

Tvorba presných priestorových modelov historických objektov metódou blízkej fotogrametrie

Marek Fraštia¹

Creation of the accurate spatial models of historical objects by the close-range photogrammetry method

Present market offers several software solutions for processing of convergent images, whereas these systems enable relatively great comfort of measurement and the more object visualization also. The paper is about problem of historical objects measurement with accuracy better than 1 cm by the method of close-range photogrammetry, whereas outputs are 2D and 3D vector models, orthophotoplans and 3D real photo-textured models. Advantages and disadvantages of photogrammetric method and its perspectives considering R&D of software are mentioned too.

Key words: digital photogrammetry, spatial model, photo-plan, visualization.

Úvod

Slovenská ekonomika zažíva rozvoj, ktorý sa začína pozitívne premietat' aj do ochrany nášho kultúrneho dedičstva. Po rokoch stagnácie a chátrania historických objektov začína slovenská spoločnosť investovať do pamiatok konečne verejné alebo súkromné finančné prostriedky, bez ktorých nemajú pamiatky šancu na prežitie. V tomto duchu sa rekonštruovalo alebo rekonštruje množstvo historických pamiatok ale oveľa väčšia časť ešte len čaká na svoje obnovenie. Samozrejme, v tomto procese je, okrem iného, nevyhnutné definovať presné geometrické charakteristiky objektov pre projekty sanácie alebo rekonštrukcie. A v tomto okamihu vstupujeme na trh my – geodeti. Čo ponúkame našim klientom okrem nutného geodetického know-how je spoľahlivosť, zodpovednosť a kvalitu. To však v súčasnosti alebo blízkej budúcnosti už nemusí stačiť. Klient chce (alebo bude chcieť) čoraz viac vidieť pridanú hodnotu. A tou je v tejto oblasti určite aj kvalitná vizualizácia na „rôzne spôsoby“. Vďaka digitálnej fotogrametrii to je dnes už bežná výbava fotogrametrických softvérov. Súčasný trh ponúka niekoľko takýchto softvérov pre spracovanie konvergentných alebo normálnych snímok, pričom tieto softvéry poskytujú pomerne veľký komfort merania a automatizácie spracovania obrazu. Bežne sa touto meracou technikou dosahuje priestorová presnosť meraného bodu $m_{XYZ} \leq 1$ cm pri snímkovaní zo vzdialenosti okolo 20 - 30 m, čo pre účely projektového zamerania postačuje. Samozrejme, presnosť sa zvyšuje priamo úmerne so skracovaním vzdialenosti snímkovania. Poslednou novinkou (nesporne prebratou z leteckej fotogrametrie) sú tzv. fotogrametrické skenery, ktoré na princípe obrazovej korelácie automaticky hľadajú identické pixely na rôznych snímkach, čím sa generujú husté mračná bodov, známe aj z laserového skenovania. Príspevok má za cieľ priblížiť možnosti a výhody blízkej digitálnej fotogrametrie v oblasti dokumentovania historických pamiatok, či už sa jedná o stavby, sochy, reliéfy, obrazy alebo iné historické diela.

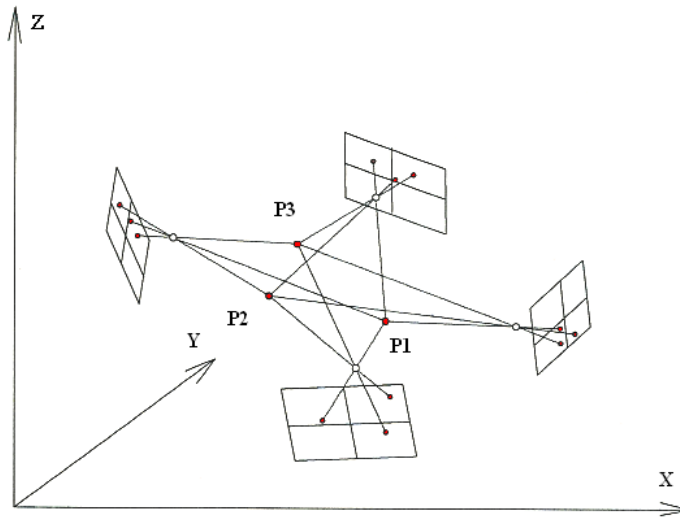
Blízka digitálna fotogrametria

Aj keď sa tradičná kategorizácia fotogrametrie vďaka novým technológiám stáva značne nepresnou, môžeme považovať blízku fotogrametriu za takú metódu, kde predmetové vzdialenosti nie sú veľké (také veľké ako u leteckej fotogrametrie), kde nie je použitá letecká alebo satelitná kamera a kde sa realizuje netopografické mapovanie (myslené na veľké územie). V tomto kontexte ide o meranie jednotlivých objektov rôznych veľkostí od niekoľko stoviek metrov po niekoľko milimetrov. Pritom sa využívajú tak metódy stereofotogrametrie typické pre diaľkový prieskum letecký a družicový ako aj metódy konvergentného snímkovania typického práve pre blízku fotogrametriu. A samozrejme aj jednosnímková fotogrametria, využívaná leteckou fotogrametriou na rovinatých územiach.

Konvergentné snímkovanie je viacsnímková fotogrametrická metóda vyžadujúca analytické spracovanie špeciálnym fotogrametrickým softvérom. Osi záberu kamier môžu byť vzhľadom na seba vo všeobecnej polohe, zvyčajne však smerujú tak, aby bol na susedných snímkach čo najväčší prekryt a aby bol pozorovaný objekt zobrazený na čo najväčšej ploche snímky. Z metodického hľadiska ide o vyrovnanie zväzku lúčov s matematickým modelom perspektívnej transformácie. Efektivitu (čas a presnosť) zvyšujú možnosti digitálnej fotogrametrie ako automatické meranie umelých terčov, automatická identifikácia kódových

¹ Ing. Marek Fraštia, PhD., Katedra geodézie, SvF STU, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, tel.: 421 7 59274 398, marek.frastia@stuba.sk
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 3. 11. 2009)

terčov, automatické vyhľadanie identických bodov na rôznych snímkach a automatická tvorba TIN modelu. Dôležitou vlastnosťou metódy je preurčenie pri zobrazení bodu na troch a viac snímkach. Tým je umožnená jednak kontrola hrubých chýb a jednak sa zvyšuje presnosť určenia bodov.



Obr. 1. Princíp konvergentného snímokovania.
Fig. 1. Principle of convergent photography.

Presnosť konvergentného snímokovania sa zvyšuje s rastúcim počtom snímkov z ďalších stanovísk. Konfigurácia stanovísk snímokovania a vlíčovacích bodov má na výslednú polohovú presnosť m_p podľa [3] nasledujúci vplyv:

$$m_p = M_s \cdot m'(o + v \cdot p) \quad (1)$$

kde m' je presnosť merania obrazových súradníc, o je faktor kvality prieseku a závisí od uhla prieseku určovacích lúčov a ich počtu na danom bode, v je deformačný faktor a určuje skrútenie a stočenie objektu ako voľnej siete a p je faktor počtu a rozloženia vlíčovacích bodov. Rozloženie stanovísk snímokovania a orientácie osí záberu samozrejme závisí od geometrického tvaru objektu a prístupnosti týchto stanovísk.

Základným matematickým modelom je perspektívna transformácia (podmienka kolineárnosti), ktorú vyjadrujú vzťahy (2):

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 - f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{21}(Y - Y_0) + m_{31}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y' &= y'_0 - f \frac{m_{12}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{32}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

Kde x' , y' sú snímkové súradnice, X , Y , Z sú referenčné súradnice, x'_0 , y'_0 sú súradnice hlavného bodu, m_{11} – m_{33} sú prvky ortogonálnej rotačnej matice a X_0 , Y_0 , Z_0 sú súradnice projekčného centra. Referenčné súradnice neznámych bodov sú vyjadrené zo vzťahov (2) pomocou vzťahov (3):

$$\begin{aligned} X &= X_{0i} + (Z - Z_{0i}) \frac{m_{11}(x' - x'_0) + m_{12}(y' - y'_0) + m_{13}f}{m_{31}(x' - x'_0) + m_{32}(y' - y'_0) + m_{33}f} = X_{0i} + (Z - Z_{0i}) \cdot N_{xi} \\ Y &= Y_{0i} + (Z - Z_{0i}) \frac{m_{21}(x' - x'_0) + m_{22}(y' - y'_0) + m_{23}f}{m_{31}(x' - x'_0) + m_{32}(y' - y'_0) + m_{33}f} = Y_{0i} + (Z - Z_{0i}) \cdot N_{yi} \end{aligned} \quad (3)$$

kde index i vyjadruje i -tu snímku. Súradnica Z sa spočíta zo snímkov ij porovnaním X -ových alebo Y -ových súradníc z rovníc (3):

$$\begin{aligned} X_{0i} + (Z - Z_{0i}) \cdot N_{xi} &= X_{0j} + (Z - Z_{0j}) \cdot N_{xj} \\ Z_{ij} &= \frac{X_{0j} - X_{0i} + Z_{0i}N_{xi} - Z_{0j}N_{xj}}{N_{xi} - N_{xj}} \end{aligned} \quad (4)$$

Samotný výpočet neznámych parametrov prebieha metódou najmenších štvorcov linearizáciou vzťahov (2) z čoho sa vypočítajú neznáme prvky vonkajšej orientácie (priestorové pretínanie nazad). Následne sa pomocou vzťahov (3) a (4) spočítajú približné hodnoty súradníc určovaných bodov (priestorové pretínanie napred) a v ďalšom kroku sa vykoná spoločné vyrovnanie zväzku lúčov pri ktorom sa odhadujú znova prvky vonkajšej orientácie spolu s neznámymi súradnicami. Pokiaľ nepoznáme presné hodnoty prvkov vnútornej orientácie, zavedieme ich do výpočtu ako neznáme a v spoločnom vyrovnaní sa odhadnú aj parametre prvkov vnútornej orientácie napr. podľa vzťahu (5):

$$\begin{aligned} (x'-x'_0) + \frac{(x'_y-x'_0)}{r'} \delta r + Px &= -f_x \frac{m_{11}(X-X_0) + m_{21}(Y-Y_0) + m_{31}(Z-Z_0)}{m_{13}(X-X_0) + m_{23}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} \\ (y'-y'_0) + \frac{(y'_y-y'_0)}{r'} \delta r + Py &= -f_y \frac{m_{12}(X-X_0) + m_{22}(Y-Y_0) + m_{32}(Z-Z_0)}{m_{13}(X-X_0) + m_{23}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} \end{aligned} \quad (5)$$

Kde δr je zložka radiálnej distorzie, Px a Py sú zložky decentračnej distorzie, m_{ij} sú prvky ortogonálnej rotačnej matice, r' je radiálna vzdialenosť a X , Y , Z sú súradnice objektových bodov, x' , y' sú snímkové súradnice, x'_0 , y'_0 sú súradnice hlavného bodu a f_x , f_y sú snímkové konštanty a vyjadrujú afinitu snímky.

Meranie historických pamiatok

Proces fotogrametrickej tvorby digitálneho modelu objektu môžeme rozdeliť na:

- snímkovanie – rekognoskácia, výber vhodnej kamery a optiky, výber vhodných stanovísk,
- vličovanie do referenčného s.s. – výber a meranie vličovacích bodov, meranie kontrolných mier,
- fotogrametrické spracovanie – predkalibrácia kamery, úprava snímok, vyhodnotenie (meranie) snímok, výpočet neznámych parametrov pri vyrovnaní zväzku lúčov, kontrola výpočtu, tvorba vektorového modelu z meraných bodov (body, úsečky, hrany, oblúky, plochy), textúrovanie plôch, export vektorového modelu, export fotoplánov, export textúrovaného modelu, export videa ...,
- domeranie nameraných prvkov, úprava vektorového modelu do finálnej podoby v CAD systéme, úprava fotoplánov do finálnej podoby.

Úprava vektorového modelu do finálnej podoby je potrebná z toho dôvodu, že málokedy sa podarí zamerať všetky požadované prvky fotogrametrickým spôsobom, resp. by to neúmerne zvyšovalo nákladnosť prác vzhľadom na zvyšujúci sa počet snímok alebo nedostupnosť stanovísk. Zvlášť to platí u komplikovanejších objektoch. Takisto často je potrebné retušovať fotoplány, keď sa na snímkach nachádzajú nechcené objekty ako stormy, autá apod. Meranie historických objektov je ďalej uvedené na príklade kaštieľa Radvanských.

Tvorba modelu kaštieľa Radvanských v Banskej Bystrici

Pôvodný opevnený kaštieľ vznikol pravdepodobne na mieste gotickej tvrdrze a pri stavbe kaštieľa použili časť pôvodnej architektúry. Začiatkom 16.storočia tu stála už výstavná budova s nástennými maľbami tzv. zelenej izby. V 16. a 17. storočí kaštieľ prestavali a rozšírili, pričom ho znovu opevnili a do nádvorja vložili stĺpovú arkádu. Úpravu datuje rok 1677. Začiatkom 19.storočia kaštieľ dobudovali do pravidelného pôdorysu s ústredným nádvorím. Priečelia vznikli scelením jednotlivých etáp v časoch romantizmu, keď kaštieľ dostal podobu so zuborezou atikou. Objekt pamiatkovo obnovili v roku 1958 [1].



Obr. 2. Pohľad na vonkajšie fasády.
Fig. 2. View on outer facades.

Poschodová štvorvežová stavba s ústredným dvorom, zachovaných je rad historických detailov, vstupný portál a mreže z čias prestavby, z obdobia tureckých nájzdov na stredné Slovensko. Po pamiatkovej úprave slúžil kaštieľ ako archív. V súčasnosti už niekoľko rokov chátra (obr. 2), začali sa však intenzívne vyvíjať aktivity k jeho obnove.



Obr. 3. Pohľad na nádvorie.

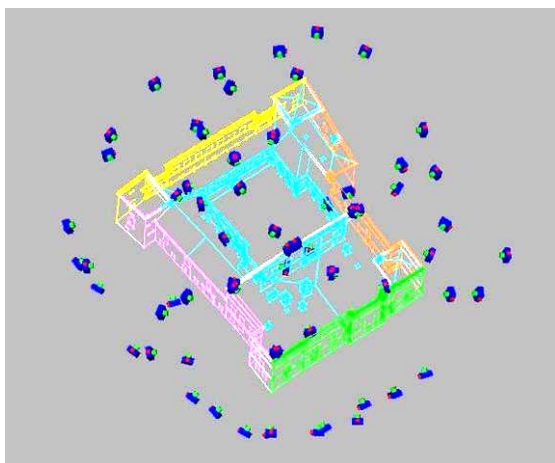
Fig. 3. View on courtyard.

Samotný kaštieľ má pomerne nepravidelný tvar (obr. 3) o rozmeroch cca 45 m x 50 m a výška sa pohybuje od 9 m do 13 m.

Pre projekt rekonštrukcie bolo potrebné kaštieľ zamerať a to tak jeho vnútorné priestory ako aj exteriérové plochy – fasády. Z takéhoto zamerania je potom možné vytvoriť digitálny model v grafickom počítačovom prostredí a z neho ďalej extrahovať rôzne pohľady, rezy a ďalšie výkresy potrebné pre projekt rekonštrukcie objektu. V tomto prípade išlo teda o meranie vonkajších fasád metódou blízkej fotogrametrie.

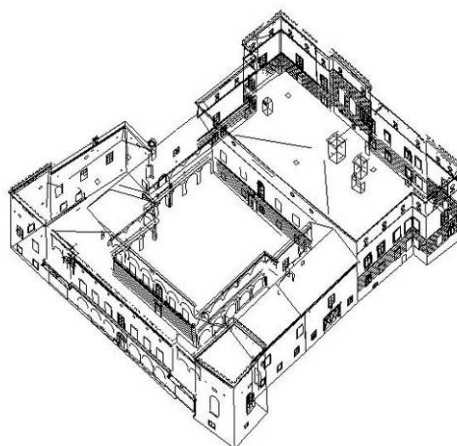
Snímkovanie

Snímky sa snažíme vyhotoviť tak, aby boli ostré, zobrazovali požadovanú podrobnosť a zobrazovali čo najväčšiu plochu objektu. Prítom tie isté časti objektu musia byť zobrazené na snímkach z rôznych stanovísk. Táto metóda snímkovania sa nazýva konvergentné snímkovanie. Celkovo bolo zhotovených 70 snímok objektu (obr. 4), ktoré boli použité pre vyhodnotenie. Snímky boli zhotovené digitálnou 10 Mpix. kamerou Nikon D200 s objektívom s pevným 20 mm ohniskom.



Obr. 4. Rozmiestnenie stanovísk snímkania.

Fig. 4. Geometry of camera stations.



Obr. 5. Axonometrický pohľad.

Fig. 5. Axonometric view.

Vlčovací body

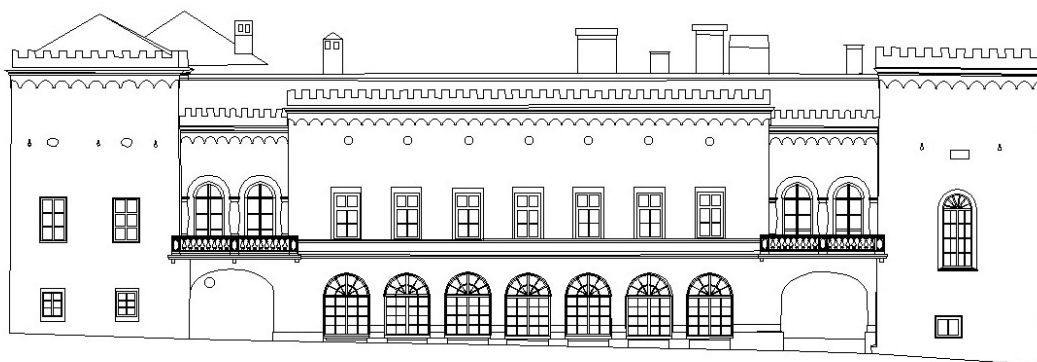
Aby sme meraný model dostali do geodetického súradnicového systému, bolo potrebné odmerať vlčovací body. Na tento účel postačuje 6 bodov, z dôvodov vyššej presnosti a kontroly bolo pre daný objekt meraných 24 vlčovacích bodov. Body boli merané tachymetrom s pasívnym odrazom a to polárnou

priestorovou metódou. Priestorovú presnosť vĺčovacích bodov postačuje zabezpečiť v hodnote 70 % požadovanej presnosti podrobných bodov, v tomto prípade je to hodnota $m_{XYZ} = 7$ mm.

Fotogrametrické spracovanie snímok

Snímky boli vyhodnocované v počítačovom prostredí špeciálneho fotogrametrického softvéru Photomodeler 6. Všetky body a prvky boli merané manuálne s presnosťou 1 pixel v snímkovej rovine, čím bola definovaná aj váha merania obrazových súradníc. Priestorová presnosť vyhodnotených bodov sa pohybuje od 3 mm do 30 mm, v závislosti od rôznych faktorov, 90 % bodov však malo presnosť lepšiu ako 10 mm. Nižšia presnosť bodov bola vždy zapríčinená ostrým uhlom priereku na bode, menším ako 25° . Maximálna oprava v snímkovej rovine nepresahovala 3.8 pixela. Porovnanie pôdorysných dĺžok (niekoľko desiatok metrov dlhých) určených geodetickým meraním s meraniami fotogrametrickými preukázali max. rozdiely v hodnote 15 mm. Takisto výšky na vybraných bodoch nevykázali väčší rozdiel ako 10 mm. Pri takomto porovnávaní je skôr ako v presnosti problém v identifikácii identického bodu, nakoľko body sú len prirodzene signalizované. Celkovo bolo priestorovo určených 3800 bodov, ktoré tvorili základnú kostru objektu. Tieto body sa museli nachádzať minimálne na 2 snímkach, zväčša však boli zobrazené na 3 až 4 snímkach. Ďalších 6000 bodov bolo určených jednosnímkovou metódou a to priamou vektorizáciou na vopred definovanej ploche. Priestorová poloha týchto bodov bola určená meraním len na 1 snímke a zväčša vyjadrovali detaily na plochách ako rôzne otvory, tehlové vzory na stenách alebo iné štukatérske ozdoby.

Ďalej boli vyhodnocované charakteristické prvky objektu ako čiary, hrany, oblúky, plochy. Výsledkom je priestorový vektorový model (obr. 5), ktorý je možné textúrovať originálnymi snímkami, čím sú textúry nielen fotoreálne ale aj polohovo presné. Žiadanými výstupmi pre projektovú dokumentáciu boli 2D pohľady (obr. 6), ktoré je možné doplniť o texturálne informácie, čím dostávame fotoplán (obr. 7).



Obr. 6. Vektorový model čelnej fasády.
Fig. 6. Vector model of front façade.



Obr. 7. Fotoplán v impozícii s vektorovou kresbou.
Fig. 7. Photo-plan in imposition with vector draw.

Prehľad metód blízkej fotogrametrie

Ako je spomenuté vyššie, využívajú sa v blízkej fotogrametrii nasledovné 4 metódy snímkovania, ku ktorým patria ich vlastné procedúry spracovania snímok. Najjednoduchšou je **jednosnímková fotogrametria**, ktorá vychádza z projekívnej transformácie medzi dvoma rovinami. Metóda je veľmi efektívna vďaka jednoduchosti, presnosti aj časovým úsporám. Vyhodnocuje sa len 1 snímka. Podmienkou je aby vyhodnocovaný objekt bol rovinný. **Stereofotogrametria** je efektívnejšia metóda ako konvergentné snímkovanie, pretože sa vyhodnocuje stereomodel, čím určujeme jedným meraním priamo priestorové referenčné súradnice. Podmienkou je vzájomná orientácia snímkovej dvojice v približne normálnom postavení, teda osi záberu by nemali byť mimobežné viac ako 10^0 . Stereofotogrametria je menej presná v hĺbkovej zložke a to v závislosti od základnicového pomeru. Nevýhodou je aj vysoká cena softvérov pre stereofotogrametriu. **Konvergentná fotogrametria** je viacsnímková metóda založená na blokovom vyrovnaní zväzku lúčov. Je to najpresnejšia ale zároveň najpracnejšia metóda. Určované body musia byť minimálne na 2 snímkach, aby mohla byť rekonštruovaná ich priestorová poloha. Každý bod je potrebné merať individuálne na každej snímke. Cena softvérov je rôzna ale podstatne nižšia ako softvérov pre stereofotogrametriu. **Fotogrametrický skener** je v oblasti blízkej fotogrametrie pomerne novinkou, aj keď v leteckej fotogrametrii je využívaný už niekoľko rokov. Presnosťou a spôsobom snímkovania je to metodicky stereofotogrametria, avšak spôsob vyhodnotenia je principiálne iný. Snímkové body (pixely) sú merané plne automaticky na princípe obrazovej korelácie. Tým sa z fotogrametrického skenera stáva nesmierne efektívny nástroj. Nevýhodou je prakticky nefunkčnosť v prípade objektov bez textúry, prípadne väčší šum na objektoch s málo výraznou textúrou.

Existujú aj ďalšie modifikácie spomenutých metód a samozrejme, je možné tieto metódy vzájomne kombinovať, čo aj väčšina softvérov využíva.



Obr. 8. Digitálny model.
Fig. 8. Digital model.



Obr. 9. Pôvodná snímka (naľavo) a digitálny model (napravo).
Fig. 9. Original image (left) and digital model (right).

Záver

Výhody fotogrametrických metód oproti klasickým geodetickým metódam spočívajú okrem iného vo veľkej úspore terénnych prác, bezkontaktnom meraní (meranie prebieha na PC), vysokom geometrickom a temporálnom rozlíšení (meranie detailov a merania objektu zobrazenom v úzkom časovom reze), v stálom vizuálnom kontakte s meraným objektom počas celého procesu spracovania a v možnosti projekcie fotoreálnych texturálnych informácií o meraných povrchoch do výsledkov [2]. To dáva jednak presnú predstavu o stave vonkajších fasádnych materiálov, umožňuje tieto rastrové obrazy priamo vektorizovať (merať), čím dostávame ortogonálny priemet a jednak približuje výsledný počítačový model k vyššiemu stupňu virtuálnej reality. Je potrebné pripomenúť, že snímka je centrálna projekcia reality a nie ortogonálna, preto meranie na originálnych snímkach nemôžeme porovnať s meraním na mapách, ktoré vznikli ortogonálnou projekciou. Fotogrametrické aplikácie tak vyžadujú znalosti nielen z oblasti geodézie ale aj jej špecializovaného odvetvia - fotogrametrie.

*Príspevok je súčasťou riešenia projektu č. 1/4206/07
za podpory vedeckej grantovej agentúry VEGA.*

Literatúra – References

- [1] <http://www.zamky.sk/?q=node/3&mon=60173>
- [2] Fraštia, M.: Possibilities of Using Inexpensive Digital Cameras in Applications of Close-Range Photogrammetry. In: *Slovak Journal of Civil Engineering 2005/2. ISSN 1210-3896. pp. 20-28s.*
- [3] Kraus, K.: Photogrammetry: Advanced Methods and Applications. 1st english ed. Bonn: Dümmler, 1997, p. 466.