hogy beszámoljunk a témakör legfontosabb nemzetközi eredményeiről, és egyben említést tegyünk saját elvégzett munkánkról is.

2. Általában a hálózat tervezésről

Az 1960-as években jelent meg az igény a geodéziában a geodéziái mérések tervezésére. Ezen tervezés célja, hogy a hálózatok pontosságai, megbízhatóságai, gazdaságosságai stb. szempontokból feleljenek meg bizonyos előírt követelményeknek. A cél elérése érdekében megválaszthatók a hálózati paraméterek, mint a pontok helyei, a pontok jelölései, a mérendő mennyiségek, a mérésszám stb.

A mérések tervezésének alapvetően két módszere terjedt el: a *méretezésen*, valamint a *matematikai programozáson* alapuló módszerek. A méretezésen alapuló eljárások esetében a kiinduláskor felvesszünk valamilyen alakzatot, alkalmazott mérési technológiát, és megvizsgáljuk, hogy e feltételekkel az előírt követelményeknek meg tudunk-e felelni. Ha igen – és ez a megfelelés nem túl jó –, akkor befejezgetnek tekintjük a tervezést. Ha nem, akkor változtatunk a hálózati paramétereken, és ezt a folyamatot addig folytatjuk, míg el nem értük a szükséges eredményt.

A lineáris programozás alapfeladata, hogy a változók egy adott függvényének a szélsőértékét keressük bizonyos feltételek mellett. Az adott függvényt a matematikában célfüggvénynek nevezik. Ha a mellékfeltételek a változókra vonatkozó lineáris egyenlőtlenség rendszerrel adhatók meg, akkor az eljárás neve matematikai programozás (Rózsa, 1974). A fenti megfogalmazás alapján a hálózattervezési feladat a matematikai programozás témakörébe sorolható, hiszen a megfogalmazott célfüggvényt és feltételeket a következő alakban írhatjuk:

$$F_1G_1 + F_2G_2 + \dots + F_kG_k \rightarrow \min$$

$$G_1 \leq G_{1 \max}$$

$$G_2 \leq G_{2 \max}$$

$$\dots$$

$$G_k \leq G_{k \max} \quad (1).$$

Az (1) egyenletben

G_i a tervezési eljárásba bevont paraméterek,
 $G_{i \max}$ a paraméterekre vonatkozó elvárások,
 F_i arányossági tényezők.

A matematikai programozás általános megoldása rendkívül bonyolult folyamat. Ezért a geodéziában elsősorban a pontossági tervezés a hálózati tervezés fő területe, és Grafarend javaslatára (Grafarend, 1974) szokás a pontossági tervezési feladatokat csoportosítani.

A **0. rendű tervezés** célja a hálózati dátum optimális megválasztása szabad hálózatok esetében. Az angol elnevezésből (zero-order design) kapott mozaikszóval a szakirodalomban a szokásos neve: **ZOD**.

Az **1. rendű tervezés** célja a hálózati pontok helyzetének és a mérendő mennyiségeknek optimális meghatározása. Szokásos neve: **FOD**.

A **2. rendű tervezés** célja a mérések pontosságának optimális meghatározása. Szokásos neve: **SOD**.

A **3. rendű tervezés** célja valamely meglévő hálózat kiegészítő méréseinek optimális megválasztása a hálózat pontosságának növelése érdekében. Szokásos neve: **TOD**.

A **4. rendű tervezés** esetén mozgásvizsgálati hálózatok mérési időpontjainak optimális kiválasztása történik (Detrekői, 1991).

Az 1980-as évekre a közelfotogrammetriai feladatok közül elsősorban az ipari és mérnöki feladatok megkövetelték a hálózattervezési kér-

dések vizsgálatát (pl. Fraser, 1984; Grün, 1980; Hottier, 1976). Ekkorra kialakultak a közelfotogrammetriai hálózatépítés ma is érvényes elvei, a hálózatot általában már a több álláspontú konvergens hálózatok jelentették, a hálózatot annak pontjaival helyettesítették. A konkrét tervezési kérdések közül a legfontosabbak:

- kiválasztani a képméretarányt,
- meghatározni a kamera álláspontok számát,
- meghatározni a pontok jelölési módját,
- meghatározni a képkoordináták mérési pontosságát,
- meghatározni a kamera álláspontok helyét és azok relatív geometriáját oly módon, hogy az egyéb mérések tervezésére is figyelemmel kell lenni.

A pontossági tervezés Grafarend által megadott csoportjai a közelfotogrammetriában a következő jelentést kapták (Mason, 1994):

ZOD: a mért tárgypontokra vonatkozó optimális hálózati dátum megadása;

FOD: az optimális fényképezési elrendezés meghatározása;

SOD: a képkoordináták mérésének optimális pontosságának a megadása;

TOD: a hálózati pontok sűrítésének optimális megválasztása.

A közelfotogrammetriában az első-, másod- és harmadrendű tervezési feladatok az általánosan elterjedtek. A szakirodalomban általában a képkoordináták hibáját, mint szöghibát adják meg:

$$\sigma_a \approx \sigma / c \quad (2),$$

ahol

σ a képkoordináta hibája,
 σ_a a szöghiba,
 c a kameraállandó.

Ennek a megadási módnak a jelentősége az, hogy így a kameraállandótól és a tárgytávolságtól függetlenül lehet a különböző hibákat összehasonlítani.

3. Hálózatok minősítése

Az a tény, hogy a közelfotogrammetriai hálózatokat pontjaikkal helyettesítjük, azt is jelenti, hogy a hálózat meghatározása ezen pontok koordinátáinak a meghatározását jelenti, és azt is, hogy a hálózatok minősítése a pontkoordinátákhoz kötődik. A fotogrammetriai szakirodalom (pl. Karara, 1989) erre a célra három jellemzőt

használ: szabatoság (accuracy), pontosság (precision), megbízhatóság (reliability).

A pontosság ezen értelmezése azt jelenti, hogy a számítás végeredménye milyen közel van a „valódi” értékhez. Ha van elég fotogrammetriai szempontból hibátlanak tekinthető tárgyoldali pontunk, akkor a koordinátakülönbségek négyzetösszege egy globális képet ad az alkalmazott eljárásról:

$$\sigma_X^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_X} \Delta X_i^2}{n_X}; \quad \sigma_Y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_Y} \Delta Y_i^2}{n_Y}; \quad \sigma_Z^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_Z} \Delta Z_i^2}{n_Z} \quad (3),$$

ahol

$\sigma_X^2, \sigma_Y^2, \sigma_Z^2$ varianciák,
 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ koordinátakülönbségek,
 n_X, n_Y, n_Z darabszám.

A szabatoság becslése a paraméterek kovariancia mátrixának a vizsgálatából ered. A kovariancia mátrix megkapható közvetlenül a kiegyenlítésből a súlykoefficiens mátrixon keresztül. A diagonális elemek adják a paraméterek varianciáit, a főátlón kívüliek pedig a kovarianciákat. A kovariancia mátrixból előállítható egy korreláció mátrix. Ennek főátlója tartalmazza a középhibákat, a főátlón kívüli elemek pedig a paraméterek közötti korrelációs együtthatók. A korrelációs együttható értéke 0 és 1 között változik. Ha értéke 1, ez azt jelenti, hogy a két érték abszolút korrelált, ha 0, akkor független.

A szabatoság mértéke általában kapcsolatot ad a koordináta dátummal. A koordináták általában korreláltak, és a koordináta-rendszer elforgatása megváltoztatja a kovariancia mátrix főátlójában lévő elemeket, amelyek a pont koordinátáinak a varianciái. Ha kiszámítjuk a hibaellipszoidot, akkor a tengelyek hosszai jelentik a pont kovariancia mátrixának a sajátértékeit. Ha a pont koordinátái nem korreláltak, akkor a hibaellipszoid tengelyei párhuzamosak a koordináta-rendszer tengelyeivel és a hosszúságuk megegyezik a középhibákkal. A korreláció mértékét szögekkel is kifejezhetjük, mégpedig az ellipszoidi tengelyek és a koordináta-rendszer tengelyei által bezárt szögekkel. Az általános egysége lehet a szabatoságnak a különböző irányokból számított varianciák vagy a középhibák átlagos értéke az új pontokon.

A mérések belső megbízhatóságát a még kimutatható legkisebb durva hiba értékével jellemzik. Ez a mennyiség egyenesen arányos a mérés a priori középhibájával és fordítottan a mérésre

jutó ún. fölösmérés-hányaddal. Ha ennek a még kimutatható legkisebb durva hibának a hatását vizsgáljuk a koordinátákra, akkor megkapjuk az ún. külső megbízhatóságot.

Fenti angol szavak ilyen fordításai szokatlanok a magyar olvasó számára. A magyar szakirodalom ugyanis pontosságról és megbízhatóságról beszél. A közelfotogrammetriában viszont szükségesnek látszott egy koordináta-rendszertől független minősítést is megadni a hálózatoknak, mivel a koordináta-rendszer felvétele teljesen tetszőleges. Jelen publikációban az angol kifejezéseket azért adtam meg, hogy egyben vitaindítónak is számjам az általam javasolt elnevezéseket.

4. Tapasztalati úton történő pontossági tervezés

A képkoordináta mérés pontosságát analóg kameráknál meghatározza a komparátor és a kiértékelő vagy a digitalizáló. A digitális állományokét pedig a képfeldolgozás által kapott pontosság. Az így kapott értékekből, valamint a kamera faktoraiból és a hálózatra vonatkozó ismeretekből kaphatunk egy előzetes pontossági indikátort (Fraser, 1992; 1996):

$$A_1 = \bar{\sigma}_c / R \quad (4).$$

Az indikátor számlálója:

$$\bar{\sigma}_c = \frac{q}{\sqrt{k}} S \sigma = \frac{q}{\sqrt{k}} d \sigma_a \quad (5),$$

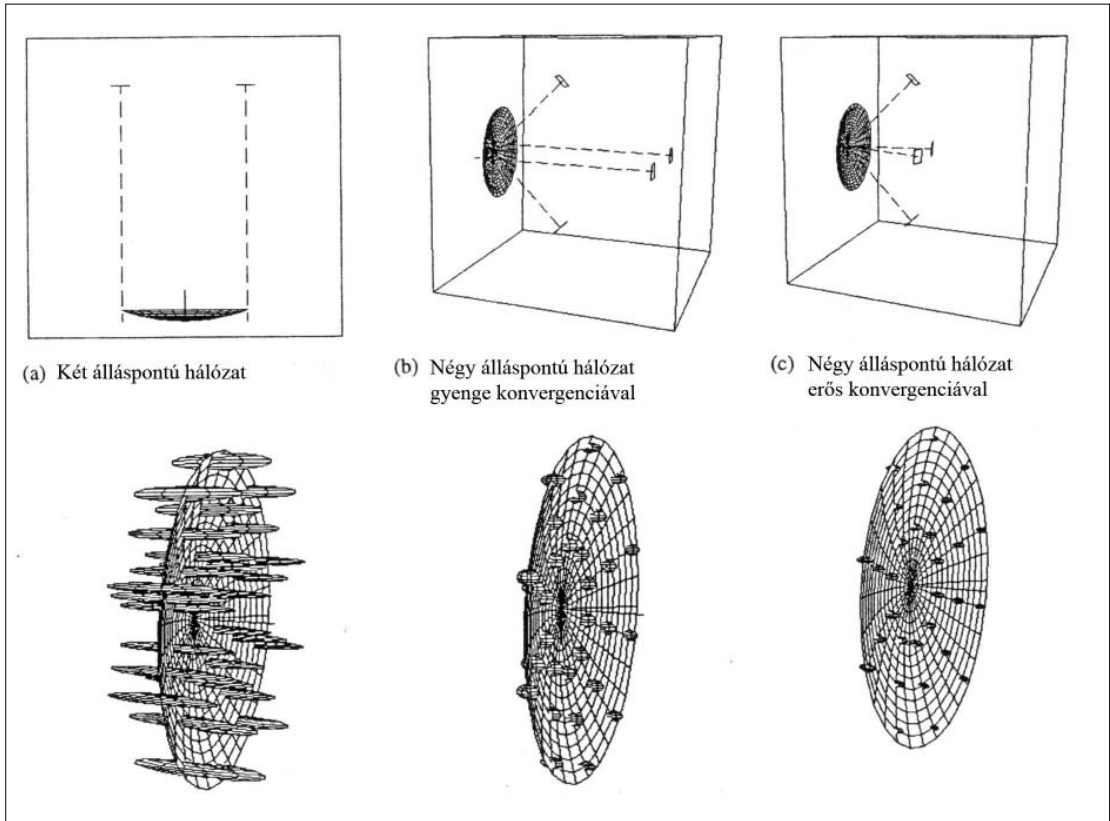
ahol

$\bar{\sigma}_c$ az X, Y, Z tárgyoldali koordináták tapasztalati hibája,
 S a méretarány, $S = d / c$,
 d a tárgy távolság,
 σ a képkoordináták átlagos hibája,
 σ_a a szögmérés átlagos hibája,
 q a hálózatra jellemző tervezési faktor,
 k a független észlelések és a képek számának a hányadosa,
 $R = S r$,
 R a kép mérete.

Az indikátor másik szokásos alakja:

$$A_1 = q / \sqrt{k} \sigma / r \quad (6).$$

Az indikátor jelen formájában alkalmas a közelfotogrammetriai hálózatok pontmeghatározásának pontossági előrejelzésére. Egy jó hálózati



1. ábra (Mason, 1995)

geometriát feltételezve (pl. $k=1$ és $q=0,7$, és amire még visszatérünk), becsülhetjük az eljárás pontosságát előzetesen.

A hálózati geometriát jellemző q érték felvételének lehetőségéről Mason alapján számolunk be (Mason, 1995). A (6) egyenletben az „erős” hálózati geometriának a $q < 1$ érték felel meg. Az elhelyezésre a 1. ábra egy egyszerű példát mutat. A kamerák különböző elhelyezéseinek mutatja a hibaellipsoidokat. Az ellipszoidi paraméterek számszerű értékének ismerete nélkül is jól látszik a különböző elrendezésekhez tartozó hibaeloszlás. A kétállásos geometria nagy egyenlőtleniséget mutat a σ_z (a mélység) és σ_{xy} irányban. Ebben az esetben $q_{xy} \approx 1$ és $1,5 < q_z < 3$, a bázisviszonytól függően. Mason javasolja, hogy a különböző konfigurációkra vezessenek be egy „alap” elrendezést, mint például a 1. (c) ábra, és ebben az esetben a felhasználók a szakirodalomból vehetik át q aktuális értékét. Szükség esetén ezek a hálózatok kiegészíthetők további állásponthoz, amelyek ha nem is adnak jobb metszéseket, de a pontmeghatározás átlagos hibáját javítja

a négyzetgyökös arány. Ebben az esetben k értéke lehet nem egész szám is a függőségből adódóan.

Az alap konfiguráció koncepcióját Mason vezette be, és a szakirodalomban felhasználásukra és továbbfejlesztésükre sok példa található (Mason, 1992, 1995; Brown, 1992; Bammeke, 1992; Saadat, 2004; Parmehr, 2004). A hálózattervezésnek ez a megoldása – nevezetesen felállítani egy hálózati készletet, és ezekhez megadni k és q értékeket – elsősorban a gyakorlat számára kifejlesztett módszer. Általában elmondhatjuk, hogy konvergens hálózatoknál 0,4 és 0,8 közé esik a q .

5. Kényszerek a hálózattervezésben

A közelfotogrammetriai hálózattervezésnek bármely formáját választjuk is, vannak olyan egyéb szempontok, amelyekre tekintettel kell lennünk egy-egy konkrét hálózat megvalósításakor. Ezek az egyéb szempontok vonatkoznak a láthatóságra, a mélységelességre, a kép méretarányára stb., amelyeket együttesen kényszereknek neve-

zünk. Az alábbiakban e kényszereket Mason (Mason, 1994) sokszor idézett melbourne-i előadása nyomán foglaljuk össze:

1. A kép méretarányára vonatkozó kényszer.

A pontmeghatározás pontossága közvetlen arányban van a kép méretarányával. Ha az (5) egyenletből kifejezzük a tárgy távolságot:

$$d = \frac{\bar{\sigma}_c \sqrt{k}}{q \sigma_a} \quad (7),$$

és mivel $\sigma_a = \sigma / c$, így a (7)-ből a következő összefüggést kapjuk:

$$d = \frac{\bar{\sigma}_c \sqrt{kc}}{q \sigma} \quad (8).$$

Ez a tárgy távolság vehető a maximális tárgy távolságnak (d_{max}), mert ha távolabb visszük a kamerát, a $\bar{\sigma}_c$ értéke is nő. Ha valamilyen okból mégis szükséges d_{max} -nál nagyobb tárgy távolság, akkor a kameraállandó növelésével oldhatjuk meg a feladatot.

2. A felbontás kényszere. Olyan felbontásnak kell lennie a képnek, hogy a képkoordináták átlagos hibájára vonatkozó előírás teljesíthető legyen. Ebből a szempontból jelentősége van a pontok jelölésének és a képméretarányának is.

3. A felvételi helyek kényszere. A felméréndő objektum körüli akadályok megváltoztathatják a felvételi álláspontok optimális helyét, ezzel az ideális képméretarányt, ill. az ideális metszéseket.

4. A mélységélesség kényszere. A nagy pontosságú képmérés megköveteli az éles leképzést. A kameraállandó aktuális értékétől függ mindig az a tárgy távolság, amittől ez lehetséges. Ez többnyire alsó korlátja a felvételi távolságnak.

5. A beesési szög kényszere. Síkban lévő tárgyak esetében a jelölt pontok mérésének megbízhatósága függ attól, hogy milyen szögben fényképezzük a síkot. Függ továbbá az alkalmazott pontjeltől, alakjától és anyagától. Általános szabály, hogy kör alakú pontjelnél 20 fok a kritikus érték, fényvisszaveró anyagból készült pontjelnél 30 fok, míg gömb alakú pontjelnél, ahol nincs parallaxis, ez az érték lehet nagyobb is.

6. A képpontok eloszlásának és számának kényszere. A hálózati pontok száma a hálózaton belül növeli a tárgy pontok meghatározásának pontosságát. Egy bizonyos számnak meg kell lennie minden képen a külső tájékozáshoz, ami fontos feltétele a többálláspontú sugárnyaláb kiegyenlítésnek, valamint az önkalibráló eljárásnak. A fotogrammetriai tájékozások megbízható-

ságát, valamint az észlelések belső megbízhatóságát előre láthatóan növeli a nagyobb redundancia (Grün, 1980), ami több hálózati ponton keresztül is megvalósulhat.

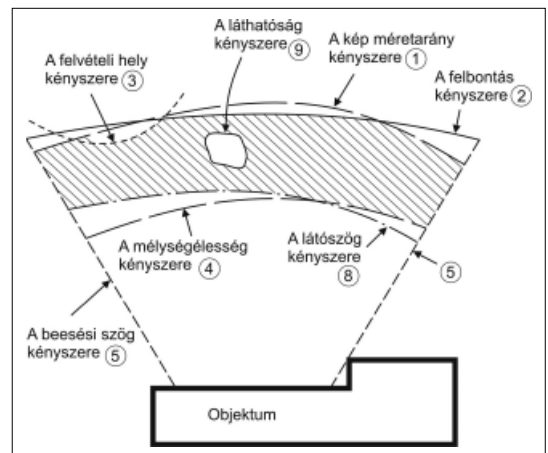
7. Az előmetsző szögekről. Az érzékelők álláspontját nem kezelhetjük függetlenül, csak a többi érzékelővel közösen, tehát csak rendszerként végezhetjük a tervezést. Cél, hogy az előmetsző szögek átlagosan jó metszést adjanak, ami fontos feltétele a jó becslésnek.

8. A látószög. Mindig előnyös, de nem mindig lehetséges, hogy minden jelölt hálózati pontot láthassunk egy álláspontból. Fontos tervezési kritérium viszont, hogy egy hálózat homogén legyen. Ennek a célnak az elérése érdekében létesíthetünk újabb jelölt pontokat, létrehozhatunk új álláspontokat, esetleg mindkét megoldást egyszerre is alkalmazhatjuk.

9. A láthatóság. Az álláspontok előtti esetleges takarások gyakran eleve megakadályozzák, hogy láthassunk, ill. lefényképezhessünk minden olyan pontot, amelyek számunkra fontosak lennének és különben beleférnének a látószögbe.

10. A megvilágítás kényszere. A hatásos megvilágítás közvetlen hatással van a fotogrammetriai mérés pontosságára. Fentiek okán a hálózat tervezés része a megvilágítás tervezése is, ami viszonylag bonyolult folyamat (Cowan, 1992; Yi, 1990).

Egy tervezési példát mutat a 2. ábra. A felméréndő tárgy egy jelölt és bemért pontokkal ellátott, viszonylag egyszerű geometriájú objektum, amit az ábra felülnézetben mutat. A példánál figyelembe lehet venni az (1)–(5), (8) és (9) kényszereket. Minden kényszer kijelöl egy területet, amely területen a megfelelő kényszer szerint el-



2. ábra (Mason alapján)

helyezhetők a fényképezési helyek. Ezen helyek közös halmaza az a terület, amelyen belül az összes kényszer teljesíthető. Ezt a területet jelöltük az ábrán vonalkázással.

5. A ZOD, FOD és SOD kérdésköre

Fraser szerint a közelfotogrammetriában a TOD nem alkalmazható (Fraser, 1996). A tervezési feladatok különböző szintjeit az önkalibráló sugárnyaláb kiegyenlítés legkisebb négyzetes megoldásához kapcsolódva mutatjuk be. Ezt a lineáris és sztochasztikus modellt a következő képlettel fejezhetjük ki:

$$\begin{aligned} v &= Ax - l \\ M_{LL} &= m_0^2 P_{LL}^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

ahol

- A a kiegyenlítés alakmátrixa,
- x a paraméterekhez rendelt változások,
- v a mérési eredményekhez rendelt javítások vektora,
- l a tisztatag vektor,
- M_{LL} a mérési eredmények kovariancia mátrixa,
- P_{LL} a mérési eredmények súlymátrixa,
- m_0^2 a súlyegység középphibája.

Abban az esetben, ha az A mátrix nem szinguláris, akkor a változásokat és a paraméterek kovariancia mátrixát megkaphatjuk a következő összefüggésekből:

$$x = (A^*PA)^{-1} A^*Pl = Q_{xx}A^*Pl \quad (10)$$

$$M_{xx} = m_0^2 Q_{xx} \quad (11)$$

Az A alakmátrix felhasználásával bemutatott hálózat független a hálózat defektusától. Ezt a problémakört a ZOD tárgyalja. A hálózatok megbízhatóságát jellemezhetjük a javítások súlykoefficiens mátrixával:

$$Q_{vv} = P_{LL}^{-1} - A(A^*P_{LL}A)^{-1}A^* \quad (12)$$

A fotogrammetriai mérések végső célja a mért tárgyponatok koordinátáinak és ezek pontosságának a meghatározása. A paraméterek változásait tartalmazó vektort particionálni lehet egy x_1 és egy x_2 vektorra. Az x_1 tartalmazza a külső tájékozási és az önkalibrálási paraméterek változásait,

x_2 pedig a tárgykoordinátákét. Ebben az esetben a (10) a következő alakban írható:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^*P_{LL}A_1 & A_1^*P_{LL}A_2 \\ A_2^*P_{LL}A_1 & A_2^*P_{LL}A_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1^*P_{LL}l \\ A_2^*P_{LL}l \end{bmatrix} \quad (13)$$

A súlykoefficiens particionált alakja a következő lesz:

$$Q_{xx} = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_{1,2} \\ Q_{2,1} & Q_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

A ZOD adja a lehetőséget a tárgyponatok optimális elhelyezésére, azaz az optimális hálózati dátum meghatározására. Ebben az esetben az A alakmátrixot és a mérési eredmények P_{LL} súlymátrixát ismerjük. Keressük a hálózati pontok kiegyenlített koordinátáit (X) és az azok sztochasztikus tulajdonságait leíró Q_{xx} súlykoefficiens mátrixot.

A szabad hálózatok A^*PA együtttható mátrixa szinguláris. A szingularitás mértékét a mátrix defektusa (nullitása) adja meg, ami fotogrammetriai hálózatok esetében mindig hét. A hálózat megoldásakor egyszerű lehetőségnek tűnik a defektussal megegyező számú paraméter megkötése. Amikor így oldjuk meg a ZOD-t, akkor M_2 nem becsülhető helyesen, ha a minimális hét értéket felcseréljük, akkor az ezzel járó jelenség az, hogy M_2 értékei is nagymértékben megváltoznak (Fraser, 1984).

Ha a feladatot pszeudó inverzek felhasználásával oldjuk meg, igaz rá: $Sp M_{xx} = \min$. Egyébként a $3n$ koordinátával jellemzett tárgy esetében a feltétel teljesülésével a várható variancia átlagos értéke becsülhető:

$$\bar{\sigma}_c^2 = \frac{\sigma_0^2}{3n} Sp Q_2 = \min \quad (15)$$

A pszeudó inverzek felhasználásakor a következő alakban adható meg az optimális kovariancia mátrix (Granshaw, 1980; Fraser, 1984):

$$\begin{bmatrix} M_1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & M_2 & \cdot \\ \cdot & \cdot & M_3 \end{bmatrix} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} A_1^*PA_1 & A_1^*PA_2 & 0 \\ A_2^*PA_1 & A_2^*PA_2 & G \\ 0 & G^* & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

ahol G egy Helmert transzformációs mátrix. A bal oldali mátrix pontozott része nem fontos a jelen tárgyalás szempontjából. A (16) a kovariancia mátrixra teljesülő minimális nyom miatt a ZOD optimális megoldásának tekinthető, csak igen számításigényes. A kovariancia mátrix szá-

munkra legérdekesebb részének megadására létezik egy egyszerűbb megoldás is (Brown, 1976):

$$M_2 = \sigma_0^2 \left[(A_2^* P A_2)^{-1} + K \right] \quad (17),$$

ahol

$$K = R Q_1 R^* \quad \text{és} \quad (18),$$

$$R = (A_2^* P A_2)^{-1} A_2 P A_1$$

És, mint Fraser (Fraser, 1987) rámutatott, a legtöbb több álláspontú konvergens fotogrammetriai hálózat esetében $K \approx 0$, amiből következik:

$$M_2 = \sigma_0^2 (A_2^* P A_2)^{-1} \quad (19),$$

és, mivel $A P A$ blokk diagonal mátrix:

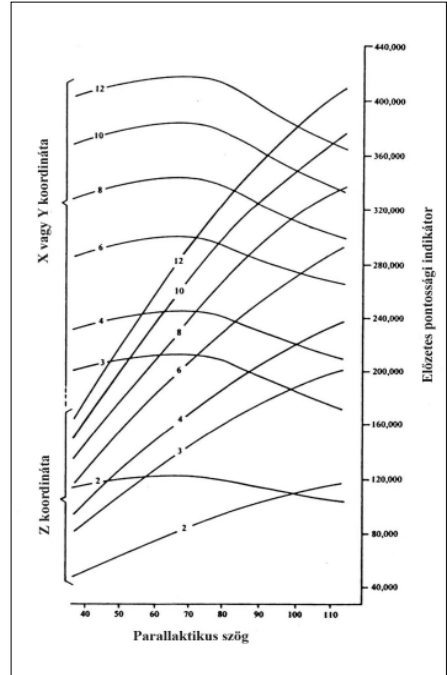
$$M_{2i} = \sigma_0^2 (A_2^* P A_2)^{-1} \quad (20),$$

ahol M egy 3×3 méretű kovariancia mátrix, az i -edik tárgy pont X , Y , Z koordinátáinak kovariancia mátrixa.

A FOD célja megtalálni az ideális alakmátrixot, miközben a mérések súlymátrixát és a hálózati dátumot ismertnek tételezzük fel. Egy gyakorlati kritérium lehet az (5) képlettel megadott standard hiba értékének egy megadott érték alatt tartása a homogenitásának a biztosítása mellett.

A 1. viszonylag egyszerű ábrán mutattunk be egy felvételi hely elrendezés-változást, amely szükséges volt ahhoz, hogy a három tengely irányában a koordináta középhibák eloszlása homogén és izotrop legyen. Ebben az eljárásban az (5) egyenletben szereplő tényezők közül megváltoztattuk a q értékét (a kamerák álláspontjának számát növeltük, és megváltoztattuk az „előmetsző” szögeket), és csökkentettük a méretarányt (S).

A FOD alaphálózatokon alapuló jelentősége az, hogy egy kívánt relatív pontosságot eredményez a tárgytéren belül a különböző tárgytéri pontok között és egy pont σ_x , σ_y , σ_z koordináta középhibái között is. Ez a rendszer egyben bemutatja az optimális geometria esetén a sugarak ideális metsződését is, amit a gyakorlati feladatok során a 4. pontban ismertetett kényszerek viszont módosíthatnak. A 3. ábrán Fraser egy kísérlete (Fraser, 1996) alapján bemutatjuk az átlagos hálózati pontosság változását a parallaktikus szögek és a felvételi álláspontok függvényében. Ebből az ábrából is látszik, hogy a relatív pontosság legfontosabb faktora a metszési szög, így a FOD-ban a legtöbb figyelmet erre kell fordítani. A négy álláspontnál többel rendelkező hálózat esetében a



3. ábra

tárgypontok kovariancia mátrixa a következőképpen írható le (Fraser, 1996):

$$M_2 = \sigma^2 / k (A_{2b}^* A_{2b})^{-1} \quad (21).$$

Ezen összefüggésben A_{2b} az alaphálózat ún. tervezési mátrixa. Az $(A_{2b}^* A_{2b})^{-1}$ inverze tulajdonképpen az (5) egyenletben szereplő q és S szorzatának a négyzete.

A SOD kérdésköre a közelfotogrammetriában a képpontok középhibák optimalizálását jelenti. A FOD eljárás, amikor növeli a felvételi álláspontok számát, akkor tulajdonképpen a SOD eljáráshoz hasonló hatást ér el. A SOD eljárást tekinthetjük úgy, mint amelyik eljárás a (21) összefüggésben a σ és k értékek között keresi az optimális arányt. Mivel azonban a σ értéke a különböző fotogrammetriai mérésekben csak igen kis mértékben változtatható, ezért inkább a szükséges kovariancia mátrix értékek előállítását a többszöri exponálás előírásával (a felvételi hely kicsiny módosításával a teljes korreláció kikerülése miatt), az új kamera álláspontok létrehozásával és esetlegesen a képpontok többszöri mérésével éri el. A szakirodalom a képpontok többszöri mérése helyett javasolja a többszöri exponálással létrehozott nagymértékű lefedés alkalmazását (Fraser and Shortis, 1995).

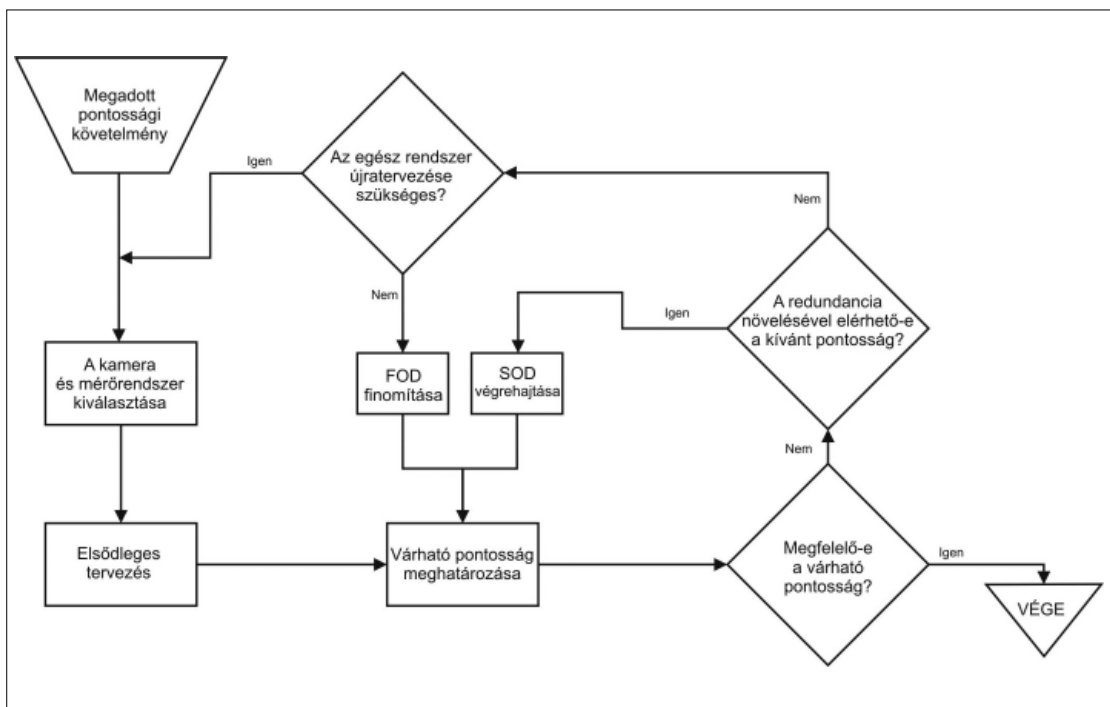
7. A méretezésen alapuló hálózattervezés

A méretezésen alapuló hálózattervezéskor az előírt pontossági követelményeket kívánjuk elérni egy gyakorlati tervezési stratégia által. Az előírt pontossági követelményeket az 5. pontban leírt M_{XX} kovariancia mátrix főátlójában szereplő elemekre értjük. Amint *Mason* kiemelte, a közelfotogrammetriai felmérő eljárás mikéntjének a meghatározása tekintetében a ZOD, FOD és SOD keveset nyújt, annak ellenére, hogy az eljárás gyakorlati lépései logikusan követik egymást (*Mason*, 1995).

Az adott, szükséges pontossági előírás elérése érdekében az elsődleges lépés a megfigyelést biztosító kamera és mérőrendszer kiválasztása. A kiválasztott rendszerrel elérhető háromszögelési pontosságot megkaphatjuk vagy szakirodalmi adatokból, vagy saját megfigyeléseink vizsgálatából. A tervezés jelen fázisában szükséges egy, a felvett faktorokhoz illő hálózati geometria felvétele is, amelyet első megközelítésben célszerű egy, a szakirodalomban a feladat jellegének megfelelő „alap” hálózat formájában vagy ezek valamilyen kombinációjában megadni (*Schlögelhofer*, 1989). A tervezésnek ezt a fázisát nevezi a szakirodalom elsődleges tervezésnek (initial design).

Az elsődleges tervezés befejezése után célszerűen az (5) egyenletben szereplő q , k , S értékek meghatározásán keresztül szükséges megbecsülni a hálózatra várhatóan jellemző pontossági értéket. Amennyiben ez az érték megfelel az előzetes elvárásoknak, a tervezés befejezhető. Ha a becsült pontosság nem megfelelő, nagyobb háromszögelési pontosságra van szükség, akkor az eltérés mértékétől függően dönthetünk. Amennyiben csak olyan mértékű az eltérés, hogy a mérésszám növelésével a SOD-on keresztül elérhetjük célunkat, akkor ezt tesszük. Azonban – ellentétben a geodéziai hálózatokkal – a közelfotogrammetriában a fellépő korrelációk miatt nem szokás a képkoordináták ismételt meghatározásával növelni a redundanciát, hanem ez a többszöri exponálásokon keresztül történik.

Amennyiben a redundancia növelésével nem érhető el a kiírás, további lehetőség a FOD felhasználásával a hálózati paraméterek módosítása, a hálózat geometriájának az „erősítése”, a hálózati kényszerek figyelembevételével. Egyes esetekben szükséges lehet, hogy változtassunk az alkalmazott megfigyelő- és mérőrendszeren, és egy teljesen új tervezést hajtsunk végre. A 4. ábrán a méretezésen alapuló pontossági tervezés folyamatábráját mutatjuk be *Fraser* (1996) alapján.



4. ábra (*Fraser*, 1996)

8. Mobil teszterület alap hálózata

8.1. Bevezetés

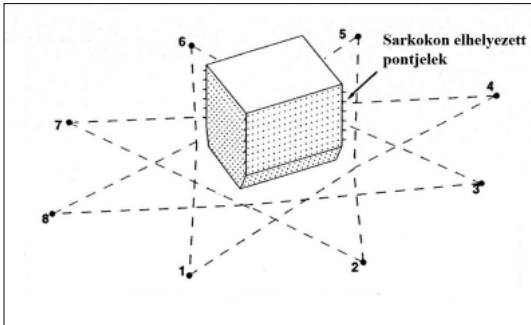
A közelfotogrammetriai szakirodalom több alap hálózattípust részletesen tárgyal. Az előzőekben a 1. ábrán egy parabola antenna és hasonló tárgyak felmérésére szolgáló négy álláspontú, erős konvergenciájú hálózatot mutattunk be. A szakirodalomban sokszor idézett hálózat Brown 1981-ben publikált kocka alakú test felmérésére kifejlesztett, nyolc felvételi álláspontot tartalmazó hálózata (5. ábra). Fraser (1996) több hálózat mellett bemutat egy síknak tekinthető tárgyak és egy repülőgép szárnyfelületek felmérésére kifejlesztett, négy álláspontú hálózatot /6. (a) és 6. (b) ábrák/. Mason (1994) a közel síkokra kifejlesztett hálózatból a síkokkal lefedhető testek felmérésére szolgáló hálózatok több típusát és altípusát is bemutatta, Schlögelhofer (1989) pedig hosszú falak felmérésére adott megoldást.

A bemutatott példák és a szakirodalomban található példák közös jellemzője, hogy a közel-

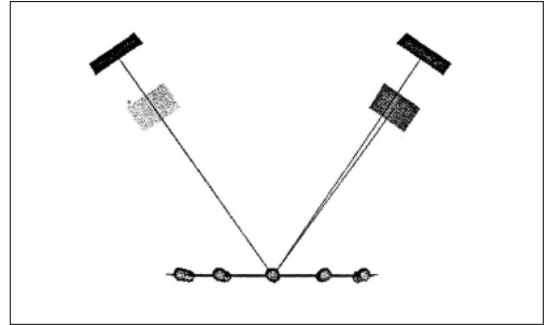
fotogrammetria általában legnagyobb pontosságot igénylő területéről, az ipari fotogrammetria témaköréből valók, és ezáltal a hálózatok mérete többnyire a méter nagyságrendtől a néhány tíz méter nagyságrendig terjed.

8.2. Mobil teszterület alap hálózata

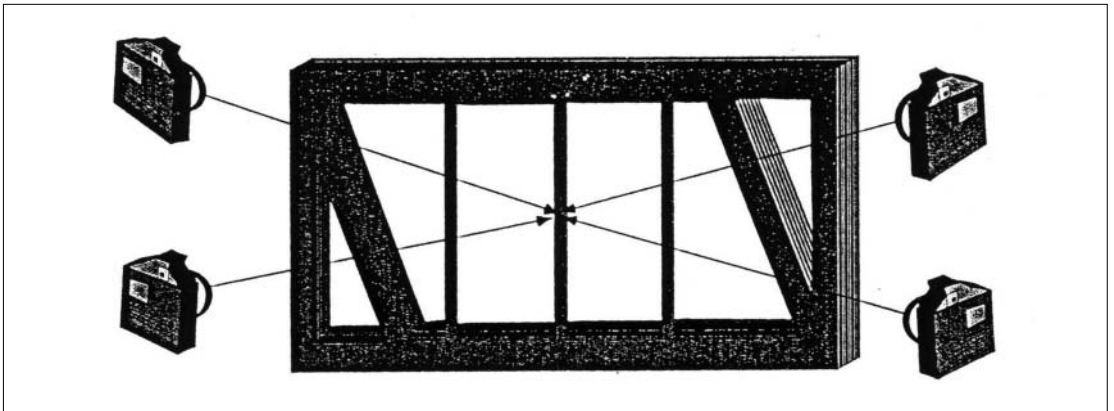
A közelfotogrammetria azon területén, ahol néhány tíz cm-es és ennél kisebb tárgyak felmérésével foglalkoznak, szokásos eljárása a felmérésnek, hogy megépítenek egy szabatos, nagy stabilitású hálózatot, azt pontosan bemérik, és a különböző méretű tárgyakat ebbe az előre legyártott hálózatba helyezve fényképezik le, és határozzák meg a szükséges geometriai paramétereket. Az egyik első ilyen hálózatot Burch és Forno építette 1984-ben, amely hálózat Manhattan felhőkarcolóinak kicsinyített mása (7. ábra). Burch és Forno alapján a szakirodalom az ilyen jellegű teszterületeket általánosságban Manhattan típusúként említi.



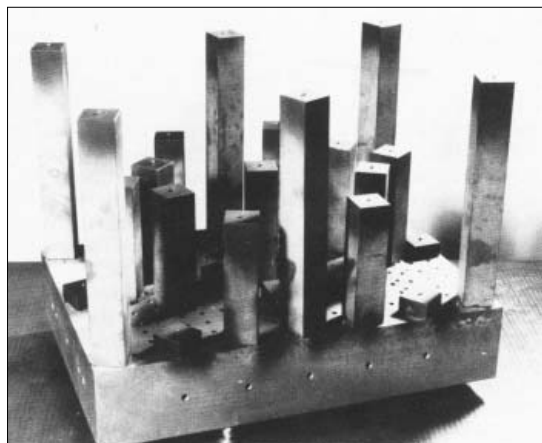
5. ábra (Brown, 1981)



6. (a) ábra (Fraser, 1996)



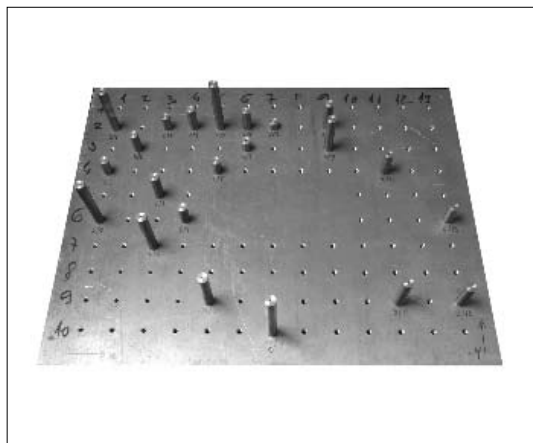
6. (b) ábra (Fraser, 1996)



7. ábra (Burch és Forno, 1984)

Közelfotogrammetriai feladataink példái megérelték azt az elhatározásunkat, hogy építsünk egy mobil, több feladatra általánosan felhasználható teszterületet, határozzuk meg geometriai adatait, és a benne elhelyezett tárgyak felmérésére adjunk meg egy fényképezési alapkonzfigurációt az ehhez kapcsolódó tervezési paraméterekkel. A hálózat megépítéséről és geometriai adatainak a meghatározásáról a magyar szakirodalomban (Fekete, 2004) már adtunk ismertetést, jelen publikációban a hálózat-tervezési kérdésekkel foglalkozunk.

A 8. ábra mutatja az általunk megépített és bemért Manhattan típusú modellt. A hálózat kialakításánál az érzékelők sorából kizártuk a metrikus kamerákat, elsősorban az áruk, másodszorban a valószínűsíthető kis tárgytávolság miatt, de leginkább azért, mert megoldásunkat széles körben alkalmazhatóvá kívántuk tenni. Az utolsó szempont miatt tulajdonképpen csak digitális eszközökben gondolkodtunk. A hálózati kényszerek közül a kép méretarányára vonatkozóan célunk a többi kényszer által megengedett legkisebb méretarány elérése, hiszen az (5) összefüggésből következően ez a pontosság fontos faktora. A Manhattan típusú teszterületek esetében a teszterület jelölt pontjai a különböző magasságú pontjelek tetejére kerülnek, többnyire azért, mert a teszterület bemérése így a legegyszerűbben megoldható. Ugyanakkor a hálózatba helyezett tárgyak oldalán is vannak fontos pontok, ami a beesési szög kényszere miatt okoz nehézséget a hálózat-tervezés során. A láthatóság kényszere ennél a feladatnál olyan értelemben merül fel, hogy a felméréndő tárgyat takarhatják maguk a teszterület elemei, valamint egy tárgy több olda-

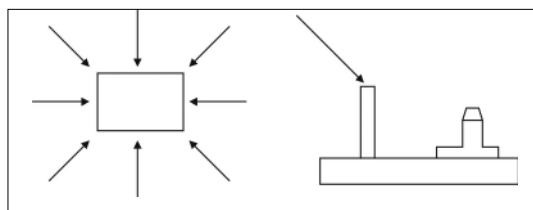


8. ábra

lát is fel kell mérni, így maga a tárgy is takarhatja önmagát.

A tervezésnél eldöntöttük, hogy jobb minőségű digitális fényképezőgép felhasználását veszszük tervezési alapul. A láthatóság kényszere miatt nyolc fényképezési helyet választottunk, így elérve azt, hogy minden szükséges pont legalább négy helyről látszódjon. A fényképezési irányokat mutatja a 9. ábra. Nehezebb a helyzet a beesési szög kényszerével. Mivel a tesztmező pontjelölései vízszintesen helyezkednek el, miközben a felméréndő tárgyakon függőleges pontjelek is vannak, a beesési szög kényszere nem teljesíthető teljes mértékben, csak gömb alakú pontjelek alkalmazása esetén. Feladatunk megoldásakor a 45 fokos fényképezési magassági irányt választottuk, tudva, hogy a legjobb képkoordináta pontosságát értékeket csak speciális pontjelek alkalmazásával érhetjük el.

A (5) egyenletben az S értékét meghatározza a kameraállandó és a tárgytávolság. Alap elrendezések kialakításakor k értékére szokásosan egységet vesznek, hogy a felhasználóknak megahagyják a lehetőséget a pontosság fokozására a redundancia növelése révén. Mint már említettük, a képkoordináta mérés pontosságát is meg-



9. ábra A vízszintes és magassági fényképezési irányok

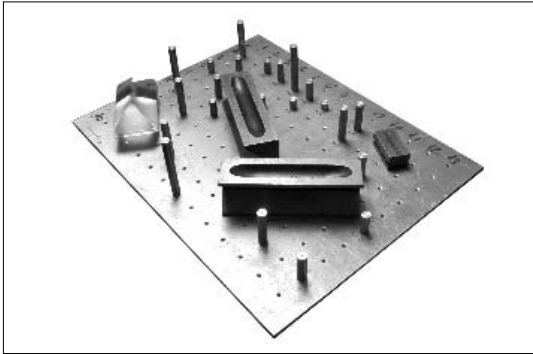
tudjuk határozni. Ami egy alaphálózat közreadásához még szükségeltetik, az a hálózatra vonatkozó q érték megadása. Ha az (5) egyenletben élünk a $k = 1$ feltételezéssel a következő alakot kaphatjuk:

$$q = \sigma_c / (\sigma \cdot S) \quad (22).$$

A (21) egyenletből látszik, hogy q értékét egy hálózatra vonatkozóan a képmérés átlagos hibáját ismerve meghatározhatjuk valódi hibákból levezetett tárgyoldali koordináta középhibákból. A valódi hibák meghatározására a teszterületbe helyeztünk négy szabatosan megmért tárgyat (10. ábra). A tárgyak jól látható sarokpontjait megmérve és a pontok koordinátaiból távolságot számolva és ezt az eredeti távolságokkal összevetve valódi hibákat kapunk. 12 távolságból számított négyzetes középhibára a bemutatott hálózatunk esetében $\pm 0,18$ mm kaptunk, tehát a mobil teszterületre bemutatott elrendezésben a hálózatra jellemző tervezési faktor értékét a következő módon adhatjuk meg:

$$q = 180 / (\sigma S) \quad (23),$$

amely összefüggésben a képkoordináták pontosságát μm egységben kell megadni.



10. ábra

9. Összefoglalás

Publikációnkkal az elsődleges célunk volt, hogy a közelfotogrammetria egyik érdekes kérdéskörét, a közelfotogrammetriai hálózattervezés legfontosabb fejezeteit, mint a hálózatok minőségével foglalkozót, ami ráadásul valamelyest különbözik is a magyar szakirodalmi terminustól, a hálózati kényszerekkel foglalkozót, a tapasztalati úton történő hálózattervezés alapelveit bemutat-

suk. A talán a szokásosnál hosszabb publikáció ennek köszönhető, miközben vannak olyan témakörök is, mint például a hálózatok megbízhatósági tervezése, amelyekkel nem foglalkoztunk. A tapasztalati úton történő hálózattervezés lényege, hogy különböző szerzők leírnak különböző alap hálózat típusokat, amivel céljuk, hogy más, elsősorban a gyakorlatban dolgozó szakemberek ebből a már jellemzett készletből meríthessenek. Dolgozatunk második részében egy ilyen mutatunk be, ahol a hálózat pontosságát alapvetően meghatározó tervezési faktort nem egy konkrét számként adtuk meg, mint ahogy a szakirodalomban ez szokás, hanem a képkoordináta átlagos hibája és a képméretarány függvényében.

Problems of Network Design in Close-Range Photogrammetry

Fekete, K.
Summary

This paper gives a summary of the current issues of network design in close-range photogrammetry based on the treatment of this special literature.

In photogrammetry the technical terms concerning network qualifications differ a little bit from the technical nomenclature used by the Hungarian photogrammetrist, so we give their equivalents in English and also the Hungarian terms recommended lay us; naturally they are only matter in dispute.

At the end of the publication we intended to complete the network set used in close-range photogrammetry with one concerning Manhattan-type test-field.

Felhasznált irodalom:

- Atkinson, K. B.* (1996): Close Range Photogrammetry and Machine Vision (Whittles Publishing, Lanternwheel, Scotland, UK)
- Bammeke, A. A.–Baldwin, R. A.* (1992): Designing and Planning of Close-Range Photogrammetric Networks: is an Expert System Approach Feasible? (International Archives of Photogrammetry, Washington Vol. XXIX. Part V. pp. 454–460)
- Brown, D. C.* (1976): The Bundle Adjustment – Progress and Prospects (International Archi-

- ves of Photogrammetry and Remote Sensing, Helsinki Vol. XIII. Part III.)
- Brown, D. C.* (1981): LNG Tank Inventory Measurement by Photogrammetry (AGA Operating Section Proceedings, American Gas Association, 127–137)
- Brown, D. C.* (1992): STARS, a Turkey System for Close-Range Photogrammetry (International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Washington Vol. XXIX. Part V. pp. 68–89)
- Burch, J. M. and Forno, C.* (1984): Progress with the NPL Centrax Camera System (International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Rio Vol. XXV. Part V.)
- Cowan, C. K.–Modayur, B.–DeCurtins, J.* (1992): Automatic Light-Source Placements for Detecting Object Features (Intelligent Robots and Computer Vision Conf. XI., Boston)
- Detrekői Á.* (1991): Kiegészítő Számítások (Tankönyvkiadó, Budapest)
- Fekete K.* (2004): A közelfotogrammetria és néhány fogászati alkalmazása (Geomatikai Közlemények, Budapest VII. pp. 45–51)
- Fekete, K.* (1996): Orvosi fotogrammetria kézirat (Műegyetemi E. C. Váll. Ir., Budapest)
- Fraser, C. S.* (1984): Network Design Considerations for Non-topographic (Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 50(8): 1115–1126)
- Fraser, C. S.* (1987): Limiting Error Propagation in Network Design (Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 53(5): 487–493)
- Fraser, C. S.* (1992): Dimensional Characterization of a Large Aircraft Structure by Photogrammetry (Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 58(5): 539–543)
- Fraser, C. S.–Shortis, M. R.* (1995): Metric Exploitation of Still Video Imagery (Photogrammetric Record, 15(85): 107–122)
- Fraser, C. S.* (1996): Network Design. In: Atkinson, K. B. (Ed.): Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing UK, pa 371, pp. 256–280
- Grafarend, E. W.* (1974): Optimization of Geodetic Network (Bolletino di Geodesia e Scienze Affini, 33 (4): 351–406)
- Granshaw, S. I.* (1980): Bundle Adjustment Methods in Engineering Photogrammetry (Photogrammetric Record, 10(56): 181–207)
- Grün, A.* (1980): Precision and Reliability Aspects in Close-Range Photogrammetry (Photogrammetric Journal of Finland, 8(2): 117–132)
- Hottier, P.* (1976): Accuracy of Close-Range Analytical Restitutions: Practical Experiments and Prediction (Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 42(3): 345–375)
- Karara, H. M.* (1989): Non-Topographic Photogrammetry (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Virginia)
- Kis Papp L.* (1981): Építészeti Fotogrammetria (Műszaki Kiadó, Budapest)
- Kraus K.* (1998): Fotogrammetria (Tetria Kiadó, Budapest)
- Luhmann, T.* (2000): Nahbereichsfotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen (Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg)
- Mason, S.–Kepuska, V.* (1992): On the Representation of Close-Range Network Design Knowledge (International Archives of Photogrammetry, Washington Vol. XXIX Part V pp. 446–453)
- Mason, S.* (1994): Conceptual Model of the Sensor Station Placement Task in Configuring Multistation Convergent Networks (International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Melbourne Vol. XXX. Part 5)
- Mason, S.* (1995): Conceptual Model of the Convergent Multistation Network Configuration Task (Photogrammetric Record 15(86): 277–299)
- McGlone J. C.* (2004): Manual of Photogrammetry Fifth Edition, (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing)
- Parmehr, E. G.–Azizi, A.* (2004): A Comparative Evaluation of the Potential of Close Range Photogrammetric Technique for the 3D Measurement of the Body of a Nissan Patrol Car (International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul Vol. XXXV. Part 5.)
- Rózsa P.* (1974): Lineáris algebra és alkalmazásai (Műszaki Kiadó, Budapest pa. 683)
- Saadat-Seresht, M.–Samdzadegan, F.–Azizi, A.–Hahn, M.* (2004): Camera Placement for Network Design in Vision Metrology Based on Fuzzy Inference System (International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul Vol. XXXV. Part 5.)
- Schlögelhofer, F.* (1989): Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmodelle für die Ingenieurphotogrammetrie (Dissertation, Technische Universität, Wien pa. 156)
- Yi, S.–Haralick, R.–Shapiro, L.* (1990): Automatic Sensor and Light Source Positioning for Machine Vision (ICPR Cong. Vol. X.)