

# TVORBA PRIESTOROVÝCH MODELOV BUDOV Z DÁT ZÍSKANÝCH POMOCOU FOTOGRAMETRIE UAV

Ondrej TRHAN, Marek FRAŠTIA, Marián MARČIŠ

## The creation of spatial models of building using UAV photogrammetry data

**Abstract:** The main part of the spatial city models are buildings. These buildings can be created using various ways. Most works use data obtained from the LiDAR systems or from the stereoscopic models from airborne photogrammetry. In our case we use the automatically obtained data from UAV (Unmanned Aerial Vehicle) photogrammetry. Nowadays, this photogrammetric method is widely spread, because of the speed of the data obtaining, financial demands and high precision. We use the digital surface model in the form of the pointcloud and the true orthophoto as the input data. The reason, that the building walls are not perpendicular is the main problem of the automatic pointcloud processing and this leads to some errors in the true orthophoto.

In our work, we edit the photogrammetric data in some steps. In the first step, we arrange the digital surface model to the grid, which has the same size as the true orthophoto. The second step is a creation of the digital terrain model. The digital terrain model is created using the progressive morphological filter and it is used for the creation of the basic digital mask. This digital mask is used for the detection of the building outlines. In the next step is this digital mask modified and applied to the orthophoto. In the masked areas are the building edges detected, which can be considered as the building outlines. These outlines are the base to the creation of the building areas. In these areas, we can generate the spatial building model in the level of detail 1. After these steps, we obtained the digital terrain model with buildings on it, which are geometrically and positionally correct and the walls of the buildings are perpendicular.

**Keywords:** photogrammetry, DSM, DTM, orthophoto, spatial building model, UAV

## Úvod a rozbor problematiky

V dnešnej dobe sme zaznamenali zvýšený záujem o budovanie digitálnych modelov miest. Tieto sú tvorené viacerými spôsobmi. Digitálne modely miest pozostávajú z priestorových modelov budov a najčastejšie ich využívajú rôzne záchranné systémy, inžinierske siete, databázy GIS a rôzne iné odvetvia (Chen et al., 2004, Nizar et al., 2006).

Jedným zo základných krokov pre tvorbu priestorových modelov budov je vyhľadanie budovy na zdrojových dátach. V našom prípade ako zdrojové dáta slúžia dáta získané z jedného zdroja, a tým je fotogrametria bezpilotných lietajúcich strojov (Unmanned Aerial Vehicle – UAV). Pre testovanie boli použité digitálny model terénu (DMT) a ortosnímka z oblasti, na ktorej sa nachádzajú budovy.

Získané mračno bodov predstavuje DMT. To znamená, že sú na ňom zobrazené všetky objekty nachádzajúce sa na zemskom povrchu. Na rozdiel od neho, digitálny model reliéfu (DMR) predstavuje samotný priebeh zemského povrchu bez budov, stromov a iných objektov. Pri štúdiu tejto problematiky sa však stretávame s nejednoznačnosťou používaných pojmov a skratiek, pričom

---

Ing. Ondrej TRHAN, Ing. Marek FRAŠTIA, PhD., Ing. Marián MARČIŠ, PhD., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra geodézie, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika, email: ondrej.trhan@stuba.sk, marek.fraštia@stuba.sk, marian.marcis@stuba.sk

toto označovanie sa líši aj v odborných článkoch. V práci používame označenie DMT pre súbor všetkých bodov na zemskom povrchu a objektov nachádzajúcich sa na ňom. DMR predstavuje tento súbor bodov po odstránení objektov nachádzajúcich sa mimo reliéfu zeme.

Pre získanie testovacích dát boli použité systém UAV Gatewing X100 a digitálna kamera Ricoh GR III. Testovacie dáta boli vyhotovené v apríli 2011, výška letu bola 300 m nad terénom a boli dodané externou firmou. Polohová presnosť vytvorenej ortosnímkovej bola 0,11 m a výšková presnosť 0,16 m. Tieto hodnoty sa nachádzajú v deklarovanej presnosti systému, a preto ich môžeme použiť na ďalšie spracovanie. Ortosnímková a DMT boli vyhotovené s priestorovým rozlíšením 10 cm. Výstupy boli vyhotovené pomocou softvéru Agisoft Photoscan Professional.

Proces detekcie a rekonštrukcie budov pozostáva z niekoľkých krokov. V prvom kroku je upravený DMT do pravidelnej mriežky. Druhým krokom je vytvorenie DMR pomocou progresívneho morfológického filtra (PMF). V ďalšom kroku je upravovaná digitálna maska a je aplikovaná na ortosnímkovú. V oblasti digitálnej masky sú vyhľadávané hrany budov, ktoré môžu byť po určitých úpravách považované za hranice budov. Z týchto hraníc je možné generovať priestorové modely budov v rôznych úrovniach detailnosti (level of detail – LOD). LOD vyjadruje modely budov reprezentované v priestore pomocou rôzneho množstva potrebných informácií a ich detailnosti. Rôzne úrovne LOD sú definované v CityGML (Kolbe et al., 2005), kde je uvedená ich kategorizácia. Zadefinovaných je 5 úrovní. Prvá úroveň je LOD0 a predstavuje 2,5D DMR. Ide o zobrazenie snímky na DMR. LOD1 je kvádrový model budovy bez strešných štruktúr a bez textúry. Obohatením o strechu získavame LOD2. LOD3 je vytvorený pridaním architektonických informácií s detailmi múrov a zobrazením menších štruktúr na strechách. Posledný je LOD4, ktorý obsahuje všetky informácie o budove, vrátane interiéru (Arefi, 2009).

Za ostatných 20 rokov nastal výrazný posun vo vyhľadávaní a rekonštrukciách digitálnych modelov budov. Používajú sa rôzne prístupy založené na vlastnostiach vyhľadávacích metód. Ako najčastejšie zdrojové dáta sa používajú letecké snímky s vysokým rozlíšením, mračná bodov získané laserovým skenovaním, kombinovanie snímok a mračien bodov, 2D katastrálne mapy alebo iné zdroje.

Autori sa zameriavajú buď na celý proces rekonštrukcie budov alebo len na nejakú jej časť, ktorá súvisí s vyhľadaním budovy, tvorby a úpravy hranice budovy alebo tvorbe samotného modelu.

Teóriou modelovania budov sa zaoberali už (Braun et al., 1995), pričom využívali parametrizované objemové primitívy. S myšlienkou zjednodušenia interpretačného procesu v rekonštrukcii budov prišli (Haala a Brenner, 1997), a to na základe použitia DMT, ako doplňujúcej informácie k leteckým snímkam. Metódu vyhľadávania pravouhlých budov použili (Cohen a Vinson, 2002). Ako základ použili letecké snímky na vytvorenie ortosnímkovej a digitálneho modelu. Najčastejšie sa autori zaoberajú vyhľadávaním a rekonštrukciou budov na dátach získaných z laserového skenovania (Sun, 2013; Arefi, 2009; Zhang, 2012; Rottensteiner, 2008; Demir, 2013).

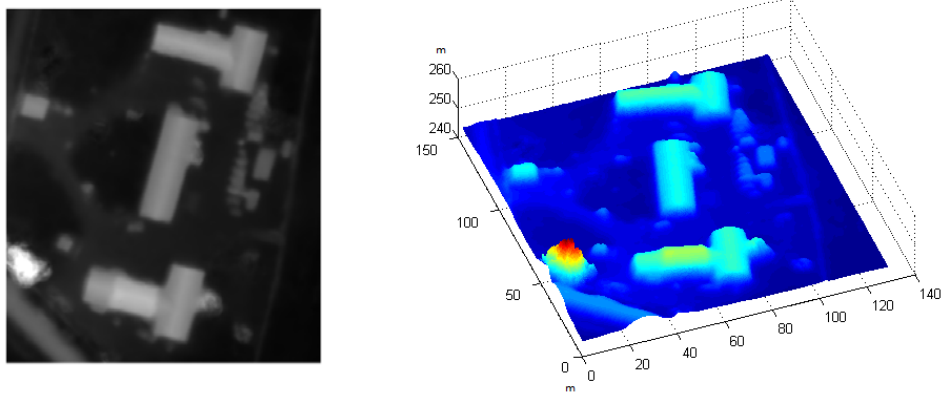
Cieľom príspevku je predstavenie metodiky úpravy digitálnych dát získaných pomocou fotogrametrie UAV. Úprava sa vykonáva na ortosnímkovej a DMT a ide hlavne o tvorbu DMR a vyhľadanie a rekonštrukciu budov na zdrojových dátach. Výnimočnosť príspevku je v tom, že využíva dáta získané iba z jedného zdroja a s porovnaním so svetovými riešeniami ide o výnimočné využitie týchto dát.

## 1. Metodika

### 1.1 Editácia získaných dát pre ich spracovanie

Testovacie dáta boli získané pomocou softvéru Photoscan. V našom prípade sme použili DMT vo forme mračna bodov. Editácia a úprava dát bola riešená v softvéri MATLAB a bola potrebná z dôvodu problémov načítania surových dát mračna bodov, pretože softvér číta dáta po riadkoch a nie ako komplexnú maticu.

Pre usporiadanie dát do matice, ktorá má rovnaké rozmery ako ortosnímková, bol vyhotovený jednoduchý algoritmus, ktorý vytvoril výškovú maticu zo získaných dát. V každej bunke matice je uložená iba jedna výšková hodnota. Takto usporiadaný model môže byť zobrazený vo viacerých formátoch, pričom najčastejšie sa používa zobrazenie 2D a 3D. Výsledné zobrazenie je vyhotovené softvérom MATLAB a je zobrazené na obr. 1.



Obr. 1 Usporiadaný digitálny model terénu (vľavo 2D, vpravo 3D)

## 1.2 Tvorba digitálneho modelu reliéfu pomocou progresívneho morfologického filtra

Existuje viacero metód pre vyhľadanie budov na DMT. My sme sa rozhodli použiť progresívny morfologický filter (PMF), ktorý umožňuje vytvoriť DMR a na základe toho sme schopní vyhľadať aj objekty mimo reliéfu, medzi ktoré patria aj budovy. PMF pracuje s DMT, ktoré majú vysoké rozlíšenie. Pre tvorbu DMR je potrebné, aby objekty na reliéfe, ako sú budovy, automobily alebo vegetácia, boli klasifikované a odstránené (Zhang, 2003).

Základný princíp progresívneho morfologického filtra využíva princípy matematickej morfológie, ktorá obsahuje operácie založené na teórii extrakcie prvkov zo snímok. Používajú sa dve základné operácie: dilatácia a erózia. Jednoducho povedané, dilatácia zväčšuje daný objekt na základe štruktúrovaného elementu a erózia, naopak, tento objekt znižuje (Gonzales et al., 2009).

Tieto základné operácie môžu byť kombinované a svojimi kombináciami vytvárajú otváracie (erózia – dilatácia) alebo uzatváracie (dilatácia – erózia) operátory. Využívajú sa na vyhľadanie maximálnych alebo minimálnych hodnôt pixelov v určitej oblasti, preto môžu byť aplikované aj na digitálny model terénu. Výpočet dilatácie pre výšku predstavuje vzťah (Zhang, 2003):

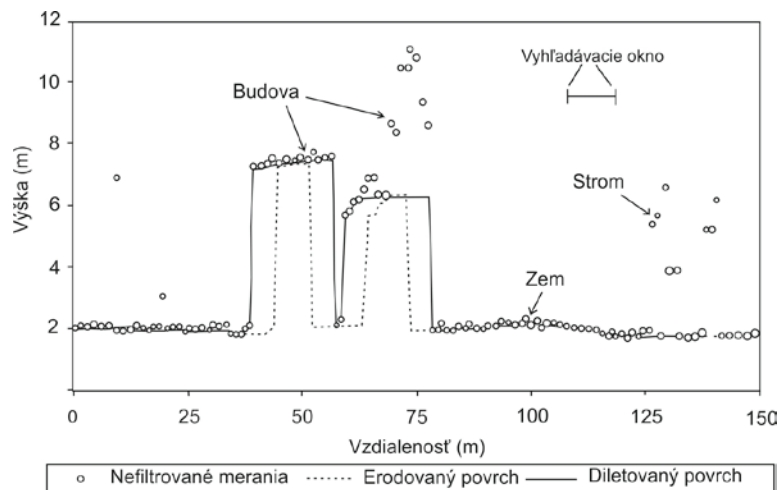
$$d_p = \max_{(x_p, y_p, z_p) \in w} (z_p), \quad (1)$$

kde body  $(x_p, y_p, z_p)$  reprezentujú súradnicových susedov bodu  $P$ , ktorý sa nachádzajú vo vyhľadávacom okne  $w$ . Toto okno môže byť líniové (1D) alebo obdĺžnikové (2D). Výsledkom dilatácie je maximálna hodnota zo susedstva bodu  $p$ . Naopak, erózia využíva opačný proces (Zhang, 2003):

$$e_p = \min_{(x_p, y_p, z_p) \in w} (z_p) \quad (2)$$

Na obr. 2 je zobrazený postup otváracieho operátora na získané dáta. Nefiltrované dáta sú zobrazené kruhom a predstavujú jeden meraný bod. Na dáta je aplikovaný filter o veľkosti vyhľadávacieho okna. Výsledkom je dilatovaný povrch, z ktorého boli odstránené merania na strome a na streche budovy. Pre odstránenie budovy je potrebné vyhľadávacie okno o šírke minimálne takej, akú má budova. V praxi sa tento problém rieši postupným zväčšovaním okna, čím vznikajú viaceré iterácie.

Pomocou otváracieho operátora dokáže progresívny morfológický filter odstrániť z digitálneho modelu budovy rôznych veľkostí. Napriek spomínaným výhodám má proces tendenciu vytvárať digitálny reliéf, ktorý leží pod reálnym reliéfom, čiže získané výšky môžu mať nižšie hodnoty. Nejde však o výrazné hodnoty a pre naše použitie je to zanedbateľné. Tento problém sa rieši zavedením rozdielu výšok filtrovaného terénu. Predpokladom je, že rozdiel vo výškach v prípade budov je výrazný – skokový. Oproti tomu, terénne zmeny sú väčšinou postupné. Rozdiely medzi výškovými variáciami budov a terénu pomáhajú oddeľovať budovy od terénu. Výškové rozdiely medzi originálnymi dátami a filtrovaným povrchom predstavuje  $dh_{p,1}$  v prvej iterácii pre bod  $p$  a  $dh_{T,1}$  predstavuje hraničnú hodnotu výškového rozdielu. Bod  $p$  je klasifikovaný ako zem, ak  $dh_{p,1} \leq dh_{T,1}$ . V opačnom prípade ide o meranie mimo povrchu zeme. Nech  $dh_{max(t),1}$  je maximálny výškový rozdiel medzi originálnymi dátami a filtrovaným povrchom. Ak je  $dh_{max(t),1}$  menšie ako  $dh_{T,1}$ , potom je meranie pre terén zachované. Vo všeobecnosti je  $dh_{T,1}$  funkciou veľkosti vyhľadávacieho okna (Zhang, 2003).



Obr. 2 Aplikácia morfológických operátorov na merané dáta (Zhang, 2003)

V ďalšej iterácii predpokladáme, že maximálny rozdiel medzi súčasným a predchádzajúcim filtrovaným terénom je  $dh_{max(t),2}$ . Pozemné merania získané týmto rozdielom budú zachované, ak  $dh_{max(t),2}$  je menšie ako nová výšková hranica  $dh_{T,2}$ . Predpokladajme, že minimálny výškový rozdiel pre budovu medzi predchádzajúcou a súčasnou filtrovacou operáciou je reprezentovaný pomocou  $dh_{min(b),2}$ , čo je približne výška budovy. Merania zachytené na budove budú odstránené, ak  $dh_{min(b),2}$  je väčšie ako  $dh_{T,2}$ .

Všeobecne, hraničný výškový rozdiel  $dh_{T,k}$  je nastavený pre minimálne výškové hodnoty budov i analyzovanej oblasti počas iterácie  $k$ . Ak považujeme  $dh_{T,k}$  ako hraničnú hodnotu, pre všetky dané body z určitej otváracie operácie, označujeme bod  $p$  ako pozemné meranie, ak spĺňa  $dh_{p,k} \leq dh_{T,k}$ . Na základe týchto poznatkov vyhľadanie budov s rozličnými veľkosťami môže byť dosiahnuté pomocou postupného nárastu vyhľadávacieho okna, pokiaľ okno nebude väčšie ako samotná budova. Keďže aj výška stromov sa mení náhle, toto platí aj pre vyhľadanie a odstránenie stromov (Zhang, 2003).

### 1.3 Aplikácia progresívneho morfológického filtra na testovacích dátach

PMF sa môže používať ako filter 1D alebo 2D. V práci (Zhang, 2003) je použitý algoritmus pre situáciu 1D a je aplikovaný na dátach získaných pomocou technológie LIDAR. V našej práci sme algoritmus upravili na situáciu 2D a použitý je na dátach získaných pomocou fotogrametrie UAV (mračno bodov).

V praxi má vyhľadávacie okno pre situácie 2D tvar štvorca, obdĺžnika alebo kruhu. Situácie 1D využívajú líniové vyhľadávacie okná. Veľkosť vyhľadávacieho okna závisí na veľkosti najväčšieho objektu, ktorý chceme odstrániť. V našom prípade šlo najmä o budovy.

Použitý algoritmus pozostáva z načítania vstupných dát, pričom ide o DMT, veľkosť základnej bunky, základnú veľkosť vyhľadávacieho okna, maximálnu veľkosť vyhľadávacieho okna, sklon terénu, počiatočný výškový rozdiel a maximálny výškový rozdiel. Hodnoty vstupných hodnôt do algoritmu sú v tab. 1.

**Tab. 1** Vstupné parametre pre progresívny morfológický filter aplikovaný na DMT

DMT					
Veľkosť základnej bunky	Základná veľkosť vyhľadávacieho okna	Maximálna veľkosť vyhľadávacieho okna	Sklon terénu	Počiatočný výškový rozdiel	Maximálny výškový rozdiel
c [m]	b	b_max	s	dh <sub>0</sub> [m]	dh <sub>max</sub> [m]
0,10	10	200	0,08	0,25	10

V prvej časti algoritmu sú definované základné premenné, ktoré sú použité vo výpočte. Nasledujú cykly morfológických operácií, ktoré určujú body nachádzajúce sa na zemi a mimo nej. Po prvom cykle je zmenená hodnota maximálneho rozdielu medzi digitálnymi modelmi a cyklus sa opakuje pre spresnené hodnoty.

Používame dve morfológické operácie, a to eróziu a dilatáciu. Erózia vyhľadáva najnižšie hodnoty výšky vo vyhľadávacom okne. Pomocou dilatácie je vyhľadaná najväčšia hodnota v už erodovanom digitálnom modeli.

Algoritmus bol aplikovaný na testovacie dáta a výstupmi sú digitálny model reliéfu v rôznych úrovniach filtrácie, digitálna maska pre reliéf a digitálna maska pre prvky, ktoré sa nenachádzajú na reliéfe.

## 2. Výsledky

### 2.1 Získaný digitálny model reliéfu

Jedným z výsledkov PMF je DMR. Pre overenie správnosti vyhotoveného modelu sme vykonali rez cez DMR a DMT. Rez je zobrazený na obr. 3. Na základe výsledku môžeme tvrdiť, že tvar priebehu reliéfu mimo budov je prakticky totožný v rámci dosahovanej presnosti zariadenia UAV.

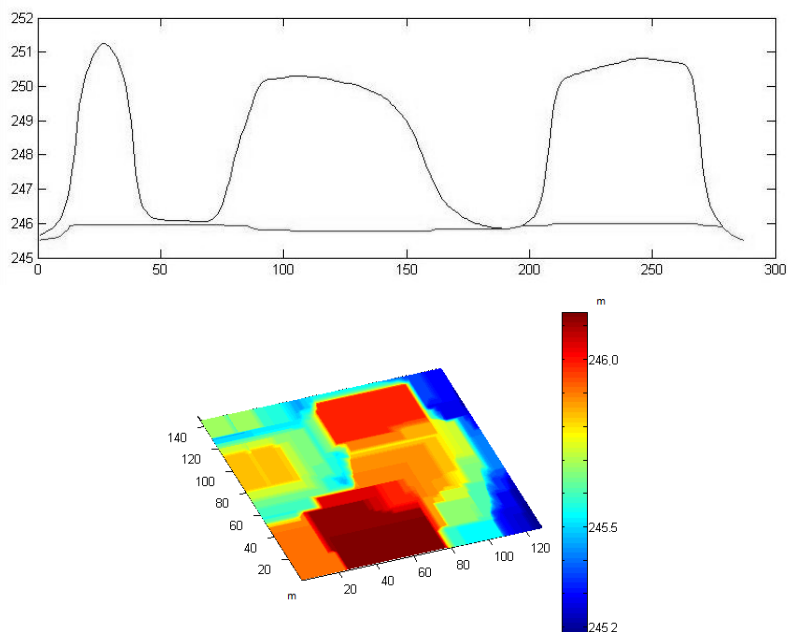
Spôsob, akým pracuje PMF, môže byť vysvetlený pomocou obr. 3 – dolu. Budovy boli z terénu odstránené pomocou vyhľadávacieho okna, ktoré malo tvar štvorca. Výškové rozdiely v rámci DMR sú do 1 m a kopírujú skutočný priebeh reliéfu testovanej oblasti, čo potvrdzuje aj obr. 3.

### 2.2 Získané digitálne masky a ich editácia

Ďalšími výsledkami PMF sú digitálne masky pozemných prvkov a prvkov nachádzajúcich sa mimo zeme. Za takéto prvky pokladáme väčšinou budovy, stromy a autá. Stáva sa, že digitálna maska obsahuje taktiež prvky, ktoré pokrývajú len malé oblasti, alebo chyby. Tieto sú jasne rozpoznateľné na digitálnej maske. Z tohto dôvodu je dôležité, aby bola maska upravená na základe požadovaných vlastností. Medzi tieto vlastnosti patria najmä minimálna veľkosť jedného elementu, vyhľadanie a odstránenie oblastí s vegetáciou a ďalších nevhodných oblastí. Získaná maska pomocou PMF je zobrazená na obr. 4.

### 2.3 Odstránenie oblastí vegetácie a tieňov z digitálnej masky

Na ortosnímках testovanej oblasti sa nachádzajú oblasti, na ktorých sú zachytené miesta s vegetáciou alebo zatienené oblasti. Tieto sa nachádzajú na ortosnímke, aj po aplikovaní digitálnej masky a majú zlý vplyv na vyhľadávanie budov. Preto treba tieto oblasti odstrániť.



Obr. 3 Rez cez digitálne modely (hore DMT, dolu DMR)



Obr. 4 Získaná digitálna maska s prvkami nachádzajúcimi sa mimo reliéfu

Oblasti s vegetáciou sú identifikované pomocou Otsuovho prahovania (Otsu, 1979) prvých farebných invariantov (Gevers a Smeulders, 2000) a vytvorenia oblasti, ktorá je identifikovaná pomocou algoritmu farebnej segmentácie. Farebné invarianty boli pôvodne predstavené Geversom a Smeuldersom (2000). Ide o súbory farebných modelov nezávislé na smere pohľadu, orientácii povrchu, smere osvetlenia, intenzity osvetlenia a iných prvkoch.

Farebný invariant je definovaný zeleným a modrým farebným spektrom pixla na ortosnímke pomocou:

$$\psi_g(i, j) = \frac{4}{\pi} a \tan \left( \frac{I(i, j, g) - I(i, j, b)}{I(i, j, g) + I(i, j, b)} \right). \quad (3)$$

kde:  $\psi_g$  – prvý farebný invariant,  $i, j$  – indexy matice,  $I$  – hodnota intenzity pixla pre určité farebné spektrum,  $g$  – zelené farebné spektrum,  $b$  – modré farebné spektrum.

Takto definovaný obraz farebných invariantov je prahovaný Otsuovou metódou a všetky pixle, ktorých hodnota je vyššia ako prahová hodnota, sú považované za pixle, ktoré predstavujú vegetáciu. Týmto spôsobom je vytvorený binárny obraz s bielymi pixlami ako vegetácia a čiernymi pixlami pre body bez vegetácie (Shorter, 2009).

Tiene sú identifikované pomocou modifikovaných farebných invariantov:

$$\psi_s(i, j) = \frac{4}{\pi} a \tan \left( \frac{I(i, j, r) - \sqrt{I(i, j, r)^2 + I(i, j, g)^2 + I(i, j, b)^2}}{I(i, j, r) + \sqrt{I(i, j, r)^2 + I(i, j, g)^2 + I(i, j, b)^2}} \right). \quad (4)$$

kde:  $\psi_s$  – modifikovaný farebný invariant,  $i, j$  – indexy matice,  $I$  – hodnota intenzity pixla pre určité farebné spektrum,  $r$  – červené farebné spektrum,  $g$  – zelené farebné spektrum,  $b$  – modré farebné spektrum.

Výsledné masky získané pomocou uvedených metód sú zobrazené na obr. 5. Môžeme vidieť, že tieň a vegetácia sú vyhladané správne, teda tieto masky sa dajú použiť na ďalšiu úpravu digitálnej masky.



Obr. 5 Maska vegetácie (vľavo) a negatívna maska tieňov (vpravo)

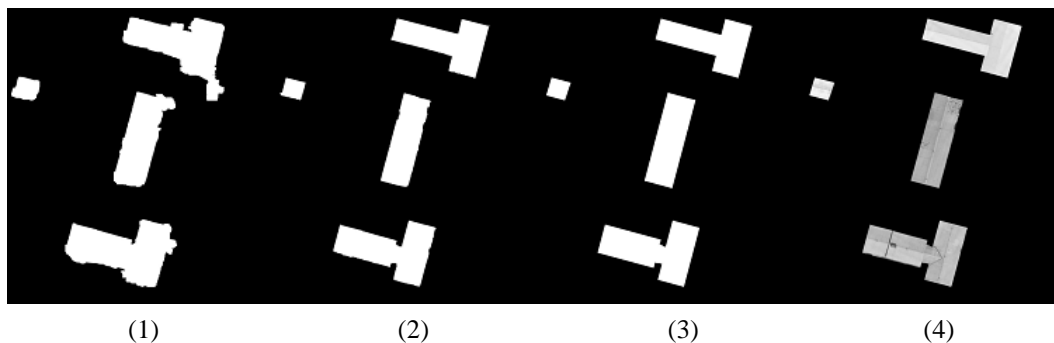
## 2.4 Editácia a kombinácie získaných masiek a ich aplikácia v ortosnímke

Získané digitálne masky musia byť editované na základe požadovaných kritérií. Pre dané územie bolo základným kritériom veľkosť najmenej oblasti na maske. Predpokladáme, že budovy sú väčšie ako 50 m<sup>2</sup>. Menšie oblasti boli odstránené. Následne sú kombinované masky vegetácie, tieňov a už upravené masky. Výsledná maska je dilatovaná z dôvodu zachovania hrán budov na ortosnímke. Na záver je maska aplikovaná na ortosnímku s vytvorením novej snímky iba so zobrazenými budovami a ich blízkeho okolia.

Nová ortosnímka je následne segmentovaná pomocou metódy vodného predelu (Vincet a Soille, 1991), pričom získavame masku s rovnými hranami budov.

V ďalšom kroku úprav sú počítané uhly, ktoré zvierajú hrany budovy, pričom predpokladáme pravouhlé budovy. V prípade, že uhol je približne 90°, je použitá metóda minimálneho obkolesenia obdĺžnikom (Minimum Bounding Rectangle – MBR) (Arefi, 2009) pre získanie rovných hrán budov. V opačnom prípade sme použili Koveciho metódu (Kovesi, 2015) pre získanie rovných hrán.

Postup úpravy je zobrazený na obr. 6. Naľavo je zobrazená maska s odstráneným tieňom, vegetácie a malých objektov (1), nasleduje maska po vykonaní segmentácie vodného predelu (2), tretia časť predstavuje už vyrovnané hrany (3) a v závere je maska aplikovaná na ortosnímku (4).



Obr. 6 Maska bez tieňov a vegetácie (1), maska segmentácie vodného predelu (2), maska minimálneho obkolesenia obdĺžnikom (3) a výsledná maska aplikovaná na ortosnímku (4)

## 2.5 Generovanie modelu Level of Detail 1 ako základ pre tvorbu Level of Detail 2

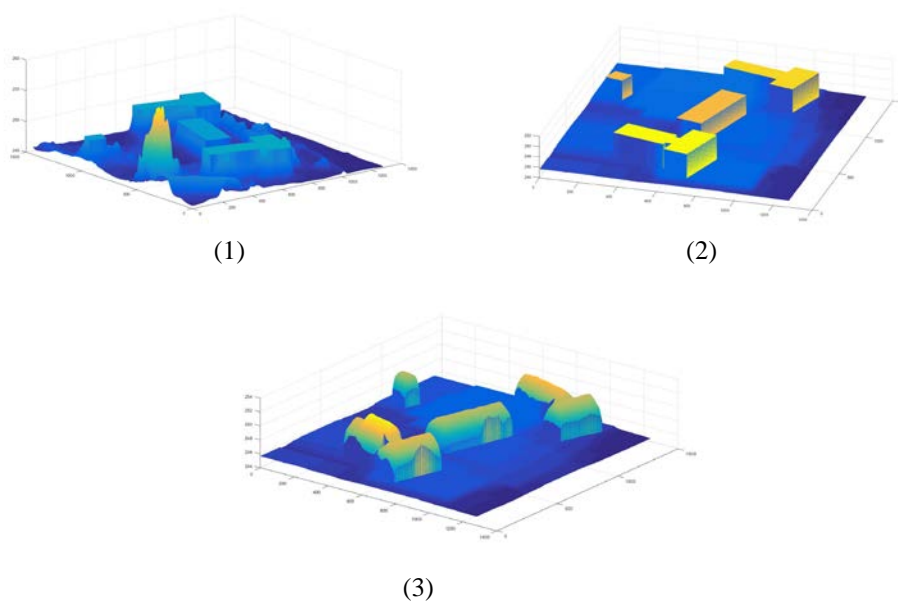
Maska získaná pomocou minimálneho obkolesenia obdĺžnikom je aplikovaná na DMR a pomocou výšok v oblasti masky získavame model LOD1 s budovami. Takto získané budovy sú v referenčnom súradnicovom systéme a slúžia ako základ pre modelovanie striech. Výstupy sa nachádzajú na obr. 7 a predstavujú zobrazenie LOD 1 na DMT (1), druhý obraz predstavuje aplikovanie LOD1 na DMR (2) a posledný obraz predstavuje zobrazenie tvaru striech z DMT aplikovaných na LOD1, čo tvorí základ pre LOD2.

## Záver a diskusia

Hlavným výsledkom projektu je vyhľadanie budov na fotogrametických UAV dátach získaných výlučne z jedného zdroja. Použitými dátami boli DMT a ortosnímka z testovacej oblasti. Prvým krokom bolo zoradenie získaných dát do matice, výsledok tejto úpravy je zobrazený na obr. 1. V druhom kroku sme použili progresívny morfológický filter pre vytvorenie DMR a digitálne masky budov. Pôvodne bol tento filter použitý na dátach získaných pomocou laserového skenovania. My sme algoritmus upravili a prispôbobi našim požiadavkám a aplikovali na dátach získaných pomocou fotogrametrie UAV. V porovnaní s pôvodným algoritmom ide o jednoduchšie



riešenie, keďže nie je potrebné riešiť počet odrazov. Výsledok je zobrazený na obr. 4. Tretím krokom bola úprava masiek a odstránenie oblastí vegetácie a tieňov, po ktorých nasledoval dilatačný proces (obr. 5). Následne sme digitálnu masku aplikovali na ortosnímku s výberom oblastí, na ktorých sa nachádzajú iba budovy. Pre získanie hraníc budov bola použitá metóda segmentácie vodného predelu. Ďalej boli počítané uhly hrán každej budovy, ktoré sme rozdelili do dvoch tried. Do prvej sme zaradili budovy, ktorých uhly boli blízke hodnote  $90^\circ$  s využitím metódy minimálneho obkolesenia obdĺžnikom, do druhej ostatné budovy s použitím Kovesiho algoritmus na získanie rovných hrán. Po vykonaní týchto úprav sme získali rovné hranice budov (obr. 6), ktoré sme aplikovali na DMT, pričom sme získali rôzne modely LOD (obr. 7).



Obr. 7 LOD1 na DMT (1), LOD1 na DMR (2) a LOD1 so získanými tvarmi striech (3)

V porovnaní s ostatnými známymi metódami ide o progresívne riešenie, keďže sa používajú dáta získané z jedného zdroja a ide o pomerne nový zdroj fotogrametrie UAV. Ostatné známe metódy využívajú iné zdroje, prípadne takéto dáta používajú ako doplnkovú informáciu. Veľá autorov sa sústreďujú aj na vyhotovenie iba niektorých častí z nášho postupu, ako napríklad vyhľadanie budov na snímkach alebo na digitálnych modeloch alebo priamo na tvorbu modelu budov. V našej práci vykonávame prakticky všetky tieto kroky. Dosiahnuté výsledky naznačujú, že ide o metódu, ktorá je využiteľná v praxi a slúži na tvorbu DMR a digitálneho modelu budov pomocou tohto typu dát. Dosahovaná presnosť sa pohybuje v rámci presností predkladaných dát, teda je vhodná pre využitie v systémoch GIS, kartografii a modelovaní miest.

V ďalšej práci sa chceme sústreďovať na modelovanie striech s vyústením do tvorby modelu LOD2. Hlavným cieľom práce bola úprava DMT na hraniciach budov z dát, ktoré sú generované pomocou fotogrametrie UAV.

*Tento článok vznikol vďaka podpore grantovej agentúry VEGA, projekt 1/0133/14.*

## Literatúra

- AREFI, H. (2009). *From LIDAR Point Clouds to 3D Building Models*. Dissertation. Munich (Universität der Bundeswehr Munchen).
- BRAUN, C., KOLBE, T. H., LANG, F., SCHICKLER, W., STEINHAGE, V., CREMERS, A. B., FORSTNER, W., PLUMER, L. (1995). Models for photogrammetric building reconstruction. *Computer and Graphics*, 19 (1), pp. 109-118.
- COHEN, L. D., VINSON, S. (2002). Segmentation of complex buildings from aerial images and 3D surface reconstruction. In *Proceedings of the 6th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*. Orlando (IEEE Computer Society).
- DEMIR, N. (2013). *Combination of airborne laser and image data for building detection and 3D roof reconstruction*. Dissertation. Zürich (ETH).
- GEVERS, T., SMEULDERS, A. W. D. (2000). PicToSeek: combining color and shape invariant features for image retrieval. *IEEE Transactions on Image Processing*, 9 (1), pp. 102-119.
- GONZALES, R. C., WOODS, R. E., EDDINS, S. L. (2009). *Digital Image Processing Using Matlab*. (Gatesmark Publishing), 827 p.
- HAALA, N., BRENNER, C. (1998). Interpretation of urban surface models using 2D building information. *Computer Vision and Image Understanding*, 72 (2), pp. 204-214.
- CHEN, L., TEO, T., RAU, J., LIU, J., HSU, W. (2004). Building reconstruction from LiDAR data and aerial imagery. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 4. Boston (IEEE Geoscience and Remote Sensing Society), pp. 2846-2849.
- KOLBE, T. H., GROGER, G., PLUMER, L. (2006). CityGML – Interoperable Acces to 3D City Models. Geoinformation for Disaster Management. In *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium in Geo-Information for Disaster Management*. Delft (TU Delft).
- KOVESI, P. *MATLAB and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing*. Dostupné na: <<http://www.peterkovesi.com/matlabfns/index.html>>
- NIZAR, A., FILIN, S., DOYTSHER, Y. (2006). Reconstruction of Buildings from Airborne Laser Scanning Data. In *ASPRS 2006 Annual Conference*. Reno (ASPRS).
- OTSU, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 9 (1), pp. 62-66.
- ROTTENSTEINER, F. (2008). *Automatic Extraction of Buildings from Airborne Laserscanner Data and Aerial Images*. Dissertation. Wien (TU Wien).
- SHORTER, N. (2009). *Unsupervised building detection from irregularly spaced LIDAR and aerial imagery*. Dissertation. Orlando (University of Central Florida).
- SUN, S. (2013). *Automatic 3D Building Detection and Modeling from Airborne LiDAR Point Clouds*. Dissertation. Rochester (Rochester Institute of Technology).
- VINCENT, L., SOILLE, P. (1991). Watershed in Digital Spaces: An Efficient Algorithm Based on Immersion Situations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13 (6), pp. 583-598.
- ZHANG, K., CHEN, S., WHITMAN, D., SHYU, M., YAN, J., ZHANG, C. (2003). A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (4), pp. 872-882.
- ZHANG, N. (2012). *Automated Plane Detection and Extraction from Airborne Laser Scanning Data of Dense Urban Areas*. Lund (Lund University).

## S u m m a r y

### The creation of spatial models of building using UAV photogrammetry data

In this article innovative view on the detection and reconstruction of the digital building models from the UAV photogrammetry data was presented. Most of the current methods use the laser scanning data or other sources.

The article consists of the introduction, two chapters and the conclusion. In the introduction the basics of the method and the current situation of this problem are described. The first chapter consists of the three parts. In the first part, editing of the UAV photogrammetry data for next steps is described. The result of this editing is showed in Fig. 1. Second part consists of the theory of the creation of the Digital Terrain Model (DTM) from the Digital Surface Model (DSM) using Progressive Morphological Filter (PMF). PMF is origi-

nally used on laser scanning data. In our case is this algorithm edited for the DSM from UAV photogrammetry. In the third part, we applied the edited PMF to our data. The input parameters of the PMF's process are in Tab. 1.

The second chapter consists of five parts. In the first part, there is the verification of the PMF and the result is showed in Fig. 3, where we can see the slices through the DTM and the DSM and these slices are compared. The second part consists of the one of the results of the PMF and it is the digital mask with nonground elements. This is showed in Fig. 4. In next part, there are processes of the vegetation and shadows removal showed. The resulting digital masks are showed in Fig. 5. The fourth part consists of the editing and combination of the obtained masks and its application on the orthophoto. We used the process of the watershed segmentation for the building lines detection. Next step is the alignment of these masks. The buildings lines, which have orthogonal angles, are reconstructed by the Minimum Bounding Rectangle (MBR) algorithm. For the other building lines, the Koveci's algorithm is used. The results and application on the orthophoto are showed in Fig. 6. The last step is the application of the resulted digital mask on the DSM and the buildings are reconstructed in the Level of Detail 1 (LOD1). This is showed in Fig. 7

In the conclusion, there is the summary of the presented article and the comparison with the known methods.

Fig. 1 Ordered digital surface model (2D left, 3D right)

Fig. 2 Unfiltered and filtered measurements along a profile (Zhang, 2003)

Fig. 3 The slice of the digital models (up DTM, down DSM)

Fig. 4 Obtained digital mask with nonground elements

Fig. 5 Vegetation mask (left), negative shadow mask (right)

Fig. 6 Mask without shadows and vegetation (1), watershed segmentation mask (2), MBR mask (3), MBR mask applied on orthoimage (4)

Fig. 7 LOD1 on DSM (1), LOD1 on DTM (2) and LOD1 with roof shapes on DTM (3)

Tab. 1 Parameters for progressive morphological filter applied on DTM

Prijaté do redakcie: 18. júna 2016

Zaradené do tlače: jún 2016