

Fotogrametrické určenie priestorového tvaru slinkového sila

Marek Fraštia¹, Marek Bajtala² a Štefan Sokol³

Photogrammetric determination of the spatial shape of the clinker silo

Digital photogrammetry, in comparison with analogue or analytical, streamlines whole process of determination of a spatial point position, whether time reduction or increasing of accuracy. In this sense, a amateur digital cameras can be used for purposes of accurate measurement of objects by the method of stereophotogrammetry or convergent photography. The paper is aimed at using of the close-range photogrammetry for a spatial shape determination of the steel coating of the clinker silo and at a comparison of the photogrammetric and geodetic results.

Key words: digital camera, convergent photography, close-range photogrammetry.

Úvod

Slinkové silo (obr. 1) sa nachádza v areáli cementárne Holcim, a.s., v Rohožníku. Silo má tvar valca priemeru $D = 36$ m a výšku $H = 40$ m. Dôvodom zamerania priestorového tvaru sila boli deformácie jeho oceľového plášťa, keď sa v spodnej časti plášťa objavili praskliny šírky až 2 cm. Tie boli neskôr zaplátané



Obr. 1. Slinkové silo.
Fig. 1. Clinker Silo.

privarenými oceľovými plátmi. Vzniklo podozrenie, že dochádza k horizontálnym deformáciám plášťa vplyvom hmoty slinku v spodnej časti sila. Tento predpoklad bol overovaný klasickými geodetickými metódami a experimentálne aj fotogrametrickou metódou. Na snímkovanie bola použitá kompaktná digitálna kamera Olympus C-8080 WZ. Cieľom bolo overiť možnosti digitálnej fotogrametrie použitím amatérskej digitálnej kamery a posúdiť efektivitu a presnosť fotogrametrickej metódy v podobných aplikáciách inžinierskej geodézie.

Signalizácia meraných bodov

Pre určenie priestorového tvaru sila bolo vytýčených 8 vertikálnych profilov, v ktorých boli stabilizované (trvanlivým lepidlom) meracie značky – odrazové fólie fy Leica rozmerov 4×4 cm² (obr. 2).



Obr. 2. Meracia značka.
Fig. 2. Measurement mark.

V strede fólie je čierny kríž. Meracie značky boli umiestnené v každom profile vo výškach 0.5 m, 5 m, 10 m a 20 m. Vo výškach nad 20 m nebolo možné umiestniť meracie značky, preto boli merané prirodzene signalizované body po 5 m v danom profile.

Geodetické merania

Pre potreby základného a opakovaných meraní bola vybudovaná sieť vzťažných bodov okolo pozorovaného sila. Body boli stabilizované klincovými značkami v betóne. Na polohové meranie bola použitá univerzálna meracia stanica (UMS) Leica TCR 1101 s charakteristikami presnosti merania uhlov 2^{cc} a dĺžok 1 mm + 1 ppm. Uhly boli merané v 2 skupinách. Polohové súradnice bodov vzťažnej siete boli určené uzavretým polygónovým ťahom v lokálnom súradnicovom systéme s presnosťou $m_x = m_y = \pm 2$ mm.

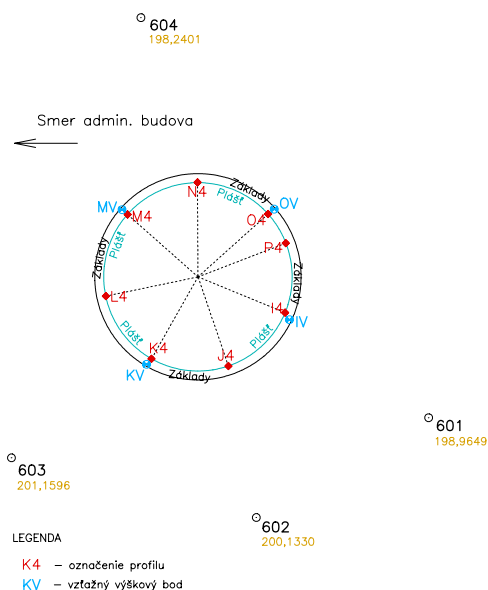
¹ Ing. Marek Fraštia, PhD., Katedra geodézie, SvF STU, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, tel.: 421 7 59274 398, e-mail: marek.frastia@stuba.sk

² Ing. Marek Bajtala, Katedra geodézie, SvF STU, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, tel.: ++421 7 59274 392, e-mail: marek.bajtala@stuba.sk

³ prof. Ing. Štefan Sokol, PhD., Katedra geodézie, SvF STU, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, tel.: ++421 7 59274 639, e-mail: stefan.sokol@stuba.sk

(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 3. 5. 2007)

Výšky vzťažných bodov boli určené metódou presnej nivelácie digitálnym nivelačným prístrojom DiNi 12 s presnosťou $\pm 0,3$ mm.



Z bodov vzťažnej siete boli merané pozorované body objektu priestorovou polárnou metódou, keďže UMS umožňovala merať dĺžky aj pasívnym odrazom. Uhly boli merané v 1 skupine a 2 polohách. Vzhľadom na presnosť vzťažných bodov a vzhľadom na presnosť prístroja bola dosiahnutá presnosť pozorovaných bodov sila ± 3 mm v polohe a ± 3 mm vo výškach.

Obr. 3. Vzťažné body meračskej siete a merané profily.
Fig. 3. Relation of the points of geodetic network and measured profiles.

Fotogrametrické určenie priestorových súradníc

Vzhľadom na požadovanú presnosť $m_x = m_y = m_z \leq \pm 3$ mm bola zvolená metóda konvergentného snímokovania so všeobecnou orientáciou osi záberu, ako najpresnejšia fotogrametrická metóda určovania priestorovej polohy objektov.

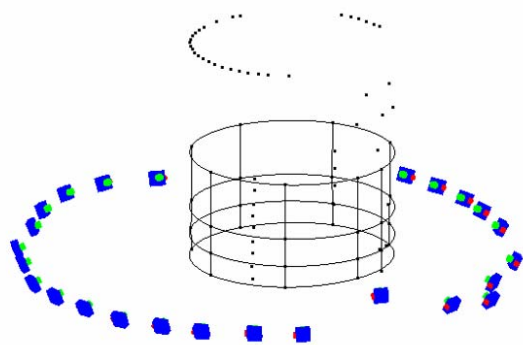
Na snímokovanie bola použitá digitálna kompaktná kamera Olympus C-8080 WZ. Jej technická špecifikácia je uvedená v tab. 1.

Tab. 1. Parametre kamery Olympus C-8080 WZ.
Tab. 1. Technical specification of the camera Olympus C-8080 WZ.

Olympus C-8080 WZ, digitálny kompaktný			
počet pixelov	8 000 000	formát	JPEG
veľkosť CCD senzora	6.6 x 8.8 mm ²	rozlíšenie	3264 x 2448
konštanta snímky (f)	7.4 mm	farebná hĺbka	16.7 x 10 ⁶ farieb
veľkosť pixla	2.69 μm	veľkosť súboru	cca 4 MB
citlivosť	od 50 ISO	mierkové číslo snímky	3 000-6 700

Predmetové vzdialenosti sa pohybovali vzhľadom na výšku objektu od 20 do 50 m, čím je daný aj rozsah mierkového čísla snímky. Snímokovať bolo možné iba zo zeme a stanoviská snímokovania boli vzdialené od seba približne po 10° na oblúku okolo sila. To by odpovedalo 36 snímkam okolo celého sila.

Takáto hustá konfigurácia stanovísk bola volená z dôvodov požadovanej presnosti a minimálne 4 priesekov na každom bode. Niektoré časti sila však boli zakryté alebo umiestneniu stanoviska bránil iný objekt, preto bolo spolu vyhotovených 25 digitálnych snímkov (obr. 4).



Obr. 4. Konfigurácia stanovísk snímokovania.
Fig. 4. Geometry of the camera stations.

Kalibrácia kamery

Použitie nemetrickej kamery na presnú rekonštrukciu objektov vyžaduje jej kvalitnú kalibráciu. Kalibráciou určíme prvky vnútornej orientácie kamery, čím umožníme výpočet perspektívnej transformácie a eliminujeme systematické vplyvy výrazne znižujúce výslednú presnosť. Použitá kamera bola kalibrovaná na Kalibračnom a testovacom bodovom poli katedry geodézie SvF STU v Bratislave (Fraštia, 2005).

Odhad apriórnej presnosti

Výsledná referenčná presnosť polohy bodu, určeného digitálnou fotogrametriou konvergentným snímkovaním, je funkciou viacerých faktorov:

$$m_p = f(M_s, Pix, m_{pix}, R, K, o, v, m_v, S) \quad (1)$$

pričom

- m_p je priestorová presnosť bodu,
- M_s je mierkové číslo snímky závislé od konštanty snímky f a predmetovej vzdialenosti Y ,
- Pix je veľkosť obrazového elementu,
- m_{pix} je presnosť merania obrazového elementu, závislá od signalizácie zobrazeného bodu a následne od merania manuálneho alebo automatického,
- R je spôsob transformácie do referenčného systému (priestorová a perspektívna transformácia),
- K je kvalita kalibrácie kamery, môžeme sem zahrnúť aj kvalitu samotnej kamery z hľadiska stability a precíznosti výroby,
- o je kvalita prieseku určovacích lúčov, predovšetkým počet určujúcich lúčov a veľkosť uhla prieseku,
- v je počet a rozloženie vličovacích resp. identických bodov použitých na transformáciu,
- m_v je presnosť vličovacích resp. identických bodov,
- S je matematický model spracovania údajov.

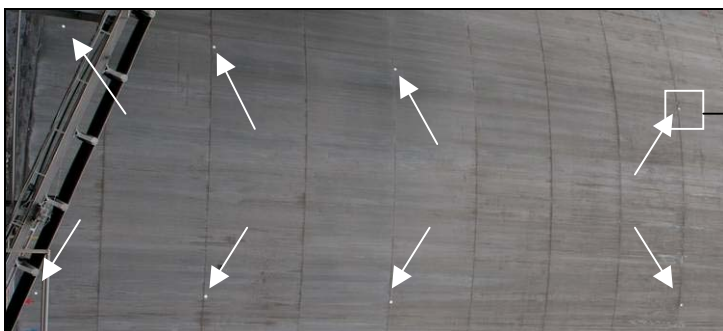
V optimálnych podmienkach je apriórna presnosť pri danej kamere a predmetových vzdialenostiach daná približným vzťahom (2):

$$m = M_s Pix m_{pix} \quad (2)$$

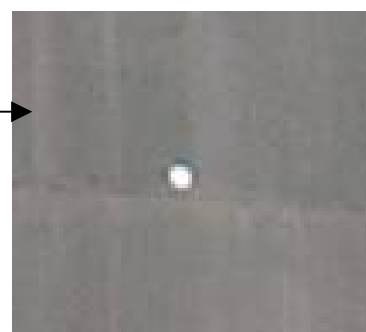
kde m je presnosť v jednotlivých osiach referenčného súradnicového systému, M_s je mierkové číslo snímky, Pix je veľkosť obrazového elementu (pixela) CCD snímača a m_{pix} je presnosť merania na snímke v pixeloch. Za predpokladu manuálneho merania obrazových súradníc sa presnosť merania pohybuje od 1 do 3 pixelov v závislosti od kvality signalizácie, pri automatickom meraní je presnosť merania 0,1 – 0,3 pixelu. Po prepočítaní dostaneme hodnoty výslednej presnosti pre manuálne meranie $m = 8,1 - 54,1$ mm, pre automatické meranie $m = 0,8 - 5,4$ mm.

Fotogrametrické vyhodnotenie

Na fotogrametrické spracovanie snímok bol použitý softvér PhotomodelerPro 5 (PM5), ktorý je určený práve na vyhodnotenie konvergentných digitálnych snímok, ale aj na jednosnímkovú fotogrametriu. Softvér umožňuje aj automatické meranie signalizovaných bodov, čím sa až rádozo zvyšuje presnosť. V tomto prípade boli na signalizáciu použité odrazové fólie, ktoré majú tú vlastnosť, že odrážajú svetlo vždy smerom k zdroju žiarenia, podobne ako odrazové hranoly (retro-reflexive). Použitím blesku (postačuje interný aj na vzdialenosť 40 m) potom dochádza k prežiareniu terča voči okoliu (obr. 5), čo má priaznivý vplyv na zobrazenie terča na snímke. Aby bolo možné spoľahlivo využiť automatické meranie, musí sa terč zobraziť aspoň na ploche 5 x 5 pixelov. Pri menšom zobrazení už výsledky nemusia byť kvalitné. Optimálny tvar terča je plný kruh, pretože softvér hľadá ťažisko tejto plochy, to znamená, že pozorovaný bod sa nachádza v centre kruhu.



Obr. 5. Zobrazenie odrazových fólií po použití blesku.
Fig. 5. Projection of retro-reflexive targets after flash using.



Obr. 6. Detail.
Fig. 6. Detail.

Samotné vyhodnotenie snímok spočívalo v automatickom meraní reflexných terčov a prirodzene signalizovaných bodov, ako aj v manuálnom meraní prirodzene signalizovaných bodov. Následne sa vykonala identifikácia identických bodov na jednotlivých snímkach a spustil sa výpočet. Po kontrole výsledkov, odstránení omylov a hrubých chýb nasleduje opakovaný výpočet a opätovná kontrola výsledkov. Kvalitu výsledkov kontrolujeme na základe snímkových (pixelových) opráv na jednotlivých bodoch a snímkach, vzdialenosti a počtu určujúcich lúčov pri prieseku, uhla prieseku a nakoniec aj výslednej presnosti bodov v referenčnom súradnicovom systéme. Softvér PhotomodelerPro 5 všetky tieto údaje ponúka vo svojich výstupoch. Možné je aj grafické znázornenie opráv na snímke.

Dôležitým krokom pred samotným výpočtom je zvolenie stratégie určenie priestorových súradníc. Do úvahy prichádzajú nasledovné možnosti:

- Bez vličovacích bodov - určenie objektu vo voľnej sieti. Vytvorí sa model definovaný v súradnicovom systéme polohy a rotácie prvej snímky. Pre model potom môžeme definovať mierku zadaním jednej alebo viacerých dĺžok a takisto vieme model rotovať a posúvať buď cez súradnice 3 bodov alebo cez podmienku horizontálnosti, vertikálnosti a počiatku s.s. Toto je možné vykonať priamo v prostredí PM5.
- Bez vličovacích bodov - určenie objektu vo voľnej sieti s následnou priestorovou podobnostnou transformáciou mimo prostredia PM5. Tento postup vyžaduje poznať súradnice aspoň 3 identických bodov na transformáciu (optimálny počet je závislý od tvaru a veľkosti objektu).
- Priama perspektívna transformácia do referenčného súradnicového systému. Vyžaduje mať k dispozícii aspoň 4 body s priestorovými referenčnými súradnicami (optimálny počet je závislý od tvaru a veľkosti objektu, geometrickej kvality snímok, resp. kamery).

Počas výpočtu jednotlivými spôsobmi môžeme spresniť vnútornú orientáciu samokalibráciou počas projektu s rovnakými prvkami vnútornej orientácie (PvO) pre všetky snímky alebo s rôznymi PvO pre každú snímku. Ukázalo sa, že kalibrácia počas projektu zlepšuje výsledky zvlášť pri nestabilných nemetrických kamerách.

Výpočet na voľnej sieti je označovaný výrobcom softvéru PM5 ako najpresnejší. Praktické testy (Fraštia, Dizertačná práca, 2005) však dokazujú, že pre kompaktné kamery to neplatí, pravdepodobne pre menej stabilnú vnútornú orientáciu a dochádza tak k značným systematickým deformáciám modelu. Testovaná bola aj priama perspektívna transformácia na 6 vličovacích bodov, a to s fixnými VB a s uvážením presnosti VB 0.003 m.

Presnosť súradníc určených fotogrametricky udávaná softvérom PM5 je značne rôznorodá a pohybuje sa v rozpätí od 2 po 31 mm. Dôvodom je predovšetkým nevhodnosť voľnej siete, ale aj slabé spojenie (zlá konfigurácia spojovacích bodov) snímok medzi profilmi L a M kvôli prekážke v snímkovaní. Presnosť fotogrametrickej metódy bola preto počítaná z rozdielov geodetických a fotogrametrických súradníc, kde geodetické súradnice boli považované za etalón. Ako vličovacie, resp. identické body boli použité body I1, I4, K1, K4 a N1, N4. Výsledky porovnania geodetických a fotogrametrických súradníc sú uvedené v tab. 2 a 3.

Tab. 2. Presnosť fotogrametrickej metódy – celý objekt.

Tab. 2. Accuracy of photogrammetric method – whole object.

Metóda spracovania	σ_0 [pix]	max. oprava [pix]	σ_X [mm]	σ_Y [mm]	σ_Z [mm]
Voľná sieť + PPT*	0.226	1.011	12	21	8
PT**, VB ± 3 mm	0.240	1.271	10	19	8
PT, fixné VB	0.265	1.428	7	14	13

* PPT – priestorová podobnostná transformácia, **PT – perspektívna transformácia

Tab. 3. Presnosť fotogrametrickej metódy v rámci homogénneho bloku profilov I-L.

Tab. 3. Accuracy of the photogrammetric method inside homogenous block of profiles I-L.

Metóda spracovania	σ_0 [pix]	max. oprava [pix]	σ_X [mm]	σ_Y [mm]	σ_Z [mm]
Voľná sieť + PPT*	0.213	0.093	14	18	7
PT**, VB ± 3 mm	0.220	1.143	7	7	6
PT, fixné VB	0.245	1.225	4	4	6

* PPT – priestorová podobnostná transformácia, **PT – perspektívna transformácia

Presnosť fotogrametrickej metódy je nevhodná pre voľnú sieť a následnú priestorovú podobnostnú transformáciu. Odchýlky sa výrazne znižujú pri vličovacích bodoch, no aj tak nebola dosiahnutá uspokojivá presnosť po celej ploche objektu. Výrazná zmena nastáva u homogénneho bloku, kde bola dosiahnutá presnosť adekvátna geodetickej metóde. Samozrejme, je potrebné mať na mysli, že bola použitá lacná amatérska digitálna kamera, nie profesionálna fotogrametrická kamera.

Záver

Z experimentu je vidno, ako je fotogrametrická metóda citlivá na spôsob spracovania a geometriu stanovísk snímkovania a objektu. Dôležitá je aj správna voľba kalibračnej metódy. Výhody použitia digitálnych kamier sú nesporné a v kombinácii s vhodným spracovateľským softvérom je možné redukovať laboratórne a vyhodnocovacie práce na polovicu za súčasnej úspory finančných prostriedkov (náklady na film, vyvolanie ...). Nevýhodou kvalitných digitálnych kamier väčších formátov je zatiaľ ich stále vysoká cena. Vhodnejšie na podobné aplikácie sú digitálne zrkadlovky s rozlíšením viac ako 8 Mpix, ktoré majú stabilnejšiu vnútornú orientáciu. Článok však dokazuje, že je možné použiť aj kamery nižšej triedy pre niektoré inžinierske aplikácie, samozrejme, za predpokladu dobrých znalostí z danej problematiky.

Príspevok bol spracovaný VEGA, č. 1/4206/07.

Literatúra – References

Frašťia, M.: Kalibrácia a testovanie digitálnych kamier pre aplikácie blízkej fotogrammetrie. DDP, Bratislava, 2005.