

Porovnanie interpretačných metód digitálnej fotogrametrie pre tvorbu 3D modelov budov úrovne LOD 2

Katarína ONAČILLOVÁ, Ján KAŇUK

Abstract: *The main aim of this paper is to find possible variations in selected building roof points' coordinates resulting from the application of various methods for generating 3D building models on the LOD 2 level, according to OGC consortium classification, in a digital photogrammetric software PHOTOMOD. For this purpose, six buildings from the north-eastern part of the Kečovo municipality were established a testing area for creation of other buildings in the municipality, with a goal to demonstrate measurement precision of two chosen methods: the manual stereovectorization applied by both non-professional and professional and the automatic filtering of points. Measurement precision of these two photogrammetric methods is also compared with the measurement precision performed by the LiDAR method. For the final, most correct visualization of the 3D city model of the Kečovo municipality, a brief comparison of different methods used for effective creation of large-scale digital elevation models (DEMs) and digital terrain models (DTMs) is provided. Presented research is a part of the APVV-0176-12: New methods of spatial modeling with laser scanning data and 3-D GIS (SPATIAL 3D) project.*

Keywords: *3D city model, photogrammetry, CityGML, LOD, Kečovo*

Úvod

Každá urbanizovaná krajina je špecifická tým, že v nej dochádza ku vysokej koncentrácii ľudských aktivít a interakciám medzi jednotlivými prvkami krajiny v horizontálnom i vertikálnom smere. 3D modely miest predstavujú vhodnú platformu pre analýzu a pochopenie priestorových väzieb a umožňujú pohľad na objekty z ľubovoľných uhlov. Využívanie 3D modelov miest pre priestorové analýzy a modelovanie súvisí predovšetkým s vývojom analytických metód a nástrojov zohľadňujúcich trojrozmernú geometrickú dimenziu objektov a javov, ktorá sa najviac približuje reálnej krajine.

Tvorba 3D modelov miest bola v minulosti náročná najmä z hľadiska zberu a spracovania 3D geopriestorových údajov. Za posledných pätnásť rokov však došlo k prudkému rozvoju technológií diaľkového prieskumu Zeme (DPZ), ktoré umožňujú vysoko detailnú a časovo efektívnu tvorbu 3D modelov. Dáta DPZ sú získavané pomocou dvoch typov systémov – aktívnych a pasívnych – v závislosti od zdroja ich energie. Aktívne systémy vysielať k povrchu Zeme vlastné elektromagnetické žiarenie, ktorého časť sa od povrchu odrazí späť a následne je zaznamenaná senzorom prijímacieho zariadenia (Jensen, 2007). Naopak, pasívne systémy DPZ, podľa Shipperta (2004), zaznamenávajú prirodzené elektromagnetické žiarenie, ktoré je z povrchu Zeme odrazené alebo vyžiarené. Na základe tohto tvrdenia môžeme ku pasívnym systémom priradiť i digitálnu fotogrametriu, ktorá sa s masívnym rozvojom digitálnych záznamov, softvérového a hardvérového vybavenia, stala dominantnou vyhodnocovacou technológiou začiatkom 21. storočia. Táto metóda, založená na digitálnom spracovaní leteckých meračských snímok (LMS), je modifikáciou analytickej fotogrametrie pracujúcej so snímkami v analógovej podobe. Svoje uplatnenie nachádza i v rýchlo sa rozvíjajúcej oblasti tvorby virtuálnych 3D modelov miest, pri ktorých v grafickom zobrazení sa kladie dôraz aj na výslednú geometrickú presnosť, detailnosť a sémantický aspekt, ktoré sú zadané úrovňami detailu (angl. level of detail – LOD).

Presnosť generovaných 3D modelov krajiny z LMS je závislá na operátorovi a jeho schopnosti interpretovať LMS. Hlavným cieľom predkladaného príspevku je porovnanie rôznych interpretačných metód digitálnej fotogrametrie využiteľných pre tvorbu 3D modelov budov na úrovni LOD 2 pre záujmové územie obce Kečovo. Toto územie bolo vybraté ako výskumné územie v rámci projektu APVV-0176-12: Nové metódy priestorového modelovania pomocou laserového skenovania a 3D GIS-u (SPATIAL3D). Pre účely tohto projektu bol vytvorený 3D model budov celej obce Kečovo, do procesu interpretácie jednotlivých metód pre ich tvorbu bolo z celkovej vytvorenej geodatabázy vybraných šesť budov s typologicky odlišnými tvarmi striech v severovýchodnej časti obce Kečovo.

Prehľad problematiky

Virtuálny 3D model mesta možno zdefinovať ako digitálnu reprezentáciu zemského povrchu a k nemu prislúchajúcich objektov urbánneho územia (Stadler a Kolbe, 2007). Nastavenie a optimalizácia týchto modelov slúži k interaktívnej vizualizácii a analýze dát. Každý objekt takéhoto modelu je polohovo umiestnený, metricky korektný a diskretný, vďaka čomu môže byť prepojený s databázami geografických informačných systémov (GIS). Informácie o zobrazených objektoch môžu byť uložené napríklad vo forme údajov o súradniciach, rozmeroch alebo pixeloch. Z hľadiska definovania úrovne presnosti generovaných 3D modelov miest je v súčasnosti veľmi rozšírené používanie medzinárodného štandardizovaného značkovacieho jazyka CityGML (City Geography Markup Language) založeného na báze jazyka XML (eXtensible Markup Language), ktorý umožňuje vizualizáciu, analýzu a simuláciu na výsledných modeloch.

Princíp CityGML je založený na úrovniach LOD (Level of Details), ktorými je zdefinovaná presnosť a detailnosť výsledných 3D modelov. Voľba LOD závisí najmä od účelu tvorby a tomu priradeného potrebného dosiahnutia kvality modelu, avšak výrazne ju ovplyvňuje aj skutočnosť, že s rastúcimi nárokmi na kvalitu a detailnosť 3D modelov priamo úmerne vzrastajú časové požiadavky a často i finančné náklady potrebné na ich vytváranie. Treba však podotknúť, že definície a početnosť LOD, napriek ich veľkému významu pre poznanie kvality vytvoreného 3D modelu, nie sú zdefinované jednoznačne a podliehajú neustálym zmenám. Existujú viaceré definície LOD, jedna z najzaužívanejších, podľa združenia Open Geospatial Consortium (OGC, 2012), je založená na piatich úrovniach detailu, začínajúc modelom hrubej detailnosti a nízkej presnosti LOD 0, kde sú budovy reprezentované len ich pôdorysom, prípadne obrysom strechy, a končiac najdetailnejším a geometricky najpresnejším modelom LOD 4, ktorý zahŕňa už i pridaný interiéru budovy. Základ klasifikácie je prevzatý z počítačovej 3D grafiky, a hoci je akceptovaný širokou verejnosťou, objavujú sa tiež názory, ktoré hovoria o nesprávnosti využitia rovnakého princípu aj pre modelovanie 3D miest. Zástancom zavedenia novej špecifikácie je aj Biljecki (2013), ktorý definuje desať úrovni LOD a na rozdiel od klasifikácie podľa OGC konzorcia venuje zvýšenú pozornosť aj ďalším prvkom, akými sú vegetácia a vodné plochy. Základné prvky interiéru sa tu objavujú už na úrovni LOD 3 a so zvyšujúcou LOD sa stávajú detailnejšími. Hlavným kritériom je veľkosť zobrazovaného elementu.

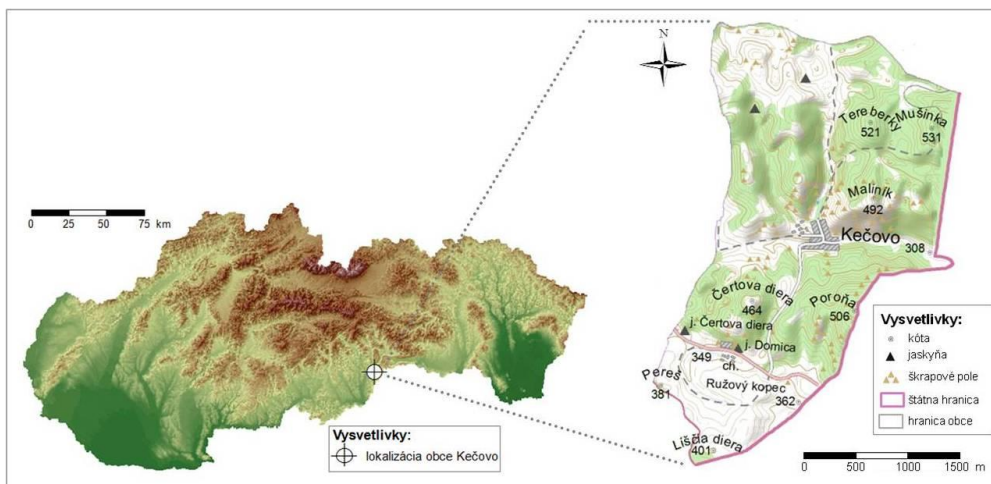
Jednou z najpresnejších metód pre vytváranie 3D modelov miest je digitálna letecká fotogrametria, ktorej doménou sú, na rozdiel od ostatných metód DPZ, najmä kvantitatívne vyhodnotenia nekontaktných záznamov (Chudý et al., 2012). Podstatou tejto metódy je rekonštrukcia objektov a terénu v oblastiach vzájomného prekrytu snímok pre potreby následného merania rozmerov objektov (šírky, dĺžky a výšky), plochy, polohy, vzájomných vzdialeností, prevýšenia, nadmorskej výšky, tvorby digitálnych modelov terénu (DMT), digitálnych výškových modelov (DEM), ortofotomozáik a ortofotomáp. Komplexný prehľad prob-

lematiky, zahŕňajúci históriu fotogrametrie, základné princípy a aplikačné využitie tejto metódy, poskytujú najmä diela zahraničných autorov, akými sú Jensen (2007), Lillesand et al. (2004) a Campbell (2011). Pokrokom vo využívaní fotogrametrických metód a algoritmov pre potreby následného použitia v GIS sa vo svojich prácach zaoberajú najmä Kolbe, et al. (2011), Neutens a Maeyer (2010). Medzi kľúčové diela slovenskej literatúry môžeme zaradiť práce Gregora (1994), ktorý sa vo svojich dielach zameriava na matematické základy fotogrametrie, zber údajov, meranie a chyby spôsobené fotogrametrickým objektívom. Digitálna fotogrametria ako neoddeliteľná súčasť lesníckeho mapovania sa stala námetom pre Chudého et al. (2012) a Žihlavníka (2003).

Pre potreby vyhotovenia 3D modelu budov záujmového územia a následné porovnanie interpretačných metód fotogrametrie pre ich tvorbu bola zvolená úroveň LOD 2 podľa OGC konzorcia, v ktorej sú bloky budov doplnené o diferencované tvary striech, pridané môžu byť i geometricky zjednodušené prídavné prvky (vikiere, komíny, atď.). Ide zároveň o najvyššiu možnú úroveň, ktorú je možné dosiahnuť na základe dodaných LMS. Modely tejto úrovne detailu nachádzajú svoje uplatnenie napríklad i pre odhad potenciálu slnecnej energie, ktorý je možné zvážením vplyvu prídavných prvkov striech spresniť ešte viac. Ďalšie analýzy je možné vykonávať v prostredí GIS, ktoré definujú Lillesand et al. (2004) ako počítačovo-založené systémy schopné pracovať s akýmkoľvek druhom virtuálnych informácií o prvkoch s určenou priestorovou polohou.

Charakteristika záujmového územia

Obec Kečovo sa nachádza v juhozápadnej časti východného Slovenska. Kataster obce patrí vzhľadom na územno-správne členenie do Košického kraja, okresu Rožňava. Na severe susedí s katastrom obce Silická Brezová, západné ohraničenie tvorí katastrálna hranica s obcou Dlhá Ves, z juhovýchodu ju vymedzuje štátna hranica s Maďarskou republikou. Celková rozloha modelovaného územia je 1357 ha. Najvyššiu nadmorskú výšku územie dosahuje vrchom Mušinka (531 m n. m.), najnižšie je položené centrum obce (308 m n. m.) (obr. 1).



Obr. 1. Poloha záujmovej obce v rámci SR, prameň: EnviroGeoPortal (2015), Geoportál (2015)

Z hľadiska geomorfologického členenia patrí územie do subprovincie vnútorných Západných Karpát, juhovýchodnej okrajovej časti oblasti Slovenského rudohoria, vápencami a dolomitmi budovaného celku Slovenský kras a podcelku Silická planina. (Mazúr, 1986). Oblasť má pahorkatinový charakter, typický je pre ňu reliéf krasových planín bohatý na krasové formy, akými sú napríklad škrapy, krasové jamy, jaskyne a vyvierajúce. Významnejšia povrchová riečna sieť na krasových planinách chýba, zrážková voda presakujúca do podzemia tu však vytvorila rozsiahle sústavy podzemných krasových vôd (Rozložník, 1995). Potenciálna prirodzená vegetácia je zastúpená dubovo-hrabovými lesmi, sídelná zeleň je tvorená plochami záhrad, verejnou zeleňou v intraviláne obce a parkovými plochami.

Vymedzené územie zasahuje do chránenej krajinej oblasti Slovenský kras (pokračujúcej na maďarskej strane pod názvom Aggteleki-karszt), ktorá predstavuje významnú genofondovú plochu európskeho významu. Nachádzajú sa tu národné prírodné rezervácie Kečovské a Domické škrapy, ktorých jedinečnosť spočíva vo výskyte xerothermných spoločenstiev flóry a fauny. V katastrálnom území obce je tiež vchod do sprístupnenej jaskyne Domica zapísanej od roku 1995 na zozname Svetového kultúrneho a prírodného dedičstva UNESCO.

Prvá písomná zmienka o poľnohospodárskej obci Kečovo pochádza z roku 1272. Trvalý pobyt v nej má nahlásených 372 obyvateľov. Zaujímavosťou národnostného zloženia je dominantné zastúpenie maďarskej národnosti (91,88 %), druhou najpočetnejšou je slovenská národnosť (6,96 %). Z hľadiska morfológicko-genetického typu ide o hromadnú cestnú dedinu. Obytnú zástavbu tvorí prevažne jednopodlažná zástavba rodinných domov s výškovými dominantami kostolov. Podľa posledného sčítania sa v obci nachádza 149 domov, z ktorých väčšina bola postavená v období rokov 1946-1970 (ŠÚSR, 2011).

Z uvedených charakteristík mala najväčší vplyv na proces rekonštrukcie 3D modelu budov obce z LMS vegetácia, ktorá v niektorých prípadoch prekrývala hrany striech budov a znemožňovala ich presnú identifikáciu, čo vyústilo k nutnosti odhadu ich priebehu. Významným faktorom bolo aj obdobie výstavby, ktoré sa prejavilo pri budovách staršieho veku v nepresnejšom priebehu hrán striech a takisto na kvantite prídavných prvkov budov. Príkladom je vstupný objekt do jaskyne Domica reprezentujúci postmodernú architektúru charakteristickú bohatosťou dekoratívnych prvkov, ktorá si vyžiadala časovo náročnejšiu rekonštrukciu ako napríklad rekonštrukcia kostolov postavených v klasicistickom architektonickom slohu.

Údaje a metódy

Vstupné údaje

Vstupné údaje pre tvorbu 3D modelu budov metódou fotogrametrie predstavujú LMS a k nim prináležiaci kalibračný protokol a technická správa. Tieto zdrojové dáta boli pre účely práce spracované spoločnosťou Photomap, s.r.o., ktorá vykonala letecké meračské snímkovanie 1. apríla 2014 lietadlom Piper PA31-350 Chieftain pomocou digitálnej veľkoformátovej leteckej meračskej kamery UltraCamXp s kompletným systémom pre vylúčenie zmazu, gyrostabilizáciou kamery a využitím systému pre meranie prvkov vonkajšej orientácie s ohniskovou vzdialenosťou 100,5 mm a veľkosťou obrazového elementu na zemskom povrchu 0,20 m. Kalibrácia použitej kamery bola vykonaná spoločnosťou Vexcel Imaging GmbH, A-8010 Graz.

Spracovanie údajov pre tvorbu 3D modelov

Pre porovnanie metód tvorby 3D modelu budov boli vybrané štyri LMS, ktoré boli spracované v prostredí digitálneho fotogrametrického softvéru PHOTOMOD, ktorý sa pre účely spracovania fotogrametrických snímok, tvorbu DMT, vektorových máp, ortofotomáp a ortofotomozáik používa vo viac ako 70 krajinách sveta. V prvom kroku tvorby projektu bol zadaný názov projektu, typ projekcie a súradnicový systém. Ďalej sa pristúpilo k pridaniu štyroch LMS do snímkových pásov a nastaveniam kamery, kde sa zadefinovali parametre pre panchromatické snímky na základe kalibračného protokolu. Následné riešenie relatívnej a vonkajšej orientácie sa uskutočnilo využitím funkcie pre plne automatické meranie orientačných a spojovacích bodov s vysokou presnosťou a s následnou vizuálnou kontrolou a analýzou chýb na základe importovaných parametrov vonkajšej orientácie. Túto funkciu bolo možné využiť vďaka zhotoveniu LMS, pretože skreslenie objektívu nepresahovalo viac ako 2 μm . Proces vektorizácie budov prebehol v novom pracovnom okne modulu StereoDraw, ktorý umožňuje za predpokladu splnenej podmienky minimálne 60% prekrytu susedných snímok rekonštruovať povrch terénu a vykonávať stereovektorizáciu objektov na teréne. Pre účely interpretácie metodických postupov pri tvorbe 3D modelov digitálnou fotogrametriou a určenia rozdielov vo vyhodnotení bolo vybraných 20 rohových bodov na strechách šiestich referenčných budov v severovýchodnej časti obce Kečovo.

Metódy hodnotenia modelov

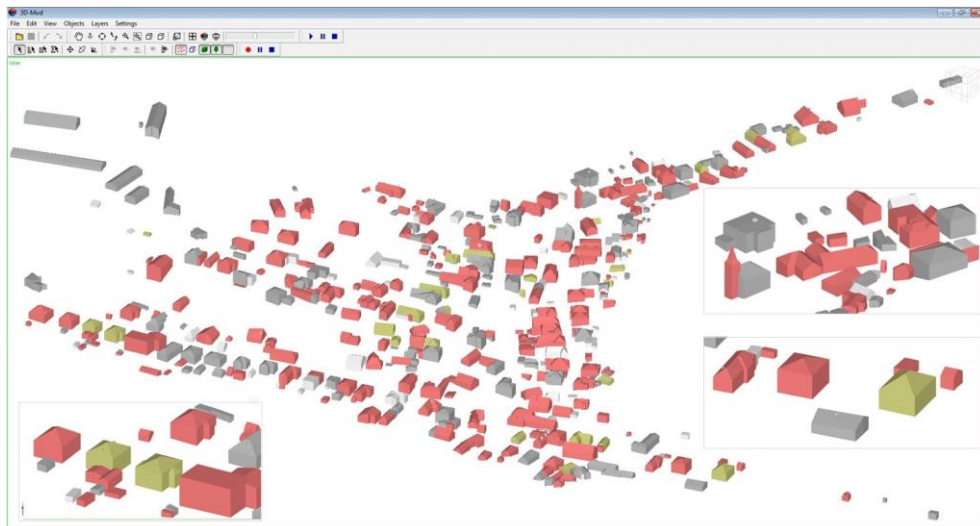
Ako prvá bola pre účely zhodnotenia využitá metóda manuálnej stereovektorizácie, ktorou sa pristúpilo nielen k hodnoteniu, ale i názornej tvorbe 3D modelu budov (Model 1). V module poskytujúcom nástroje pre 2D a 3D vektorizáciu, klasifikáciu a editáciu vytvorených objektov, boli vytvorené vektorové vrstvy s klasifikátorom, ktorý umožnil rozdelenie budov do kategórií podľa zadaného kódu, zvoleného geometrického prvku pre ich vykreslenie, farby konštrukcií striech a prvkov. Samotná vektorizácia prebehla pri odporúčanom priblížení 3:1 a použili sa pri nej najmä nástroje z ponuky programu umožňujúce vektorizáciu polygónov a výber tvaru pre konštrukciu strechy z ponuky desiatich základných tvarov. Proces vektorizácie striech si vyžiadala i manuálnu editáciu, nakoľko sa v modelovanom území vyskytujú aj budovy s komplikovanejšími tvarmi striech, ktoré sa v základnej výberovej ponuke nenachádzajú. Výsledná kvalita 3D modelu závisí hlavne od kvality stereoskopického videnia operátora pri interpretácii LMS. Pre účely posúdenia kvality vytvoreného modelu bez predchádzajúcich skúseností operátora bol výsledok porovnaný s modelom vyhodnoteným spoločnosťou Photomap, s.r.o. (Model 2). Rozdiely v súradniciach vybraných bodov na hranách striech oboch vytvorených modelov boli porovnané aj s ďalšími použitými metódami. Tretí model bol založený na vyhraničení požadovanej oblasti pomocou mriežky a automatickom výpočte a pridaní bodov na základe prednastavení pre charakter oblasti. Automatickou filtráciou pre vegetáciu a budovy boli vyselektované body charakterizujúce priebeh nadmorských výšok bodov terénu, budov a vegetácie (Model 3). Ako štvrtý bol vytvorený model získaný technológiou leteckého laserového skenovania (Model 4).

Pre korektné zobrazenie výšky budov nad terénom sa v poslednom kroku pred zobrazením v 3D móde pristúpilo k tvorbe názorného DEM a modelu DMT, ktorý bol odvodený z nepravidelnej trojuholníkovej siete (angl. TIN - Triangulated Irregular Network). Tá sa pre jeho tvorbu, vďaka vhodnému vedeniu hrán trojuholníkov umožňujúcim lepšie zachytenie ostrých zmien v tvare reliéfu, využíva v technickej praxi najčastejšie (Hofierka et al. 2014).

Výsledky a diskusia

Geodatabáza pre účely interpretácie metód tvorby 3D modelov budov

V prvom kroku sa najskôr pristúpilo k manuálnej vektorizácii budov celej záujmovej obce Kečovo. Z hľadiska počtosti bolo potrebných pre tvorbu takéhoto rozsiahlejšieho modelu budov obce vytvoriť 4 vektorové vrstvy obsahujúce 967 polygónov pre rekonštrukciu striech červenej farby, 436 polygónov pre strechy budov sivej farby, vektorová vrstva pre biele strechy obsahuje 198 polygónov, budovy s pieskovohnedými strechami boli vytvorené pomocou 105 polygónov (obr. 2).



Obr. 2. 3D model budov intravilánu obce Kečovo úrovne LOD 2 vytvorený metódou manuálnej stereovektorizácie v programe PHOTOMOD

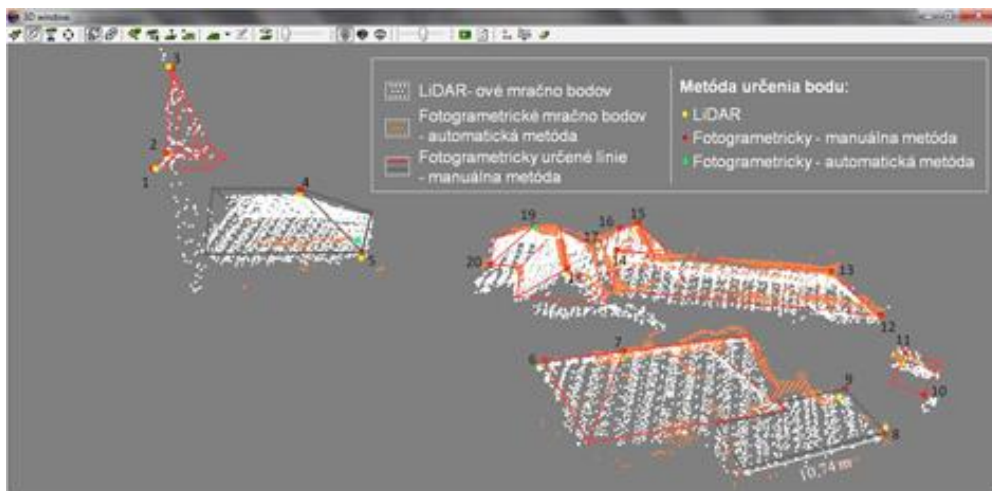
Údaje geodatabázy, s ktorými sa pracovalo pri porovnaní interpretačných metód boli uložené vo forme troch vektorových vrstiev obsahujúcich údaje o polohe, kóde, názve, veľkosti, počte a farbe bodov na hranách striech z meraní manuálnou a automatickou metódou fotogrametrie, tiež aj metódou laserového skenovania, ktoré vstupovali do procesu porovnania rozdielov vyhodnotených súradníc. Pre porovnanie metód vytvárania 3D modelov budov sa využila stereovektorizácia zahŕňajúca polohové určenie bodov na konštrukciách striech. Manuálnou metódou fotogrametrie boli tiež názorne vektorizované strechy budov pomocou línií pre ukážku výsledného zobrazenia 3D modelu budov v module 3D MOD. Najmenej polygónov si vyžiadala rekonštrukcia jednoduchých plochých a šikmých striech bez prídavných prvkov, pre ktorých tvorbu postačil jeden polygón, ktorý je zároveň samostatným polygónovým objektom. Viac polygónov bolo využitých pri tvorbe komplikovanejších zložených striech.

Zhodnotenie interpretačných metód

Identifikácia polohy bodov v priestore pomocou rôznych interpretačných metód pomáha k utvoreniu si obrazu o rozdieloch súradníc. Súradnice vybraných bodov na hranách striech určených manuálnou a automatickou metódou fotogrametrického spracovania v programe PHOTOMOD boli porovnané aj s údajmi získanými LiDAR-om, (Light Detection and Ranging) (obr. 3). Takéto určovanie polohy bodu v priestore je však subjektívne, pre účely zistenia presnosti nameraných bodov pomocou týchto metód by bolo potrebné mať etalónovú vrstvu obsahujúcu informácie o reálnych súradniciach týchto bodov.

Rozdiely v meraniach bodov pomocou manuálnej metódy stereovektorizácie striech Modelu 1 a Modelu 2 vyplývajú zo skúseností so stereovektorizáciou v programe PHOTOMOD. Na 20 meraných bodoch študentom a skúseným operátorom boli zistené výraznejšie rozdiely v určení súradníc bodu v smere horizontálnych osí X, Y ako v smere vertikálnej osi Z. RMSE medzi týmito dvoma modelmi predstavuje v smere m_x 0,115 m, v smere m_y 0,087 m a 0,082 m v smere m_z . Vyššia hodnota rozdielu v určení bodov v smere horizontálnej osi je tiež výsledkom komplikovanejšej identifikácie bodov v dôsledku rozostrenia a nejasného priebehu hrán striech budov na LMS, čoho príkladom je pravý roh budovy nachádzajúcej sa severnejšie od kostola (č. 20) určený s celkovo najvyšším rozdielom v smere osi X, 0,231 m, spomedzi všetkých určených bodov. Väčšie rozdiely v meraniach sa prejavili pri identifikovaní polohy bodov na budovách s ostro zakončenými a členitejšími strechami, čo bol napríklad prípad identifikácie polohy bodu č. 3 reprezentujúceho vrchol veže kostola, kde bol rozdiel v meraniach bodu laikom a odborníkom v smere osi Y až 0,153 m. Ťažšie identifikovateľné boli i body pre hrany striech nižších budov, ktoré boli už pri odporúčanom rozlíšení 3:1 značne rozostrené. Celková priestorová chyba v závislosti od skúseností operátora v smere m_{xyz} dosiahla 0,096 m. Treba tiež povedať, že v smere osi Z bola spomedzi interpretačných metód dosiahnutá touto metódou najnižšia stredná kvadratická chyba.

Model 3 vznikol fotogrametricky na základe automaticky generovaných bodov, na ktorých bola aplikovaná možnosť filtrácie pre budovy a vegetáciu s prednastavením pre charakter oblasti. Následnou filtráciou sa získali reprezentatívne body na strechách budov. Pre porovnanie odchýlok s bodmi ďalších metód, s ktorými sa pracovalo, však bolo možné pracovať len s ôsmimi bodmi pre identifikáciu hrán striech. Stredná kvadratická chyba medzi bodmi zameraným touto a manuálnou metódou Modelu 2 v smere m_{xyz} bola 0,356 m. O miere nižšej zhodnosti sa dá hovoriť aj pri porovnaní bodov určených metódou LiDAR s bodmi zameranými manuálnou fotogrametrickou metódou. Stredná kvadratická chyba Modelu 4 predstavovala 0,338 m, na čo mala vplyv najmä identifikácia výškovej súradnice polohy strechy, ktorá nie všade vystihla priebeh koncových hrán striech. Na základe porovnania všetkých troch modelov, najnižšiu priestorovú strednú kvadratickú chybu m_{xyz} vykazoval model vytvorený manuálnou metódou, je možné povedať, že určenie polohy bodov pomocou manuálnej identifikácie na LMS, sa vyznačuje najvyššou mierou zhodnosti z vybraných interpretačných metód, vďaka čomu môže byť využitie tejto metódy považované za najsprávnejšie i pre tvorbu 3D modelu budov celej obce Kečovo.



Obr. 3. Poloha bodov určená metódou LiDAR, fotogrametrickou metódou manuálnej stereovektorizácie a metódou fotogrametrického automatického pridania a filtrácie bodov – zobrazenie v 3D okne programu PHOTOMOD

Tab. 1. Porovnanie zhodnosti v súradniciach bodov wřených manuálnou, automatickou metódou fotogrametrie a metódou LIDAR

Číslo bodu	Model 1 ¹			Model 2 ²			Model 3 ³			Model 4 ⁴			Miera zhodnosti Model 1 - Model 2		Miera zhodnosti Model 3 - Model 2		Miera zhodnosti Model 4 - Model 2				
	X _i [m]	Y _i [m]	Z _i [m]	X _i [m]	Y _i [m]	Z _i [m]	X _i [m]	Y _i [m]	Z _i [m]	X _i [m]	Y _i [m]	Z _i [m]	eX [m]	eY [m]	eX [m]	eY [m]	eX [m]	eY [m]			
1	-321070,208	-1261762,472	345,987	-321070,148	-1261762,453	345,950	-	-	-	-321070,050	-1261762,310	346,000	-0,059	-0,019	0,037	-	-	0,089	0,143	0,050	
2	-321070,847	-1261761,440	347,013	-321070,822	-1261761,446	346,969	-	-	-	-321070,870	-1261761,370	346,880	-0,025	0,006	0,044	-	-	-0,048	0,076	-0,289	
3	-321071,590	-1261759,718	353,013	-321071,570	-1261759,671	352,992	-	-	-	-321071,150	-1261759,878	353,150	-0,020	0,153	0,021	-	-	0,430	-0,007	0,158	
4	-321068,690	-1261751,913	343,731	-321068,535	-1261751,992	343,705	-	-	-	-321068,601	-1261752,133	343,240	-0,155	0,079	0,026	-	-	-0,066	-0,141	-0,465	
5	-321061,824	-1261748,391	339,897	-321061,846	-1261748,337	339,921	-321068,068	-1261748,514	340,889	-321062,761	-1261748,304	339,389	-0,078	0,048	-0,024	-0,222	-0,177	0,962	0,085	0,033	-0,532
6	-321046,557	-1261736,931	337,213	-321046,572	-1261736,747	337,268	-	-	-	-321046,890	-1261736,930	336,440	0,015	0,116	-0,055	-	-	-0,318	-0,083	-0,528	
7	-321041,172	-1261736,997	340,249	-321042,233	-1261737,086	340,435	-321042,178	-1261736,798	339,513	-321042,090	-1261736,260	339,810	0,061	0,089	-0,192	0,055	0,287	-0,922	0,153	0,826	-0,525
8	-321033,514	-1261723,477	336,317	-321033,440	-1261723,430	336,307	-	-	-	-321033,553	-1261723,189	336,481	-0,074	-0,047	0,010	-	-	-0,113	0,261	0,174	
9	-321036,629	-1261723,053	337,244	-321036,660	-1261723,117	337,460	-	-	-	-321036,603	-1261722,338	336,480	0,031	0,064	-0,216	-	-	0,057	0,179	-0,380	
10	-321034,633	-1261716,467	336,175	-321034,578	-1261716,574	336,328	-	-	-	-	-	-	-0,057	0,107	-0,153	-	-	-	-	-	-
11	-321036,640	-1261715,654	338,015	-321036,679	-1261715,807	338,008	-321036,928	-1261715,799	337,616	-321036,760	-1261715,900	337,310	-0,161	0,153	0,006	-0,149	0,008	-0,393	0,019	-0,093	-0,699
12	-321041,112	-1261711,308	337,936	-321041,040	-1261711,362	337,985	-	-	-	-321041,390	-1261711,300	337,690	-0,072	0,054	-0,049	-	-	-0,350	0,062	-0,295	
13	-321045,565	-1261712,262	340,158	-321045,404	-1261712,350	340,192	-321045,473	-1261712,064	339,947	-321045,540	-1261712,440	339,800	-0,161	0,088	-0,054	-0,069	0,286	-0,245	-0,136	-0,090	-0,592
14	-321055,359	-1261727,281	340,158	-321055,271	-1261727,404	340,192	-	-	-	-321055,400	-1261727,590	339,680	-0,088	0,123	-0,034	-	-	-0,129	-0,146	-0,512	
15	-321061,391	-1261719,240	339,668	-321061,222	-1261719,278	339,641	-	-	-	-321062,440	-1261719,230	339,050	-0,169	0,038	0,027	-	-	-0,218	0,048	-0,591	
16	-321064,101	-1261719,921	338,491	-321064,059	-1261719,944	338,485	-321065,971	-1261719,677	338,032	-321064,230	-1261719,810	338,340	-0,042	0,023	0,026	0,088	0,267	-0,433	-0,171	0,134	-0,125
17	-321065,461	-1261721,557	336,939	-321065,268	-1261721,694	336,905	-321065,690	-1261721,404	337,091	-321065,190	-1261721,910	336,450	-0,193	0,137	0,028	-0,422	0,290	0,186	0,118	-0,216	-0,455
18	-321054,670	-1261733,097	339,611	-321054,760	-1261733,180	339,644	-	-	-	-321054,710	-1261733,260	339,190	0,090	0,083	-0,030	-	-	0,050	-0,080	-0,451	
19	-321065,222	-1261730,360	339,610	-321065,080	-1261730,405	339,497	-321065,146	-1261730,288	339,459	-321065,250	-1261730,360	339,180	-0,142	0,045	0,113	-0,066	0,017	-0,038	-0,170	0,045	-0,317
20	-321068,752	-1261735,969	336,646	-321068,521	-1261735,998	336,664	-321068,978	-1261735,922	336,669	-321068,600	-1261735,730	336,110	-0,231	0,029	-0,018	-0,457	0,076	0,005	-0,079	0,266	-0,554
RMSE													0,115	0,087	0,082	0,245	0,211	0,526	0,182	0,232	0,505
Číselné priestorové chyby													0,096		0,356		0,338				

* Model 1 – model založený na manuálnej stereovektorizácii bez predchádzajúcich skúseností s interpretáciou LMS
 * Model 2 – model založený na manuálnej stereovektorizácii s predchádzajúcimi skúsenosťami s interpretáciou LMS
 * Model 3 – model založený na fotogrametrickom automatickom pridaní bodov a ich následnej automatickej filtrácii
 * Model 4 – model založený na bodoch získaných metódou laserového skenovania

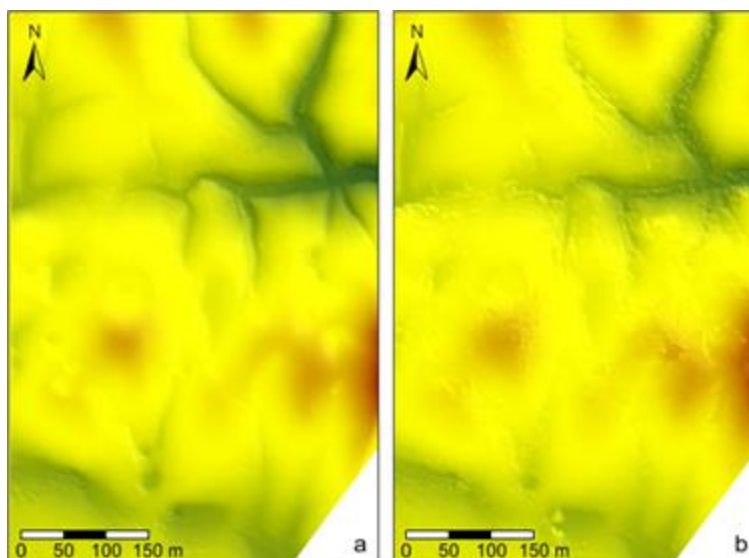
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{1i} - Y_{2i})^2}$$

i – číslo merania
*Y*₁ – súradnica merania 1, modelu
*Y*₂ – súradnica merania 2, modelu

Rekonštrukcia DMT a DEM skúmaného územia

DMT a DEM pre záujmové územie boli odvodené z TIN vytvorenej tromi spôsobmi – automatickým generovaním bodov z fotogrametrického zberu a ich filtráciou, importovaním údajov laserového skenovania a manuálnym pridávaním bodov vyhodnotených operátorom fotogrametricky a vykresľovaním zlomových línií (obr. 4). Doménou prvého spôsobu bolo automatické pridanie bodov pomocou mriežky a následná filtrácia bodov pre vegetáciu a budovy, čím sa vyseletovali body zachytávajúce len potrebný priebeh nadmorskej výšky terénu, z ktorých bol v ďalšom kroku vytvorený model TIN. Druhý spôsob zahŕňal tvorbu DMT z importovaného hustého mračna bodov z laserového skenovania, ktoré je podľa Höhleho (2009) využiteľné pre tvorbu vysoko presného DMT hlavne pre urbánne a zalesnené oblasti. Vytvorenie novej vektorovej vrstvy pre možnosť vektorizácie zlomových hrán v teréne a manuálneho pridávania bodov bolo prioritou tretieho spôsobu.

Z hľadiska časovej náročnosti sa ako optimálna voľba pre rozsiahle modelované územie obce Kečovo uplatnil DMT vytvorený na základe mračna bodov z leteckého laserového skenovania, ktorý vďaka vysokej hustote mračna bodov zachytáva aj menšie terénne zlomy, čím prispieva k vernejšiemu následnému 3D zobrazeniu extrudovaných budov na základe vektorizovaných striech v 3D móde. Takto vytvorený DMT bol využitý pre konečné zobrazenie 3D modelu budov v module 3D MOD. Avšak, treba podotknúť, že na základe hodnotenej kvality 3D budov z modelu 2 z hľadiska presnosti možno pokladať za rovnako presnú, ba dokonca presnejšiu, ako metódu tvorby DMT z dát laserového skenovania, metódu založenú na vektorizácii terénnych zlomov a bodov v teréne, keďže manuálnym zahusťovaním bodového poľa a pridávaním zlomových línií aj pre menej výrazné terénne hrany vieme zachytiť ešte detailnejší priebeh nadmorskej výšky. Tento spôsob sa však pre svoju časovú náročnosť využíva skôr pre rozsahom menšie oblasti. Za najdiskutabilnejšiu môžeme považovať metódu založenú na automatickom pridaní a filtrácii budov a vegetácie, nakoľko výsledná hustota a presnosť bodového poľa, z ktorého je tvorený model TIN, sa môže líšiť v závislosti od prednastavení pre charakter skúmanej oblasti a parametrov pre filtráciu (obr. 4).



Obr. 4. Ukážka DMT vytvorených v pracovnom prostredí programu PHOTOMOD a) z údajov laserového skenovania pri rozlíšení 0,5 m, b) fotogrametrickým postupom zahrňajúcim tvorbu mriežky s parametrami 0,5 x 0,5 m pre osi X, Y a automatické pridanie a filtráciu bodov

Záver

Tento príspevok sa zaoberal porovnaním interpretačných metód digitálnej fotogrametrie pre tvorbu 3D modelov budov obce Kečovo na úrovni LOD 2, v pracovnom prostredí fotogrametrického softvéru PHOTOMOD, za účelom identifikácie a následnej analýzy rozdielov v meraniach pomocou metódy manuálnej stereovektorizácie, automatického pridania bodov a ich následnej filtrácie. Pre názorné porovnanie boli pridané aj údaje z meraní LiDAR-om.

Analýzou zhodnosti meraní vieme povedať, že na manuálnu tvorbu 3D modelov má určitý vplyv kvalita stereoskopického videnia operátora fotogrametrickej stanice a tiež kvalita dodaných LMS. Väčšie rozdiely v porovnaní modelu vytvoreného bez predchádzajúcich skúseností s odbornou vytvoreným modelom sa ukázali pri určení súradníc polohy bodov v smere horizontálnych osí X a Y, ako v smere výškovej Z. Celkovo najväčšie rozdiely v horizontálnom priebehu sa prejavili pri určení bodov na budovách so zložitejšou konštrukciou strechy, vo výškovom priebehu najvyššie rozdiely vykazovali ostro zakončené veže kostolov a budovy nižších výšok a rozmerov, ktorých priebeh hrán bol ťažko identifikovateľný pri odporúčanom priblížení v dôsledku rozostrenia hrán pri odporúčanom priblížení.

Metódou založenou na automatickom pridaní bodov na základe prednastavenia charakteru pre zvolenú oblasť a parametrov pre následnú filtráciu bolo identifikovaných spomedzi zvolených metód najmenej, len osem bodov, vzťahujúcich sa k polohe na vybraných hranách striech. Na základe pridania hustého mračna bodov z leteckého laserového skenovania bolo možné určiť hrany striech budov pomerne jednoducho, až na jeden prípad chýbajúcich bodov pre jednu hranu strechy. Najvyššia miera zhodnosti z vybraných interpretačných metód sa dosiahla pri tvorbe manuálnou metódou stereovektorizácie, ktorá bola využitá i pre tvorbu 3D modelu budov celej obce Kečovo.

Dôležitým parametrom pre korektné výsledné zobrazenie 3D modelu budov je potrebný aj čo najpresnejšie vytvorený DMT, ktorý spolu s 3D modelmi budov predstavuje komplexný celok reprezentujúci dané záujmové územie a jeho širšie vzťahy. Ako optimálna metóda z hľadiska časovej náročnosti a vyhovujúcej presnosti sa ukázal DMT vytvorený na základe importovania hustého mračna bodov z laserového skenovania.

Tento príspevok vznikol v rámci riešenia projektu APVV-15-0054: Fyzikálne založená segmentácia georeliéfu a jej geovedné aplikácie a projektu VEGA 1/0473/14: Dynamické 3-D modelovanie urbanizovanej krajiny v rôznych rozlišovacích úrovniach.

Literatúra

- BILJECKI, F. 2013: *The concept of level of detail in 3D city models* [online]. Dostupné na: <<http://www.gdmc.nl/publications/reports/GIS62.pdf>>.
- CAMPBELL, J. B., WYNNE, R. H., 2011: *Introduction to Remote Sensing*. New York (The Guilford Press), 670 p.
- ENVIROGEOPORTAL 2015: *NATURA 2000: Územia európskeho významu*. [online]. [cit. 2015-02-22]. Dostupné na: <<http://geo.enviroportal.sk/uev>>.
- GEOPORTÁL 2015: *Digitálny model reliéfu*. [online]. [cit. 2015-02-22]. Dostupné na: <<http://geoportál.gov.sk/sk/map>>.
- GREGOR, V., BARTOŠ, P. 1994: *Fotogrametria a diaľkový prieskum Zeme I*. Bratislava (Slovenská technická univerzita, 1. vyd.), 225 p.
- HOFIERKA, J., KAŇUK, J., GALLAY, M. 2014: *Geoinformatika*. Košice (Univerzita Pavla Jozefa Šafárika, Prírodovedecká fakulta), 194 p.

- HÖHLE, J. 2009: DEM Generation Using a Digital Large Format Frame Camera. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1, 92-93.
- CHUDÝ, F., KARDOŠ, M., ŠADIBOL, J. 2012: *Digitálna fotogrametria neoddeliteľná súčasť lesníckeho mapovania*. Zvolen (Technická univerzita vo Zvolene), 81 p.
- JENSEN, J. R. 2007: Active and Passive Microwave Remote Sensing. In Howard, J., Kave-
ney, D., Schiaparelli, K., Thomas, E., Booth, B., eds. *Remote sensing of the Environment*,
Pearson Prentice Hall. London (Pearson Prentice Hall), 291-335.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., CHIPMAN, J. W. 2004: *Remote sensing and image
interpretation*. New York (John Willey & Sons, Inc.), 45-46.
- MAZÚR, E., LUKNIŠ, M. 1986: *Geomorfologické členenie SSR a ČSSR. Časť Slovensko*.
Bratislava (Slovenská kartografia).
- NEUTENS, T., MAEYER, P. 2010: *Developments in 3D Geo-Information Sciences*. Berlin
(Springer), 200 p.
- OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM 2014: *OGC City Geography Markup Language
(CityGML) Encoding Standard Version 2.0.0* [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné na:
<<http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>>.
- ROZLOŽNÍK, M., KARASOVÁ, E. 1994: *Slovenský kras*. Banská Bystrica (Osveta), 9-58.
- STADLER, A., KOLBE, T. H. 2007: *Spatio-semantic coherence in the integration of 3D city
models* [online]. [cit. 2015-01-16]. Dostupné na: <[http://www.isprs.org/proceedings/
XXXVI/2-C43/Session1/paper_Stadler.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/2-C43/Session1/paper_Stadler.pdf)>.
- ŠÚSR 2014: *Bilancia pohybu obyvateľstva SR podľa obcí za rok 2013*. Bratislava (Štatic-
ký úrad Slovenskej republiky).
- ŽÍHLAVNÍK, Š., 2003: *Geodézia, fotogrametria a mapovanie v lesníctve*. Zvolen (Technic-
ká univerzita, Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Lesnícka fakulta), 388 p.

Comparison of digital photogrammetry interpretation methods for generating 3D building models on the LOD 2 level

Katarína ONAČILLOVÁ, Ján KAŇUK

Summary: *This paper presents comparison of methods for creating 3D models of build-
ings with level of detail 2 (LOD level 2) by the means of manual interpretation of airborne
stereoimagery. The research concerns a case study of the village Kečovo in Slovak Karst
at the bored of Slovakia and Hungary. The data processing workflow was performed in the
PHOTOMOD by RACURS. The methods used comprised manual 3D vectorization in a
stereoscopic mode, automatic addition of points and their subsequent filtration. For illus-
trative comparison were also added data from measurements acquired with airborne laser
scanning (LiDAR). The results showed that the quality of measurement is influenced by the
quality of the operator's vision and the quality of the airborne imagery. The operator's
experience influenced the correct location of points along the XY axes more than along the
Z axis. This effect was more pronounced for more complex roofs such as for churches,
combined buildings, etc. Much fewer points were identified by the method based on auto-
matic addition of points based on pre-set parameters of the selected area. There were only
eight points created along the selected edges of roofs. Identification of roofs was relatively
easy using the LiDAR data set, except for one case of missing points on one edge of the
roof. The manual stereovectorization was used to generate 3D models of buildings within
the entire village of Kečovo based on the good performance and comparison of the inter-
pretation methods. Terrain is an important feature of the landscape; therefore, it was also*

necessary to generate a digital terrain model (DTM). We opted for the LiDAR dataset as the source of point elevations for the DTM creation. The dataset was already filtered and classified to ground points and off-ground points; therefore, it was more feasible to use LiDAR points than manual collection of terrain points by stereovectorization. The presented outcomes of the research can provide guidance for decisions in case a 3D model of an urbanized area is to be created. However, further testing of the presented methods or other methods on a larger area can provide more representative quality measures.

Tab. 1. Comparison of coordinates of points measured with manual stereovectorization, automated photogrammetric method and LiDAR.

Fig. 1. Location of the study area in the Slovak Republic

Fig. 2. 3D model of buildings in the Kečovo village generated by manual stereovectorization in the PHOTOMOD software with the LOD2

Fig. 3. Position of buildings determined by airborne laser scanning, photogrammetric manual stereovectorization and method of photogrammetric automated addition of points and their filtering as displayed in the 3D interface of the PHOTOMOD software

Fig. 4. Digital terrain models generated in PHOTOMOD a) from airborne laser scanning with resolution of 0,5 m, b) photogrammetric approach which involved generation of a grid (0,5 m cell size) and automated addition and filtration of points.

Adresy autorov:

Bc. Katarína Onáčillová
Ústav geografie,
Prírodovedecká fakulta Univerzity P. J. Šafárika
Jesenná 5, 040 01 Košice
onacillova.katarina@gmail.com

RNDr. Ján Kaňuk, PhD.
Ústav geografie,
Prírodovedecká fakulta Univerzity P. J. Šafárika
Jesenná 5, 040 01 Košice
jan.kanuk@upjs.sk