

Využitie digitálnej fotogrametrie pri štruktúrnej analýze skalných svahov

PATRICIA EKKERTOVÁ a VLADIMÍR GREIF

Katedra inžinierskej geológie Prírodovedeckej fakulty UK, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava
ekkertova@fns.uniba.sk; greif@fns.uniba.sk

The use of digital photogrammetry for structure analysis of the rock slopes

The aim of this work was the development of methodology for measuring orientation of discontinuities of rock slopes with terrestrial digital photogrammetry and its verification in use. Selected photos were processed by the software Photomodeler Scanner, where a cloud of 3D points was created from pairs of images, which allowed to automatically determine and plot of fractures in the program Split-Fx. Analysis of results allowed to create a graph of optimal distance from the camera position to rock slope to height of slope with showing the boundary distance and optimal distance between the camera positions, for the focal distances 16 and 35 mm. The result of analysis was also the creation of a qualitative evaluation methodology of cloud points.

Key words: digital photogrammetry, rock slope, structural analysis, pointcloud

Úvod

Fotogrametria predstavuje technológiu s dlhodobým využitím a vývojom, počas ktorého sa spôsob získavania informácií o objektoch zobrazených na snímkach menil z metód využívajúcich opticko-mechanické prístroje na metódy, ktoré predstavujú plne digitalizovanú prácu s digitálnymi snímkami a fotogrametrickým softvérom (Linder, 2006).

V priebehu niekoľkých posledných rokov sa výrazne zvýšila dôležitosť spracovania digitálneho obrazu vo fotogrametrii. Rozhodujúcimi činiteľmi, ktoré prispeli k tomuto vývoju, boli podstatné zvýšenie kapacity počítačov a výroba digitálnych fotoaparátov. Súbežne sa vyvíjali metódy spracovania digitálneho obrazu, ako aj fotogrametrické algoritmy, ktoré v konečnom dôsledku pripravili cestu aplikáciám digitálnej fotogrametrie.

Geometrickým princípom vzniku fotogrametrickej snímky je centrálna projekcia. Vzťah medzi predmetom a jeho fotogrametrickou snímkou v čase expozície definuje tzv. fotogrametrický zväzok lúčov prechádzajúci stredom premietania. Keď je známy tvar a poloha fotogrametrického zväzku lúčov, je možné rekonštruovať tvar a veľkosť predmetov zobrazených na snímke. Tvar fotogrametrického zväzku lúčov určujú prvky vnútornej orientácie, zatiaľ čo jeho poloha v priestore určuje 6 prvkov vonkajšej orientácie snímky. V pozemnej fotogrametrii sú to priestorové súradnice fotogrametrického stanoviska, t. j. stred premietania, otočenie snímky φ (uhol medzi horizontálnym priemerom osi záberu a daným smerom v horizontálnej rovine), sklon osi záberu ω (uhol medzi osou záberu a horizontálnou rovinou) a pootočenie snímky χ

(uhol, ktorý zvierajú spojnice protilahlých rámových značiek s určitým smerom alebo priamkou). Uhly φ a ω určujú smer osi záberu v priestore, pootočenie χ predstavuje pootočenie snímky vo vlastnej rovine okolo osi záberu. Polohu predmetov zobrazených na snímke vyjadrujú snímkové súradnice (obr. 1; Bitterer, 2005).

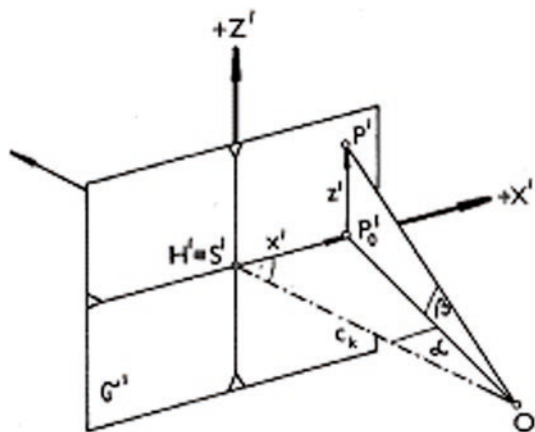
V digitálnej fotogrametrii sú implementované známe algoritmy z klasickej fotogrametrie, ako je triangulácia, snímková orientácia, ortoprojekcia a stereoskopické videnie, prináša však aj ďalšie možnosti, napr. spracovanie obrazu. Veľký prínos spočíva v možnosti priameho kombinovania dát spracovaných metódou digitálnej fotogrametrie s mapami vo vektorovej alebo rastrovej podobe (Šandorfi a Halvoň, 2010).

Krátkorozsahová pozemná digitálna fotogrametria je čoraz viac používaná ako mapovacia metóda na zobrazenie morfológie prírodných a umelých skalných svahov v 3D rozmere. Často vyzdvihovanými výhodami tejto metódy, ako aj metódy laserového skenovania (Sturzenegger a Stead, 2009) sú schopnosť prezebrať neprístupné strmé a vysoké skalné steny, znížené riziko pre pracovníkov – keďže pozorovanie je možné podniknúť zo vzdialenejších bezpečných miest chránených pred dopravou a padaním skál, vznik trvalého záznamu vlastností skalného svahu v určitom čase a možnosť zistenia veľkosti orientácie diskontinuit, keď je meranie geologickým kompasom ovplyvnené prítomnosťou rudných telies. Tieto techniky pôsobia ešte atraktívnejšie vďaka metódam, ktoré umožňujú automatické, časovo efektívne rozpoznávanie diskontinuit na 3D modeloch (Kemeny a Donovan, 2005; Kemeny et al., 2006; Ferrero et al., 2008).

Sturzenegger a Stead (2009) sa zaoberali porovnávaním zistených orientácií puklín v teréne a získaných orientácií metódami pozemnej digitálnej fotogrametrie ako aj porovnávaním presnosti merania orientácií diskontinuít pomocou pozemných snímacích metód – digitálnej fotogrametrie voči laserovému skenovaniu, pričom svoje výsledky porovnávali aj s výsledkami ďalších autorov (Coggan et al., 2007; Krosley et al., 2006). Výsledky ich práce dokazujú vysokú presnosť merania orientácií diskontinuít týmito metódami. Metódy pozemného snímání ponúkajú možnosť merať orientáciu diskontinuít na omnoho väčšej ploche než pri použití geologického kompasu. Optimálne nastavenia na získanie snímok a geometrie systému sú špecifikované v práci Bircha (2006) a ďalšie detaily možno nájsť aj v prácach Frasera (1996) a El-Hakima et al. (2003).

Kvantifikáciou orientácie diskontinuít a stálosťou vysokých horských skalných svahov a veľkých zosuvov použitím metódy pozemnej diaľkovej digitálnej fotogrametrie a laserového skenovania sa zaoberali Sturzenegger a Stead (2009b) v štyroch lokalitách v kanadských Skalných horách. V rámci metódy digitálnej fotogrametrie použili fotoaparát Canon EOS 30D s použitím rozličných ohniskových vzdialeností objektívu (20, 50, 200 a 400 mm) a na spracovanie fotografií použili softvér 3DM Calibcam/Analyst Software (ADAM Technology, 2007).

Charakteristika diskontinuít pozostáva z hlavných prvkov štruktúrnej analýzy, vrátane vymedzenia geometrických vlastností diskontinuity, ako je priestorová poloha, orientácia, veľkosť a drsnosť (ISRM, 1978). Podľa Frasera (1996) presnosť stereomodelu v digitálnej fotogrametrii závisí najmä od geometrie systému, t. j. relatívnej pozície fotoaparátu a objektu. Presnosť výrazne závisí aj od zadania 3D modelu do lokálneho alebo globálneho referenčného systému. Pötsch et al. (2006) tiež poukázali na spôsob merania diskontinuít vysokých svahov použitím pozemnej digitálnej fotogrametrie. Tannant et al. (2006) skúmali potenciál pozemnej digitálnej fotogrametrie pre prieskum v prostredí povrchovej ťažby.



Obr. 1. Snímkové súradnice a uhly.

Fig. 1. The frame coordinates and angles.

Metodický postup

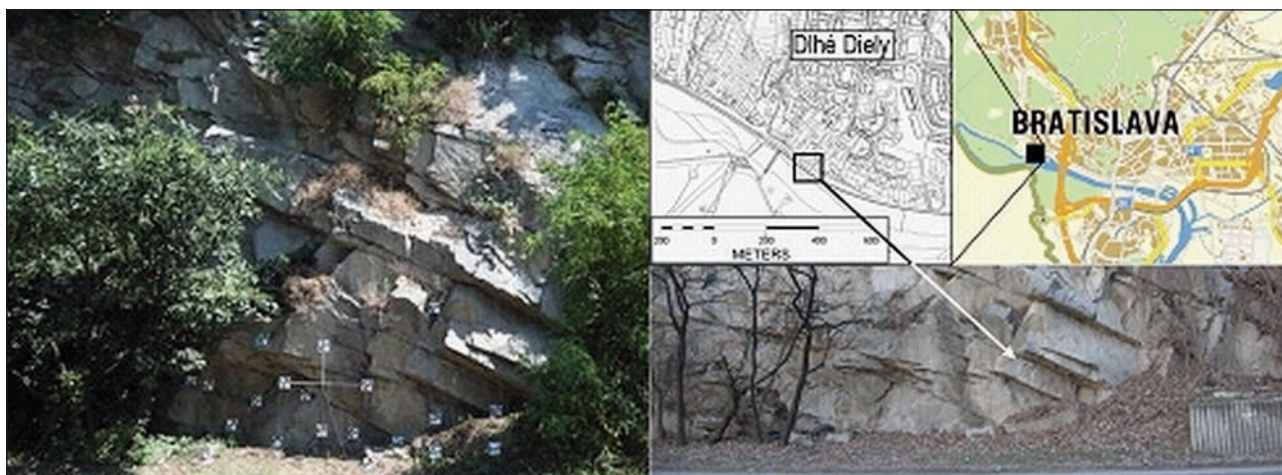
Na overenie metodického postupu v praxi boli pre digitálne snímkovanie vybrané nasledujúce modelové lokality: skalný svah v odreze Devínskej cesty spájajúcej bratislavské mestské časti Karlova Ves a Devín, neďaleko vodného zdroja Sihoť, s výškou približne 7 m (obr. 2); Románsky palác, skalný svah nachádzajúci sa v severnej časti masívu Spišského hradu v okrese Spišská Nová Ves v Košickom kraji, s výškou približne 3,5 m (obr. 3) a skalný svah v areáli uzavretého kameňolomu Srdce na SZ svahu Devínskej Kobyly, približne 600 m juho-východne od bytovej zástavby sídliska Podhorské v Devínskej Novej Vsi, s výškou približne 5 m (obr. 4).

Na snímání skalných svahov bol použitý digitálny fotoaparát Canon EOS 5D Mark II; 21,1 MPix s ohniskovou vzdialenosťou objektívu 16 mm a/alebo 35 mm.

Súčasťou prác bol proces kalibrácie objektívu digitálneho fotoaparátu, ktorý spočíval vo vytvorení dvanástich snímok štvorcovej kalibračnej siete, umiestnenej na rovnej podložke za pomoci statívu s použitím objektívu, ktorý bolo potrebné nakalibrovať. Prvé štyri snímky boli vytvorené z každej strany siete vo vodorovnej polohe fotoaparátu. Pri nasledujúcich štyroch fotografiách bol fotoaparát pootočený o 90° doprava od horizontálnej osi a pri tretej štvorici fotografií bol fotoaparát pootočený o 90° doľava od horizontálnej osi. Všetkých dvanásť fotografií bolo vložených do softvéru Photomodeler Scanner a v procese automatickej kalibrácie boli fotografie nakalibrované.

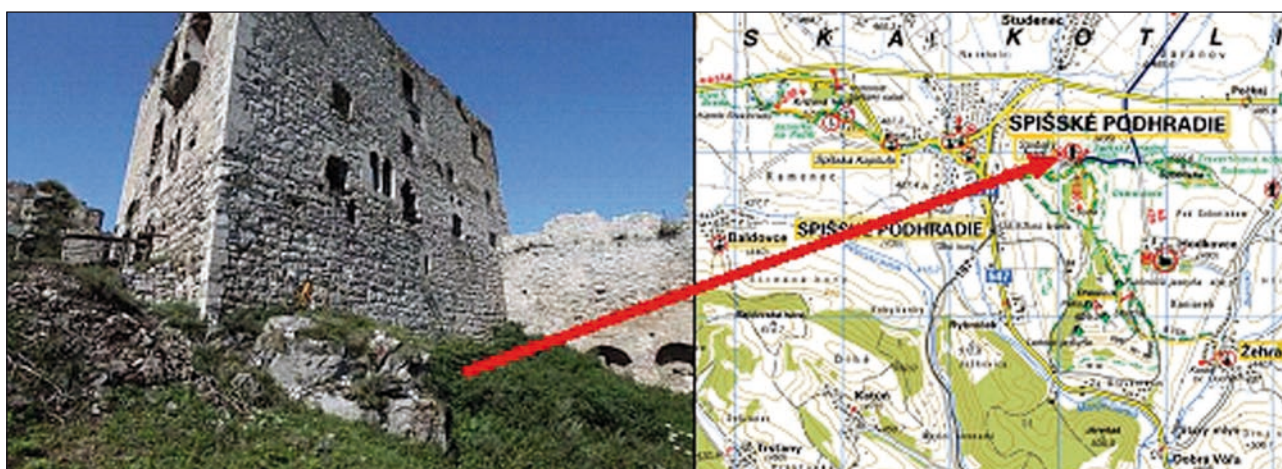
Pred samotným vytvorením snímok bolo na skalný svah náhodne rozmiestnených dvadsať kódových terčov s veľkosťou 20 x 20 cm, ktoré boli vygenerované softvérom Photomodeler Scanner. Použitie kódových terčov nie je nevyhnutné, avšak výrazne urýchľuje a uľahčuje spracovanie digitálnych fotografií pri tvorbe mračna 3D bodov v programe Photomodeler Scanner, pretože umožňuje automatickú identifikáciu totožných bodov na jednotlivých digitálnych snímkach. Na skalný svah bol umiestnený aj zorientovaný osový kríž na určenie orientácie skalného svahu voči svetovým stranám (obr. 5).

Skalný svah bol zosnímaný väčším počtom snímok z viacerých stanovísk, z rôznych vzdialeností a uhlov na získanie a nájdenie správneho pomeru ohnisková vzdialenosť – uhol medzi pozíciami fotoaparátu – vzdialenosť od skalného svahu – rozmery skalného svahu, ktorý by bol predpokladom na vytvorenie dostatočne veľkého a kvalitného mračna 3D bodov v softvéri Photomodeler Scanner. Pri snímání bolo nutné zachovať princípy stereofotogrametrie, a to prekrytie jednotlivých dvojíc fotografií (ľavej a pravej fotografie) pri dodržaní podmienky, že hodnota uhla medzi dvomi snímkami by mala byť optimálne 10 – 30° a pomer b/h , t. j. pomer medzi vzdialenosťou dvoch pozícií fotoaparátu (b) a vzdialenosťou pozície fotoaparátu od skalného svahu (h) pre danú dvojicu snímok by mal mať hodnotu 0,1 – 0,5. Výber ohniskovej vzdialenosti priamoúmerne závisel od rozmerov skalného svahu, to znamená, že čím boli rozmery skalného svahu väčšie, tým väčšia vzdialenosť, a teda aj väčšia ohnisková



Obr. 2. Lokalita Devínska cesta.

Fig. 2. The site Devínska cesta.



Obr. 3. Lokalita Románsky palác.

Fig. 3. The site Roman Palace.



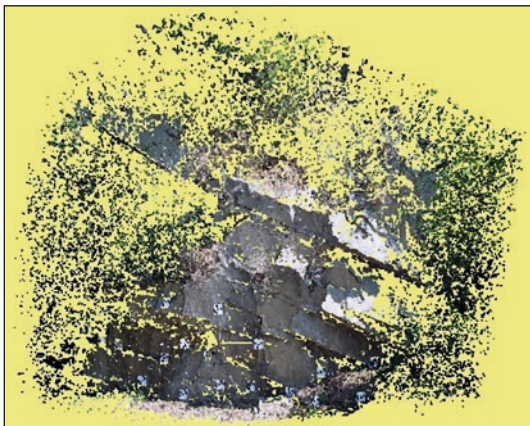
Obr. 4. Lokalita Srdce.

Fig. 4. The site Srdce.



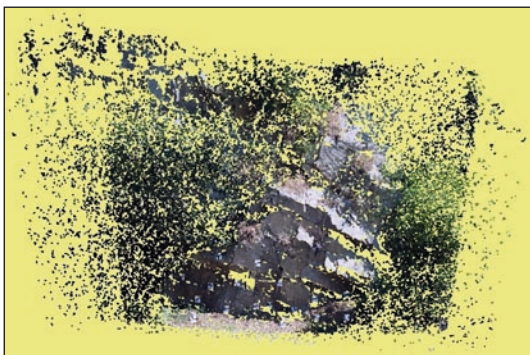
Obr. 5. Osový kríž na určenie orientácie skalného svahu voči svetovým stranám.

Fig. 5. The axial cross for identification of rock slope orientation towards cardinal points.



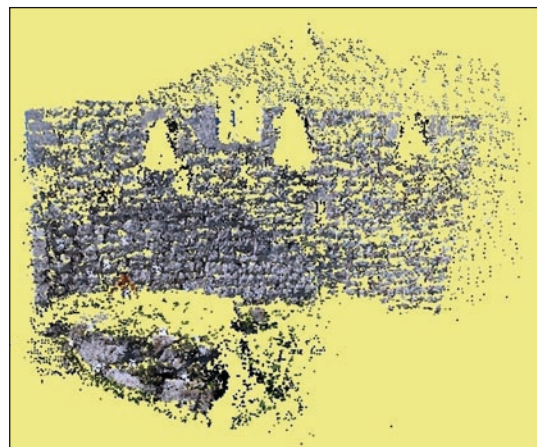
Obr. 6. Mračno 3D bodov – Devínska cesta, ohnisková vzdialenosť 16 mm.

Fig. 6. The pointcloud – Devínska cesta, focal distance 16 mm.



Obr. 7. Mračno 3D bodov – Devínska cesta, ohnisková vzdialenosť 35 mm.

Fig. 7. The pointcloud – Devínska cesta, focal distance 35 mm.



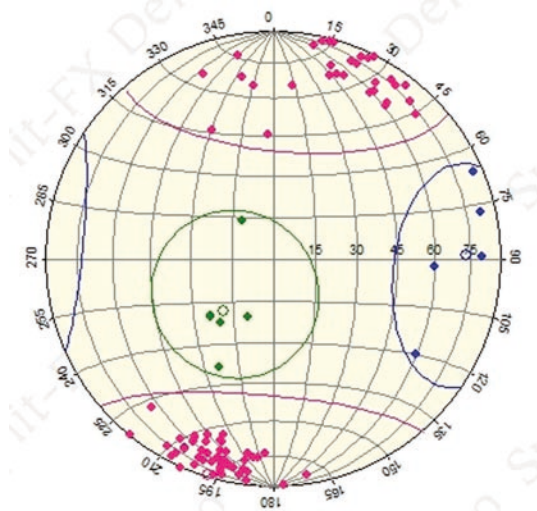
Obr. 8. Mračno 3D bodov – Románsky palác, ohnisková vzdialenosť 16 mm.

Fig. 8. The pointcloud – Roman Palace, focal distance 16 mm.



Obr. 9. Mračno 3D bodov – Srdce, ohnisková vzdialenosť 35 mm.

Fig. 9. The pointcloud – Srdce, focal distance 35 mm.



Obr. 10. Schmidtov diagram pólů diskontinuit – Devínska cesta, ohnisková vzdialenosť 16 m.

Fig. 10. The Schmidt graph – Devínska cesta, focal distance 16 mm.

vzdialenosť objektívu, bola potrebná na zachytenie celého skalného svahu.

Výber fotografií na spracovanie a vytvorenie mračna 3D bodov v programe Photomodeler Scanner závisel od vizuálneho posúdenia parametrov snímania každej fotografie, prípadne každej dvojice fotografií, a to vzdialenosti pozície fotoaparátu od skalného svahu, uhla medzi dvojicou fotografií a dostatočnej veľkosti kódových terčov na snímkach. Po výbere fotografií boli snímky zidealizované, čím bolo odstránené skreslenie na základe orientačných a kalibračných parametrov tak, aby bolo dosiahnuté ideálne centrálné premietanie. Ďalším

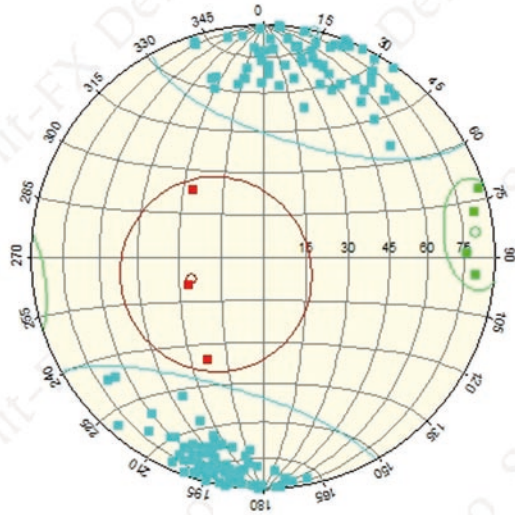
krokom pri vytváraní mračna 3D bodov bola automatická identifikácia a označenie kódových terčov na snímkach. Ak softvér nebol schopný automaticky identifikovať niektoré kódové terče, bolo použité manuálne subpixelové označenie a následné zreferencovanie. V prípade väčšej výšky skalného svahu alebo nerovnomerného rozmiestnenia kódových terčov bol skalný svah manuálne doplnený o ďalšie zreferencované body. Pred procesom tvorby mračna 3D bodov bolo potrebné zadať škálu a orientáciu skalného svahu. Vzdialenosť medzi dvomi kódovými terčmi na osom kríži určila škálu. Osový kríž slúžil aj na určenie orientácie skalného svahu, a to priradením dvoch terčov v horizontálnom smere k osi X a priradením dvoch terčov vo vertikálnom smere k osi Z.

Pri vytváraní mračna 3D bodov boli menené nastavenia parametrov – kroku vzorkovania (*sampling rate*) a hĺbkového rozsahu (*depth range*). Krok vzorkovania určoval interval vzorkovania bodov na ploche skalného svahu a hĺbkový rozsah udával, v akej vzdialenosti pred a za myslenou stredovou rovinou skalného svahu má program vytvárať 3D body. Výsledkom spracovania snímok bolo mračno 3D bodov (obr. 6 – 9).

Výsledné mračno bodov bolo vo forme textového súboru importované do softvéru Split-Fx, ktorý umožnil manuálne vyznačenie plôch diskontinuit skalného svahu, následné automatické meranie ich orientácií a zakreslenie do Schmidtovej ekvatoriálnej projekcie (obr. 10 – 13).

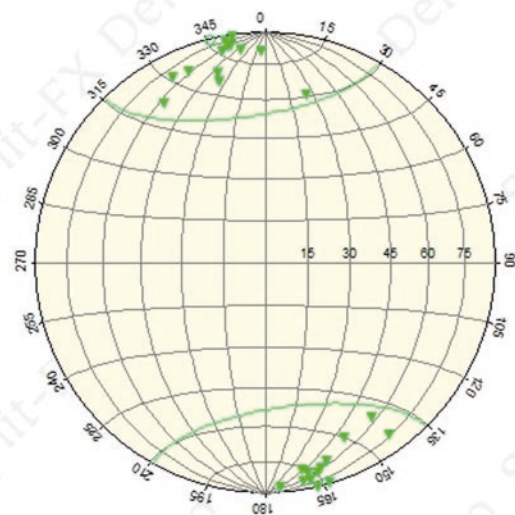
Analýza výsledkov

Cieľom analýzy výsledkov bolo zistenie optimálnych parametrov snímania skalného svahu so zameraním sa na určenie optimálnej vzdialenosti pozície fotoaparátu od skalného svahu pre určité ohniskové vzdialenosti objektívu (16 a 35 mm) vzhľadom na rozmery – výšku



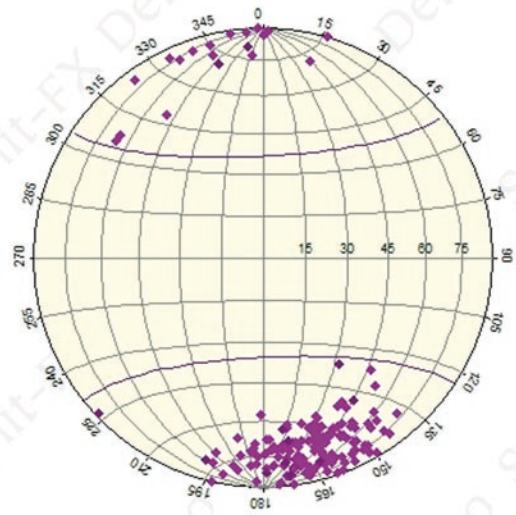
Obr. 11. Schmidtov diagram pólů diskontinuit – Devínska cesta, ohnisková vzdialenosť 35 mm.

Fig. 11. The Schmidt graph – Devínska cesta, focal distance 35 mm.



Obr. 12. Schmidtov diagram pólů diskontinuit – Románsky palác, ohnisková vzdialenosť 16 mm.

Fig. 12. The Schmidt projection poles of discontinuities – Roman Palace, focal distance 16 mm.

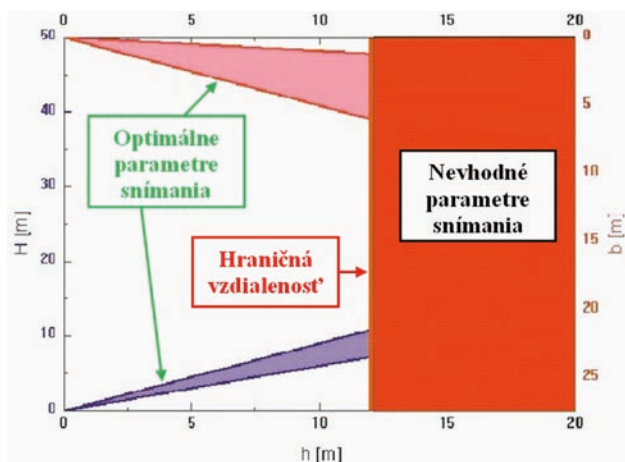


Obr. 13. Schmidtov diagram pólů diskontinuit – Srdce, ohnisková vzdialenosť 35 mm.

Fig. 13. The Schmidt projection poles of discontinuities – Srdce, focal distance 35 mm.

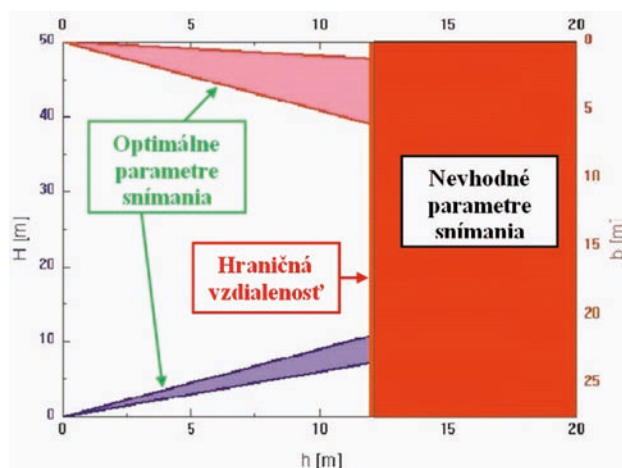
Tab. 1
Optimálne vzdialenosti pozície fotoaparátu od skalného svahu
The optimal distances of camera positions from rock slope

Ohnisková vzdialenosť objektívu (mm)	Výška skalného svahu (m)	Pôvodný pomer vzdialenosti pozície fotoaparátu k výške svahu a pôvodná vzdialenosť		Optimálny pomer vzdialenosti pozície fotoaparátu k výške svahu a pôvodná vzdialenosť	
16	3,5	1,24 – 2,16;	4,2 – 7,4 m	0,6 – 0,9;	2,1 – 3,15 m
	7,0	0,6 – 0,9;	4,2 – 6,2 m	0,6 – 0,9;	4,2 – 6,3 m
35	5,0	2,38 – 2,64;	12,0 – 13,2 m	1,75 – 2,0;	8,7 – 10,0 m
	7,0	1,75 – 2,0;	12,2 – 13,8 m	1,75 – 2,0;	12,2 – 14,0 m



Obr. 14. Optimálna vzdialenosť od svahu „h“ k výške svahu „H“ s vyznačenou hraničnou vzdialenosťou a optimálna vzdialenosť medzi pozíciami fotoaparátu „b“ pre objektív 16 mm.

Fig. 14. The optimal distance from the slope „h“ to the slope „H“ showing the boundary distance and optimal distance between the camera positions „b“ for the 16 mm focal distance.



Obr. 15. Optimálna vzdialenosť od svahu „h“ k výške svahu „H“ s vyznačenou hraničnou vzdialenosťou a optimálna vzdialenosť medzi pozíciami fotoaparátu „b“ pre objektív 35 mm.

Fig. 15. The optimal distance from the slope „h“ to the slope „H“ showing the boundary distance and optimal distance between the camera positions „b“ for the 35 mm focal distance.

– svahu. Súčasťou analýzy bolo aj zhodnotenie vzťahu medzi pomerom b/h a ohniskovou vzdialenosťou objektívu a zistenie hraničnej vzdialenosti, po prekročení ktorej je veľkosť kódových terčov umiestnených na skalnom svahu dostatočne veľká na správnu identifikáciu programom Photomodeler Scanner. Hraničná vzdialenosť bola určená podľa veľkosti jedného pixelu fotografie, čo by malo zodpovedať maximálne 0,4 cm v skutočnosti. Cieľom analýzy bolo aj vytvorenie klasifikácie na hodnotenie mračna bodov podľa počtu bodov na 1 m².

Vzťah medzi ohniskovou vzdialenosťou, vzdialenosťou pozície fotoaparátu od skalného svahu a rozmermi skalného svahu

Výsledky práce potvrdili všeobecné pravidlo priamo-úmernej závislosti medzi veľkosťou ohniskovej vzdialenosti, vzdialenosťou pozície fotoaparátu od skalného svahu a rozmermi skalného svahu. Tab. 1 zobrazuje zistené optimálne vzdialenosti snímania skalného svahu pre použité ohniskové vzdialenosti a rozmery skalného svahu.

Pri použití objektívu s ohniskovou vzdialenosťou 16 mm boli preukázané najlepšie výsledky pri spracovaní snímok z lokality Devínska cesta. Vzdialenosť pozície fotoaparátu od skalného svahu bola v tomto prípade 4,2 – 6,2 m pri výške skalného svahu približne 7,0 m. Pomer vzdialenosti pozície fotoaparátu od svahu k výške skalného svahu bol 0,6 – 0,9 a bol určený ako optimálny pomer pri použití objektívu s uvedenou ohniskovou vzdialenosťou. Objektív s ohniskovou vzdialenosťou 16 mm bol použitý aj v lokalite Spišský hrad-Románsky palác, kde bol skalný svah snímajú z približne rovnakej vzdialenosti ako v lokalite Devínska cesta. Výška svahu však bola len 3,5 m, takže pomer medzi vzdialenosťou od svahu k výške svahu mal príliš veľkú hodnotu a to možno považovať za príčinu vzniku malého počtu 3D bodov pri spracovaní v programe Photomodeler Scanner (obr. 8).

V prípade použitia objektívu s ohniskovou vzdialenosťou 35 mm v lokalite Devínska cesta a v kameňolome Srdce boli lepšie výsledky taktiež v lokalite Devínska cesta. Vzdialenosť pozície fotoaparátu od skalného svahu bola 12,0 – 14,0 m a pomer medzi touto vzdialenosťou a výškou

skalného svahu mal hodnotu 1,75 – 2,00, čo možno považovať za optimálny pomer. Skalný svah v lokalite Srdce bol snímaný zo vzdialenosti približne totožnej ako na Devínskej ceste, je nutné však podotknúť, že výška snímaného skalného svahu bola v tomto prípade menšia – približne 5 m. Na zachovanie optimálneho pomeru mala byť vzdialenosť snímání menšia, čo by zaručilo väčšie výsledné mračno bodov.

Významnou podmienkou na vytvorenie veľkého počtu 3D bodov je veľkosť kódových terčov na snímkach. Nepostačuje len dodržať pomer medzi výškou skalného svahu, vzdialenosťou snímání a ohniskovou vzdialenosťou objektívu, ale je potrebné myslieť na hranicu, za ktorou je veľkosť kódových terčov na snímkach príliš malá na automatickú a správnu identifikáciu terčov programom Photomodeler Scanner. Hraničná hodnota, pri ktorej je veľkosť terčov dostatočná, je, ak platí, že 1 pixel fotografie predstavuje 0,4 cm v skutočnosti. Hraničná hodnota bola určená na základe mierky – známych rozmerov ramien osového kríža použitého pri snímání, pričom bolo zistené, koľko pixelov predstavuje dĺžku ramena, a na základe toho bolo možné vypočítať veľkosť jedného pixelu v skutočnosti. Pri použití objektívu s ohniskovou vzdialenosťou 16 mm je pri použití terčov veľkosti 20 x 20 cm hraničná vzdialenosť 12 m od skalného svahu (obr. 14). Ak je na zachytenie skalného svahu potrebná väčšia vzdialenosť, je nutné použiť objektív s väčšou ohniskovou vzdialenosťou. Pri ohniskovej vzdialenosti 35 mm je hraničná vzdialenosť pre terče veľkosti 20 x 20 cm približne 24,6 m (obr. 15).

Vzťah medzi pomerom b/h a ohniskovou vzdialenosťou

Pomer b/h predstavuje pomer medzi vzájomnou vzdialenosťou pozícií fotoaparátu („ b “ – base) a vzdialenosťou pozície fotoaparátu od skalného svahu („ h “ – height). Veľkosť „ h “ sa v teréne stanoví podľa ohniskovej vzdialenosti

Tab. 2
Optimálne vzdialenosti medzi pozíciami fotoaparátu
The optimal distances between camera positions

Ohnisková vzdialenosť objektívu (mm)	Optimálne h (m)	Optimálne b (m)
16	4,0 – 6,0	0,6 – 2,0
35	12,0 – 14,0	1,5 – 6,0

objektívu a podľa rozmerov skalného svahu (tab. 1). Hodnota „ b “ je potom v teréne určená podľa podmienky: $b/h = 0,1 - 0,5$. V tab. 2 sú uvedené optimálne vzdialenosti medzi pozíciami fotoaparátu pre použité ohniskové vzdialenosti 16 a 35 mm, ktoré vychádzajú z optimálnych vzdialeností snímání (tab. 1).

Hodnotenie mračna 3D bodov

Na hodnotenie mračna 3D bodov bolo nutné nájsť spôsob, ako správne a objektívne zhodnotiť kvalitu mračna bodov a vytvoriť klasifikáciu hodnotenia, ktorú by bolo

možné aplikovať na akúkoľvek dvojicu snímok a akýkoľvek skalný svah.

Princípom hodnotenia bolo zistenie počtu získaných 3D bodov na 1 m² v mračnách bodov jednotlivých dvojíc fotografií vytvorených pomocou objektívu s ohniskovou vzdialenosťou 16 mm a 35 mm v lokalite Devínska cesta. V mračnách 3D bodov jednotlivých dvojíc boli náhodne vybrané dve oblasti s plochou 1 m² (obr. 16), v ktorých bol zistený počet 3D bodov.

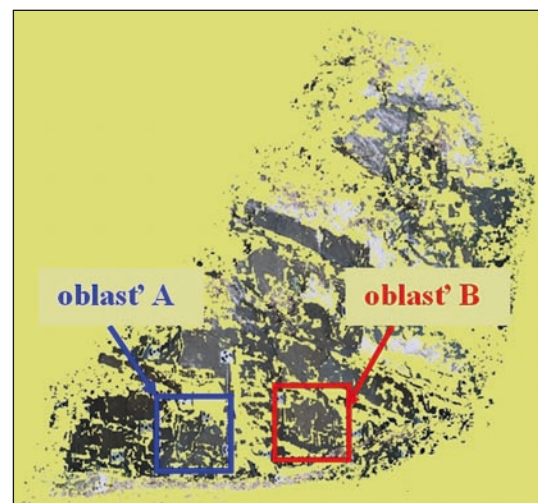
Zistený počet 3D bodov na 1 m² v oblasti A a v oblasti B z jednotlivých dvojíc fotografií je uvedený v tab. 3.

Z počtu zistených bodov v oblastiach A a B bol vypočítaný priemer, ktorý reprezentuje priemerný počet bodov na 1 m² pre jednotlivé dvojice fotografií a bolo k nemu priradené hodnotenie podľa vytvorenej klasifikácie na hodnotenie počtu bodov na 1 m²:

< 5 000 bodov	= zlé
5 000 – 15 000 bodov	= dobré
> 15 000 bodov	= výborné

Diskusia a záver

Výsledky práce potvrdili možnosť využitia digitálnej fotogrametrie pri štruktúrnej analýze skalných svahov za predpokladu dodržania optimálnych parametrov snímání skalného svahu. Nevýhodou metódy je menej kvalitný výsledok a dlhší čas potrebný na spracovanie fotografií v porovnaní s metódou laserového skenovania a nutnosť dodržania parametrov snímání, najmä vzdialenosti medzi pozíciou fotoaparátu a skalným svahom. Nevýhodou je aj závislosť výsledku od morfológie skalného svahu a potreba prispôbiť sa slnečnej intenzite – v prípade slnečného počasia vzniká na spodných plochách diskontinuit tieň. Výhodou metódy je najmä finančná a technická nenáročnosť a dostupnosť. V porovnaní s metódou merania orientácií diskontinuit pomocou geologického kompasu je metóda digitálnej fotogrametrie omnoho rýchlejšia a efektívnejšia



Obr. 16. Oblasti zisťovania počtu 3D bodov na 1 m².

Fig. 16. 3D scan windows with 1 m² area.

Tab. 3

Počet 3D bodov na 1 m² v mračnách bodov v lokalite Devínska cesta
The number of 3D points on 1 m² in pointclouds on location Devínska cesta

Dvojice fotografií		Oblasť A	Oblasť B	Priemer	Hodnotenie
16 mm	5 – 6	18 064 bodov	14 781 bodov	16 422,5 bodov	výborné
	6 – 7	7 578 bodov	27 425 bodov	17 501,5 bodov	výborné
	5 – 10	16 486 bodov	8 908 bodov	12 697 bodov	dobré
	7 – 8	2 238 bodov	23 198 bodov	12 718 bodov	dobré
	8 – 9	3 216 bodov	31 304 bodov	17 260 bodov	výborné
35 mm	1 – 2	4 981 bodov	14 991 bodov	9 986 bodov	dobré
	2 – 3	7 418 bodov	17 128 bodov	12 273 bodov	dobré
	3 – 4	22 839 bodov	23 686 bodov	23 262,5 bodov	výborné
	4 – 5	11 537 bodov	10 647 bodov	11 092 bodov	dobré
	3 – 5	341 bodov	564 bodov	452,5 bodov	zlé

a umožňuje meranie orientácií diskontinuití aj na vysokých a neprístupných miestach.

Výsledky práce potvrdili pravidlo, že s rastúcou veľkosťou ohniskovej vzdialenosti sa zväčšuje vzdialenosť pozície fotoaparátu potrebná na nasnímanie skalného svahu a že čím sú rozmery skalného svahu väčšie, tým je potrebná väčšia vzdialenosť pozície fotoaparátu od skalného svahu. Analýza výsledkov umožnila vytvorenie grafov optimálnej vzdialenosti pozície fotoaparátu od skalného svahu k výške svahu s vyznačenou hraničnou vzdialenosťou a optimálnej vzdialenosti medzi pozíciami fotoaparátu pre ohniskové vzdialenosti 16 a 35 mm. Výsledkom analýzy bolo aj vytvorenie metodiky kvalitatívneho hodnotenia mračna bodov podľa počtu 3D bodov na 1 m² v mračnách bodov jednotlivých dvojíc fotografií.

V budúcnosti by bolo potrebné overiť určené optimálne vzdialenosti pozície fotoaparátu od skalného svahu v závislosti od výšky svahu a použitej ohniskovej vzdialenosti objektívu. Taktiež by bolo vhodné overiť zistené hraničné vzdialenosti pozície fotoaparátu od skalného svahu pre veľkosť kódových terčov a doplniť ich o hraničné vzdialenosti aj pre ďalšie ohniskové vzdialenosti objektívu. Klasifikáciu na hodnotenie mračna bodov by bolo potrebné zdokonaľiť a aplikovať na viaceré lokality.

Podakovanie. Výskum bol spolufinancovaný grantom APVV – 0330 – 10 s podporou Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ, grant VEGA 1/0331/09.

References

- ADAM TECHNOLOGY, 2007: 3DM CalibCam and 3DM Analyst, version 2.2b, <http://www.adamtech.com.au>. In: *Sturzenegger, M., & Stead, D., 2009b: Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques [online] Department of Earth Sciences, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 267 – 287. Dostupné na internete: <<http://nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/267/2009/nhess-9-267-2009.pdf>> [cit. 2011-04-26]*
- BIRCH, J. S., 2006: Using 3DM Analyst mine mapping suite for rock face characterization. *Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization, ARMA*. Edited by: Tonon, F., & Kottenstette, J., p. 13 – 32. In: *Sturzenegger, M., & Stead, D., 2009b: Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques [online] Department of Earth Sciences, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 267 – 287. Dostupné na internete: <<http://nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/267/2009/nhess-9-267-2009.pdf>> [cit. 2011-04-26]*
- BITTERER, L., 2005: Základy fotogrametrie – Učebný text pre študentov bakalárskeho štúdia odboru geodézia a kartografia [online] Žilinská Univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, Katedra geodézie. 3. vydanie. 208 s. Dostupné na internete: <<http://svf.utc.sk/kgd/skripta/fotogrametria/index.html>> [cit. 2011-04-26]
- COGGAN, J. S., WETHERELT, A., GWYNN, X. P., & FLYNN, Z. N., 2007: Comparison of hand-mapping with remote data capture systems for effective rock mass characterization. *Proceedings of the 11th Congress of ISRM, July 2007, Lisbon, Portugal*. In: *Sturzenegger, M., & Stead, D., 2009b: Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques [online] Department of Earth Sciences, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 267 – 287. Dostupné na internete: <<http://nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/267/2009/nhess-9-267-2009.pdf>> [cit. 2011-04-26]*
- EL-HAKIM, S. F., BERALDIN, J. A., & BLAIS, F., 2003: Critical factors and configurations for practical 3D image-based modelling. *Proceedings: 6th Conference on 3D Measurements Techniques*. Zürich, Switzerland, September 22. – 25. In: *Sturzenegger, M., & Stead, D., 2009: Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. Engng Geol., 3, 2009, 106, 163 – 182.*
- FERRERO, A. M., FORLANI, G., RONCELLA, R., & VOYAT, H. I., 2008: Advanced geosurvey methods applied to rock mass characterization. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. doi: 10.1007/s00603-008-0010-4. In: *Sturzenegger, M., & Stead, D., 2009: Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. Engng Geol., 3, 2009, 106, 163 – 182.*
- FRASER, C. S., 1996: Network design. In: *Close-range terrestrial digital photogrammetry and machine vision*, edited by: Atkinson, K. B., Whittles Publishing, p. 256 – 281. In: *Sturzenegger, M., & Stead, D., 2009b: Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques [online] Department of Earth Sciences, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 267 – 287. Dostupné na internete: <<http://nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/267/2009/nhess-9-267-2009.pdf>> [cit. 2011-04-26]*

- nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/267/2009/nhess-9-267-2009.pdf> [cit. 2011-04-26]
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1978: Commission on standardization of laboratory and field tests: Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 6, 319 p.
- KEMENY, J., & DONOVAN, J., 2005: Rock mass characterization using LIDAR and automated point cloud processing. *Ground Engineering*, 38, 11, 26 – 29. In: *Sturzenegger, M., & Stead, D., 2009: Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. Engng Geol.*, 3, 2009, 106, 163 – 182.
- KEMENY, J., TURNER, K., & NORTON, B., 2006: LIDAR for rock mass characterization: hardware, software, accuracy and best practices. In: Tonon, F., & Kottenstette, J. (eds.): *Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization*, ARMA, 49 – 62.
- KROSLEY, L. K., SHAFFNER, P. T., OERTER, E., & ORTIZ, T., 2006: Digital ground-based photogrammetry for measuring discontinuity orientations in steep rock exposures. *Proceedings: 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, Golden, Colorado, June 17. – 21. In: *Sturzenegger, M., & Stead D., 2009: Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. Engng Geol.*, 3, 2009, 106, 163 – 182.
- LINDER, W., 2006: Digital photogrammetry: A practical course. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 218 p.
- PÖTSCH, M., SCHUBERT, W., & GAICH, A., 2006: Kinematical analysis of rock blocks supported by 3D imaging. In: *Proceedings of the 41st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. 17 – 21 June. Golden, Colorado. In: *Sturzenegger, M., & Stead, D., 2009b: Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques [online] Department of Earth Sciences, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada. Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 267 – 287. Dostupné na internete: <<http://nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/267/2009/nhess-9-267-2009.pdf>> [cit. 2011-04-26]
- ŠANDORFI, K., & HALVOŇ, L., 2010: Využitie digitálnej fotogrametrie v HÚL, uplatnenie výsledkov v GIS. [online]. NLC – ÚLZI Zvolen. Dostupné na internete: <<http://www.nlcsk.sk/files/1593.pdf>> [cit. 2011-03-11]
- TANNANT, D., RADMANOVIC, J., & JAING, L., 2006: Digital photogrammetry for surface mining applications, CIM Mining Conference & Exhibition, Vancouver, May. In: *Sturzenegger, M., & Stead, D., 2009b: Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques [online] Department of Earth Sciences, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada. Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 267 – 287. Dostupné na internete: <<http://nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/267/2009/nhess-9-267-2009.pdf>> [cit. 2011-04-26]

Rukopis doručený 15. 4. 2012

Revidovaná verzia doručená 23. 4. 2012

Rukopis akceptovaný red. radou 16. 4. 2012

The use of digital photogrammetry for structure analysis of the rock slopes

The need and importance of digital image processing in photogrammetry has increased in last few years. Marked factors that contributed to the development of technical progress were mainly related to the performance of computers and production of digital cameras. In parallel, the methods developed digital image processing, which opened the way to digital photogrammetry.

The aim of this work was the development of methodology for measuring orientation of discontinuities of rock slopes by using terrestrial digital photogrammetry and its verification in practice on chosen sites (Devínska cesta, stone quarry Srdce and Roman Palace of the Spiš Castle), where photos of rock slopes were made using different image sensing parameters – i.e. the focal length, distance between rock slope and camera position and angles and distances between camera positions. The focal length 16 mm was used at the site Devínska cesta and Roman Palace and the focal length 35 mm was used at the site Devínska cesta and stone quarry Srdce. Selected photos were processed by software Photomodeler Scanner, where a cloud of 3D points was created from pairs of images, using different parameter settings – sampling rate and depth range, in order to compare the results. The resulting

point clouds were exported to the software Split-Fx, where the orientation of discontinuities was measured from the 3D point cloud using equatorial Schmidt projection.

The task of analysing the results was to consider the relationship between the focal length, distance from the camera position to rock slope and height of the rock slope in relation to the size of coded targets in the photographs and allowed specifying optimal image sensing and creating graphs of optimal distances from the camera position to the rock slope to its height, showing the boundary distance and optimal distances between the camera positions, for the camera lens focal lengths of 16 and 35 mm. The best result was obtained by the processing of images from the site Devínska cesta, for both focal lengths. The distance from the camera position to the rock slope using the focal length of 16 mm was 4.2 to 6.2 m and 12.0 to 14.0 meters for the focal length of 35, while the height of the rock slope was approximately 7.0 m. In the clouds of 3D points in each pairs of photos of rock slope at Devínska cesta (focal lengths 16 and 35 mm), were randomly selected two windows with the area of one square meter, in which the number of 3D points was counted, and using qualitative evaluation methodology, the average amount

of 3D points in each area (area A, area B) was classified into one of three categories – excellent, good and bad. It is therefore necessary to think about the boundary distance, beyond which the size of coded targets on the images is too small for automatic recognition and correct identification of targets by the software Photomodeler Scanner. The boundary distance for a lens with a focal

length of 16 mm using coded targets with size 20 x 20 cm is 12.0 m from the rock slope and for the focal length of 35 mm the boundary distance is approximately 24.6 m.

The results of the study confirmed the possibility of using the digital photogrammetry in structural analysis of rock slopes and provided the optimal scanning parameters for the use.