DIGITÁLNE VÝŠKOVÉ MODELY ZÍSKANÉ Z LETECKÝCH SNÍMOK

Jozef Šadibol[1] Florián Becze[2]

[1]Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Lesnícka fakulta, TU Zvolen, T.G. Masaryka 24, 960 53, Zvolen, SR, jozefsadibol@gmail.com
[2]Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Lesnícka fakulta, TU Zvolen, T.G. Masaryka 24, 960 53, Zvolen, SR

Abstract

This work deals with the creation of digital elevation models from digital aerial images by automated photogrammetry workflows. Especially with the advent of digital cameras has opened the question of the digital terrain model and digital surface model creation. Furthermore, the work deals with the accuracy and quality of the models, as well as a way of their obtaining using automated elements of digital photogrammetry. Automatic creation of digital terrain models is not easy. We often meet with occurrence of systematic errors and outliers, which can be eliminated by various statistical methods.

Kľúčové slová

digitálna letecká snímka, digitálna aerotriangulácia, digitálny model terénu, digitálny model povrchu

1 Úvod

S nástupom digitálnych kamier sa začala čoraz viac rozoberať problematika tvorby digitálnych výškových modelov z leteckých snímok za pomoci automatizovaných prvkov digitálnej fotogrametrie (Zhang, B., Miller, S., Walker, S., DeVenecia, K., 2007). Hlavnou úlohou digitálnej fotogrametrie je tvorba ortofotosnímky, no v súčasnosti sa do popredia dostávajú aj ostatné produkty digitálnej fotogrametrie (digitálne výškové modely). Digitálne výškové modely zohrávajú dôležitú úlohu v procese tvorby ortofotosnímky. Pri tvorbe ortofotosnímky sa odstraňujú radiálne posuny. Tieto vznikajú v dôsledku toho, že snímka je stredový priemet a mapa je ortogonálny priemet (Žíhlavník, Š., 2004). Transformácia stredového priemetu do ortogonálneho priemetu sa vykonáva digitálnym diferenciálnym prekresľovaním s využitím digitálneho modelu terénu.

Ako už bolo spomenuté digitálny model terénu predstavuje významnú súčasť tvorby ortofotosnímky. Pre tvorbu true ortofotosnímky je dôležitý najmä digitálny model povrchu. Tu sa stretávame s náročnosťou tvorby kvalitného digitálneho modelu povrchu pre vytvorenie kvalitnej ortofotosnímky (Kardoš, M., Chudý, F., 2008). Najmä v oblastiach náhlych výškových zmien dochádza k deformáciám objektov na ortofotosnímke, preto je nutné nadefinovať tieto náhle zmeny terénu. Digitálne výškové modely vytvorené zo stereomodelu z jednotlivých snímok so spoločným prekrytom vychádzajú z automatizovaného postupu obrazovej korelácie. Jednotlivé stereomodely sú výsledkom automatizovanej blokovej aerotriangulácie. Bloková aerotriangulácia je najdôležitejšou súčasťou digitálnej fotogrametrie. Jej úlohou je prevod snímkových súradníc na geodetické súradnice. Digitálnou automatickou aerotrianguláciou generujeme blokovú

konfiguráciu snímok, umožňuje automaticky vyhľadávať spojovacie body bloku s presnosťou pod úrovňou priestorového rozlíšenia obrazového prvku snímky, tzv. sub – pixelovú presnosť. Celý postup digitálnej automatickej aerotriangulácie predstavuje hlavne automatické riešenie vzájomnej orientácie v bloku snímok, pri ktorej sa automaticky vyberajú spojovacie body v pásmach dvojnásobného, trojnásobného a priečneho prekrytu a navzájom sú priraďované do susedných snímok. Výsledkom riešenia sú vytvorené stereodvojice, resp. blok snímok. (Kardoš, M., Chudý, F., 2007)

Od výsledku presnosti aerotriangulácie závisí presnosť digitálneho modelu povrchu a terénu.

2 Rozbor problematiky

2.1 Digitálny výškový model

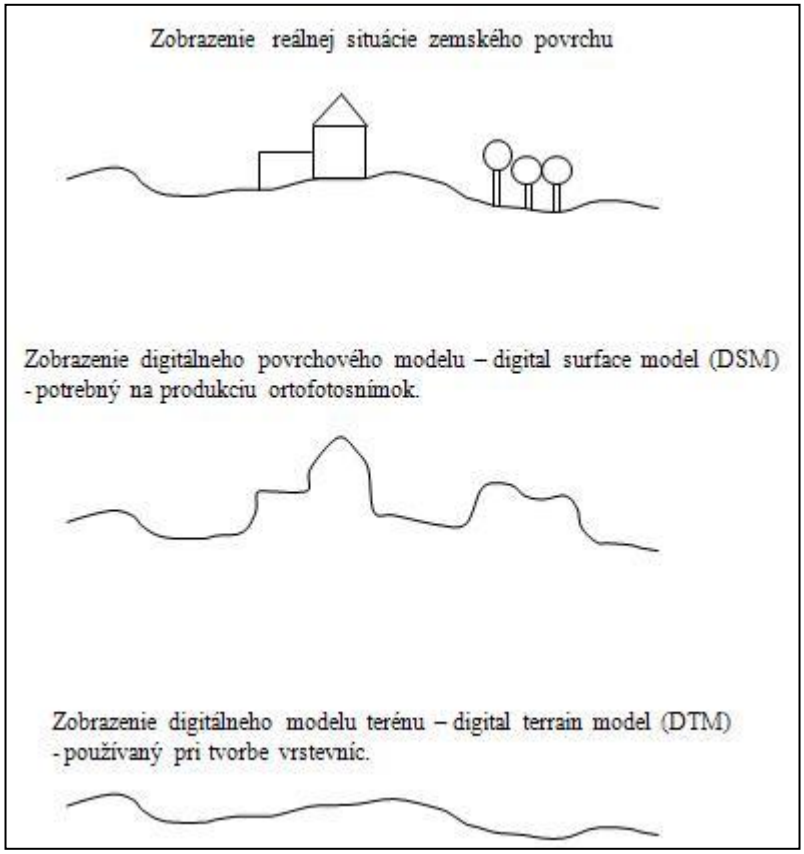
Digitálny výškový model rozdeľujeme do dvoch skupín a to na digitálny model terénu (DMT) a digitálny model povrchu (DMP). Digitálny model terénu je požadovaný pri tvorbe klasických ortofotomáp, na návrh diaľnic a ďalších inžinierskych sieti. Digitálny model povrchu je potrebný pre tvorbu pravých ortofotomáp (ako napr. aj na plánovanie výškových veží pre mobilných operátorov. Na kvalitu a presnosť daného výškové modelu vplýva veľa faktorov (správne navrhnutie snímkového letu, nízka vegetácia, kvalita obrazu). Presnosť digitálnych výškových modelov posudzujeme pomocou smerodajnej odchýlky a strednej kvadratickej chyby. Za vysoko presné považujeme tie, ktoré majú smerodajnú odchýlku pod 0,5 m, za menej presné sú tie, ktorých smerodajná odchýlka je nad 0,5 m (Höhle, J., 2009). Taktiež hustota bodov a štruktúra digitálneho výškového modelu je rozdielna, obyčajne sa stretávame z dvoma druhmi štruktúr TIN a GRID (mriežka) (tab. 1).

Tab. 1 Prehľad typov DEM a ich využitie (Höhle,2009)

	presnosť	hustota	štruktúra	využitie	metóda tvorby
DMT	<0.5 m	1-5 m	TIN	Návrh diaľnic a inžinierskych sieti	Laserové skenovanie a fotogrametria
	>0.5 m	5-10 m	GRID	Tvorba ortofotomáp	Fotogrametria
DMP	<0.5 m	1-5 m	TIN	Tvorba pravých ortofotomáp	Laserové skenovanie a fotogrametria
	>0.5 m	5-50 m	GRID	Plánovanie výškových veží pre mobilných operátorov	Fotogrametria

Pri štúdiu problematiky digitálnych modelov sa stretávame s nejednoznačnosťou používania pojmov a skratiek v odbornom texte.

Digitálny výškový model – DVM (ang. Digital elevation model – DEM) je to digitálny model, v ktorom sú za výškové údaje použité nadmorské výšky (Šíma, J., 2002). Digitálny výškový model je širší pojem a môžeme ho rozdeliť na digitálny model terénu a digitálny model povrchu (obr. 1), čiže sú v ňom zahrnuté prvky povrchu a terénu.



Obr. 1: Druhy digitálneho výškového modelu (DEM)

Digitálny model terénu - DMT (ang. digital terrain model - DTM)
Ide o digitálny model nadmorských výšok, definujúci prvotný zemský povrch. Vylučuje prvky zemského povrchu ako napr. budovy, lesy. atď. (Linder, W., 2006). Slovo terén má korene vo vojenstve a spravidla sa tým rozumie zemský povrch (bez stavieb a vegetačnej pokrývky) vyjadrený na mape generalizovane topografickou plochou. Topografická plocha je definovaná spravidla formou výškových údajov uzlových bodov vhodne zvolenej siete, či mriežky.
Digitálny model povrchu - DMP (ang. digital surface model - DSM)
Zobrazuje vrchnú časť povrchu, vrátane budov, lesov, atď (Linder, W., 2006). Vyjadruje nielen zemský povrch, ale aj povrch všetkých objektoch na ňom (strechy budov, koruny stromov). Vzniká pri automatizovanom vyhodnotení leteckých snímok na princípe obrazovej korelácie.
Digitálny model reliéfu - DMR
DMR je digitálna prezentácia reliéfu spojito sa meniaceho v priestore (Voženílek, V. a kol., 2001).

Iní autori (Hofierka, J.- Šúri, M., 1998) rozlišujú pojem digitálny model reliéfu ako množinu priestorovo priradených údajov (nadmorská výška, sklon, expozícia, krivosť) vypočítaných na základe priestorovo určených bodov a interpolačnej techniky. Potom digitálny model terénu je iba významovo užším pojmom.

2.2 Spôsoby získania výškového modelu

Digitálny výškový model môžeme získať automatický, poloautomaticky a manuálne zo stereomodelov z leteckých snímok.

Manuálne získaný digitálny výškový model sa realizuje pomocou stereoskopického zberu priestorových súradníc nastavením Z hodnoty na jednotlivé body stereomodelu. Tento postup je časovo veľmi náročný v dôsledku editovania singulárnych hrán a spojníc.

Poloautomatický zber priestorových súradníc sa realizuje stereoskopickým zberom, ale využíva sa obrazová korelácia na jednotlivé body stereomodelu.

Digitálny výškový model získaný automatickým zberom priestorových súradníc vychádza zo správneho vytvoreného stereomodelu. Pri tomto spôsobe sa vytvára veľké množstvo výškových bodov s využitím obrazovej korelácie, preto kvalita takéhoto modelu závisí od textúry obrazu. V súčasnosti spôsob vyhľadávania výškových bodov sa overuje pomocou vizualizácie daného výškového modelu s prekrytom digitálnej snímky napr. softvér od nemeckej firmy INPHO.

Efektívnejšie je získať digitálny model terénu či povrchu pomocou laserového pozemného skenovania (LIDAR). V súčasnosti sa laserové skenovanie vykonáva počas snímkovacieho letu.

2.3 Typy reprezentácie digitálneho výškového modelu

Existujú tri základné spôsoby (typy) reprezentácie digitálneho výškového modelu (Voženílek, V. a kol., 2001):

- ***vrstevnice***
- ***TIN***
- ***grid***

Vrstevnice (izolínie) – predstavujú tradičné vyjadrenie nadmorskej výšky zemského povrchu s doplnením významných výškových bodov. Toto vyjadrenie je však nespojité, pretože vrstevnice reprezentujú len vybrané nadmorské výšky (základný interval vrstevníc). K líniovému popisu reliéfu patria aj vertikálne profily, sieť údolníc a chrbátnic. Líniová reprezentácia sa využíva predovšetkým v tradičných geomorfologických štúdiách na analógových mapách.

TIN (triangulated irregular network) patrí k vektorovým typologickým štruktúram. Vychádza z nepravidelnej trojuholníkovej siete, kde elementárnu geometrickú plochu zemského povrchu reprezentuje trojuholník. Výškové hodnoty sú priradené vrcholom trojuholníkov. V poli výškových bodov sú trojuholníky zvolené tak, že vo vnútri kružnice opísaného trojuholníka nesmie ležať žiadny iný bod. Ide o Delaunayovo kritérium. Výhodou tohto prístupu je, že hustotu vstupných bodov možno zmeniť podľa členitosti reliéfu (v členitejšom území použiť hustejšiu sieť a naopak) a tým trojuholníkovú sieť maximálne prispôsobiť reliéfu. Naviac vizualizácia reliéfu pomocou TIN je názornejšia. Model TIN má však i svoje nedostatky. V prípade, že sa TIN vytvára z vrstevníc môžu vzniknúť tzv. umelé terasy (väčšinou v okolí plochých údolí a chrbtov), ktoré znemožňujú následnú automatickú tvorbu línií odtoku alebo rozvodníc. Tento nedostatok možno odstrániť druhotným mechanickým vložením kritických bodov chrbátnic a údolníc. Ďalšou nevýhodou je, že k modelovaniu a analýze nemožno použiť mapovú algebru.

Grid sa radí k pravidelným rastrovým štruktúram, v ktorých je povrch diskretizovaný do matice buniek. Najčastejším tvarom buniek je štvorec. Prednosť gridu sa dáva pre väčšiu jednoduchosť výpočtových algoritmov, ale je možné použiť aj obdĺžnik, šesťuholník alebo rovnostranný trojuholník. Každá bunka nesie hodnotu nadmorskej výšky, ktorá sa vzťahuje k

stredu bunky (grid) alebo k uzlu mriežky (potom sa hovorí o lattice) vytvorenej bunkami. Predpokladá sa, že premenlivosť medzi jednotlivými bunkami je matematicky kontinuálna, takže je možné ľahko vykonávať štatistické analýzy pri použití mapovej algebry. Mapová algebra umožňuje vykonávať rôzne operácie na pravidelných štruktúrach (teda vrátane grid a lattice) rovnakým spôsobom ako sú vykonávané na dvoch číslach.

Grid a TIN nemožno považovať za pravé trojdimenzionálne (3D) údajové modely. Hodnota Z je v nich definovaná ako pseudo atribút vztiahnutý k polohe určenej súradnicami x a y, preto je v literatúre skôr používané označenie 2,5 D. Skutočné 3 D objekty možno digitálne zaznamenať pomocou tzv. voxelu, kedy je objekt zložený z elementárnych 3D prvkov. Ich využitie je zatiaľ z dôvodov výpočtovej náročnosti obmedzené.

2.4 Metódy posúdenia kvality, resp. presnosti digitálneho výškového modelu

Na posúdenie presnosti vytvoreného DMT boli vypracované rôzne metódy, väčšinou aplikované na konkrétne prípadové štúdie. Ako uvádzajú (Fořt,J.-Janec,M., 2004) poznáme tieto základné postupy:

- Porovnanie dvoch (prípadne viacerých) DMT medzi sebou navzájom
  Modely toho istého územia vytvorené rôznymi metódami alebo s použitím rôznej kvality dát sa porovnajú medzi sebou a odvodia sa priestorové rozdiely a odchýlky polohopisu alebo výškopisu. V tomto prípade nie je možné zistiť, ktorý z porovnávaných modelov je presnejší.
- Porovnanie vytvoreného DMT so štandardným DMT
  Tento spôsob spočíva v porovnaní vytvoreného modelu s modelom, ktorý bol zvolený za štandard. Za štandardný môžeme určiť model, ktorý bol vytvorený pomocou dát získaných geodetickým meraním. Práve geodetické merania nám poskytujú najpresnejšiu bázu dát pre tvorbu DMT a finálny vytvorený model by mal až na menšie odchýlky presne kopírovať priebeh a morfológiu skutočného terénu. Takto vytvorený model porovnáme s modelom, ktorý bol vytvorený z iných, ako geodeticky získaných dát. Pomocou rôznych štatistických výpočtov možno kvantitatívne vyjadriť polohopisnú a výškopisnú presnosť porovnávaného modelu.
- Matematické metódy porovnania
  Aj pri procese tvorby DMT z veľmi presných a kvalitných dát je možné, že niektorý krok tvorby modelu údaje modifikuje a zaťaží ich chybou. Ak vieme identifikovať rozsah týchto chýb, tak ich súčtom môžeme teoreticky odvodiť mieru presnosti modelu. Výpočet komplikuje fakt, že do výpočtu možno i určitosťou zahrnúť len systematické chyby, ktoré sú v modely rozložené pravidelne. Náhodné chyby možno odhadnúť a do výpočtu zahrnúť s určitou toleranciou tiež, ale ak model prechádza počas svojho vzniku jednotlivými krokmi, kde u každého je odhadnutá náhodná chyba, úmerne sa nám zvyšuje aj tolerancia – rozmedzie, v ktorom sa môže chyby pohybovať. Komplikované a nejasné môže byť aj určenie chýb a ich rozsahu. Každopádne pri súčasnom nedostatočnom stave poznatkov nie je možné túto metódu aplikovať v konkrétnych prípadových štúdiách a odvodiť spoľahlivé výsledky.
- Porovnanie profilov DMT
  Z každého porovnávaného modelu vytvoríme profily, ktorých smer určíme tak, aby nám graficky zobrazili územie, ktoré je čo najviac výškovo členité. Na základe optického pozorovania alebo s použitím rôznych štatistických nástrojov môžeme určiť kvalitatívne a

kvantitatívne odchýlky porovnávaných modelov. Profily terénu rôzneho smeru a dĺžky môžeme vytvoriť v ľubovoľnom softvérovom GIS programe.

3 Experimentálny materiál

3.1 Snímkový materiál

Predstavuje panchromatické a multispektrálne snímky z digitálnej kamery UltraCamD od firmy Vexcel zachytávajúce územie Vysokoškolského lesníckeho podniku vo Zvolene. nasnímané v 6 radoch po 26 snímkach z 85 % pozdĺžnym a 35 % priečnym prekrytom. Digitálne snímky sú v úrovni spracovania 2 (Level 2 – označenie výrobcu) po odstránení geometrických a rádiometrických nepresností. Bežne výrobca produkuje na trhu snímky Level 3, čiže po panchromatickom zaostrení a po obrazovom vylepšení s 8 bitovou farebnou hĺbkou jednotlivých kanálov.

Parametre panchromatickej snímky
Rozmer snímky : 7500*11500 pixelov (67,5*103,5 mm)
Veľkosť pixla : 9.000 µm * 9.000 µm
Konštanta fotokomory ck : 101,4 mm
Parametre multispektrálnej snímky
Rozmer snímky : 2400*3680 pixelov (67,5*103,5 mm)
Veľkosť pixla : 28.125 µm * 28.125 µm
Konštanta fotokomory ck : 101,4 mm

Rádiometrické rozlíšenie snímok, čiže farebná hĺbka pixla je 12 bitov v dynamickom rozsahu. Obrazový element (pixel) môže nadobudnúť hodnoty optickej hustoty v rozsahu 0-4096.

3.2 Vlícovacie a kontrolné body

Vlícovacie a kontrolné body boli zamerané pomocou merania GNSS s využitím služby SKPOS, alebo to boli body štátnej priestorovej siete ŠPS. Na lokalitách kde nie je v dostatočnej kvalite zabezpečená dostupnosť signálu GPRS sa používa fázové meranie statickou metódou. Na voľných priestranstvách s dobrou kvalitou signálu GPRS sa uskutočňuje merania v reálnom čase s príjmom korekcií z SKPOS. Na zameranie vlícovacích bodov sa požíva dvojfrekvenčný GNSS prijímač Topcon Hiper GGD. Ďalšie spracovanie meraných dát sa vykonáva v softvéri Topcon Tools 7.3. Súradnice bodov sú určené v súradnicovom systéme ETRS89, následne pretransformované do JTSK s využitím lokálneho transformačného kľúča, prípadne sa môže zvoliť iný súradnicový systém (JTSK03, UTM 34). Výškové súradnice sú pripojené na Slovenskú nivelačnú sieť vo výškovom systéme Baltskom po vyrovnaní (Bpv). Vlícovacie body sa v teréne signalizovali krížmi bielej farby s ramenami dlhými 1m a širokými 30 cm.

3.3 Softvérové vybavenie

Integrovaný fotogrametrický softvér Inpho s modulmi

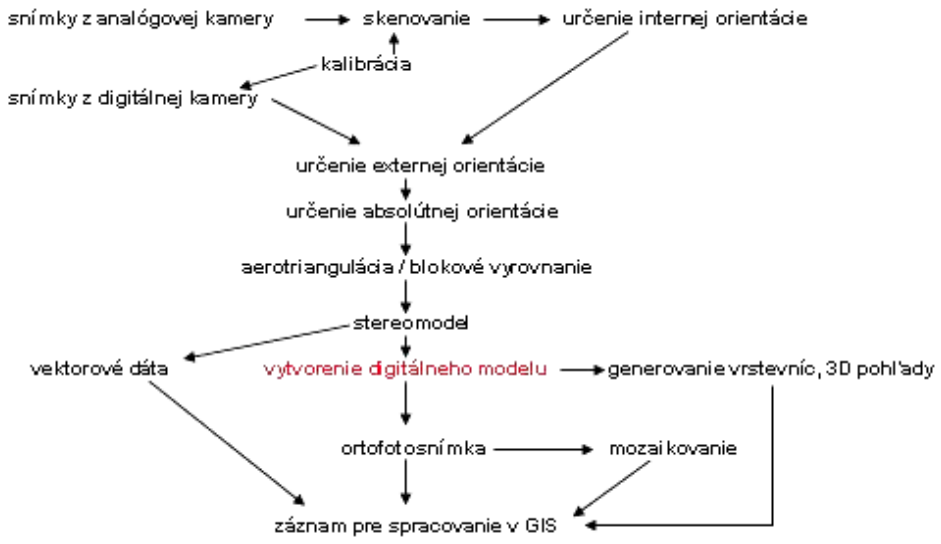
- ApplicationsMaster V5.2 – na založenie projektu, editovanie kamery, import prvkov vonkajšej orientácie, riešenie vnútornej orientácie, import leteckých snímok,
- Match –AT – modul na automatickú blokovú aerotriangulácie

- Match - T – DSM, - modul na tvorbu digitálneho modelu terénu a povrchu.
- DTM Master – úprava digitálneho modelu terénu, povrchu a ich vizualizácia.

4 Metodika práce

V rámci vytvorenia digitálneho modelu terénu a povrchu bolo potrebné vytvoriť fotogrametrický projekt spracovania digitálnych snímok z územia Vysokoškolského podniku TU vo Zvolene.

Samotné vytvorenie digitálneho modelu terénu pomocou digitálnej fotogrametrie si vyžaduje vytvorenie priestorového modelu (stereomodelu). Postupnosť krokov vytvorenia DMT z leteckých snímok znázorňuje obr. 2



Obr. 2 : Postupnosť krokov vytvorenia DMT z leteckých snímok

Najdôležitejšou úlohou v rámci fotogrametrického projektu je vykonanie automatickej blokovej aerotriangulácie.

Pri vytváraní fotogrametrického projektu je potrebné nadefinovať formát vstupných a výstupných dát, typ používaných dĺžkových a uhlových jednotiek. Súradnicový systém WGS-84 s pravouhlým systémom UTM zóna 34N. Ďalej sa definujú údaje o použitej kamere UltraCamD (ohnisková vzdialenosť objektívu, rozmer snímok, veľkosť obrazového prvku). K dispozícii sme mali aj parametre vonkajšej orientácie získané inerciálnou meračskou jednotkou pri snímkovaní. Ide o číslo snímky, časový údaj, priestorové súradnice projekčného centra (X, Y, Z), priečny sklon ω, pozdĺžny sklon φ, uhol pootočenia χ, zemepisné súradnice projekčného centra. Po importe parametrov vonkajšej orientácie bolo potrebné priradiť jednotlivým snímkam ich rastrové súbory, zoradiť ich správne do radov a definovať orientáciu kamery v smere letu lietadla. Riešenie vnútornej orientácie pri leteckých snímkach získaných priamo z digitálnej kamery je dané polohou rohových pixlov na snímke.

Nasledujúcim krokom bolo vytváranie snímkových blokov, ktoré vstupujú do procesu automatickej vzájomnej orientácie, založenej na vyhľadávaní spojovacích bodov na snímkach

aplikáciou obrazového vyhľadávania, tzv. image matching. Po vyhľadávaní spojovacích bodov, ktoré dané snímky navzájom spoja do jedného bloku, sa stereoskopicky zmerajú vlícovacie body a následne sa vykoná absolútna orientácia. Výsledkom automatickej blokovej aerotriangulácie je vytvorenie stereomodelov s odstránením vertikálnych paraláx. Presnosť automatickej blokovej aerotriangulácie sa posudzuje na základe kontrolných bodov, ktoré nevstupujú do výpočtu aerotriangulácie. V našom prípade sme presnosť posudzovali pomocou 20 kontrolných bodov zameraných pomocou GNSS (Tab. 2).

Tab. 2 Presnosť automatickej aerotriangulácie

RMS – stredná kvadratická chyba	
x	0,063 [m]
y	0,066 [m]
z	0,155 [m]

Po vykonaní automatickej blokovej aerotriangulácie sme v programe MATCH-T DSM ako súčasti ApplicationsMaster 5.2 vytvorili digitálny model povrchu a digitálny model terénu. V rámci tvorby DMT a DMP sme nadefinovali veľkosť gridu (rozostup jednotlivých výškových bodov) typ terénu, úroveň vyhladzovania povrchu modelu, spôsob automatického generovania bodov povrchu, počet iterácií pre elimináciu hrubých chýb a pre DMT počet iterácií pre elimináciu bodov na strechách budov, korunách stromov.

Výšková presnosť digitálneho modelu terénu závisí od presnosti automatickej blokovej aerotriangulácie. V našom prípade sme vytvorili digitálny model terénu s rozostupom bodov 2,7 m a digitálny model povrchu s rozostupom bodov 0,53 m. Výškovú presnosť digitálneho modelu terénu sme posudzovali pomocou referenčných kontrolných údajov získaných na základe :

- geodeticky zameraných bodov pomocou merania GNSS s využitím služby SKPOS
- stereoskopicky určených výškových bodov zo stereomodelov
- porovnania s iným digitálnym modelom terénu (DMR 3).

Presnosť digitálneho modelu sme charakterizovali pomocou strednej kvadratickej chyby (stredná výšková chyba), smerodajnej odchýlky a aritmetického priemeru (Tab. 3).

Tab. 3 charakteristiky presnosti DEM pre normálne rozdelenie

Stredná kvadratická chyba	$M_h = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta h_i^2}$
Aritmetický priemer	$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta h_i$
Smerodajná odchýlka	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(1-n)}\sum_{i=1}^{n}(\Delta h_i - \mu)^2}$

Aby sme mohli použiť tieto charakteristiky presnosti digitálneho modelu terénu, musia mať dané hodnoty rozdielov výšok Δh_i normálne rozdelenie bez odľahlých (hrubých) chýb. Na posúdenie normálneho rozdelenia hodnôt používame vizuálnu prezentáciu histogramov a kvantilových grafov. Na lepšiu diagnostiku odľahlých (hrubých) hodnôt od normálneho

rozdelenia vyjadruje rozdelenie kvantilov teoretického a daného. Silná odchýlka od priamky vyjadruje, že rozloženie hodnôt chýb nie je normálne rozdelenie.
Okrem vizuálnych metód posúdenia normálneho rozdelenia sa používajú štatistické testy normality napr. Shapiro-Wilkov W test, ale tieto testy sú pomerne citlivé na veľké množstvo dát a na odľahlé hodnoty (Höhle, J., Höhle, M., 2009).

Poznáme rôzne prístupy detekcie odľahlých (hrubých) chýb. (Höhle, J., Potuckova, M., 2006) považuje za hrubé chyby tie, ktoré sú väčšie ako trojnásobok strednej kvadratickej chyby $|\Delta h_i| > 3.M_h$. Iní autori (Daniel, C., Tennant, K., 2001) využívajú na odhalenie hrubých chýb trojnásobok smerodajnej odchýlky 3*σ.

Na základe kvantilového grafu sme posudzovali normálne rozdelenie hodnôt a výskyt hrubých chýb. Vypočítali sme charakteristiky presnosti digitálnych modelov pre pôvodné hodnoty. Ďalším krokom bolo odstránenie odľahlých (hrubých) chýb na základe trojnásobku strednej kvadratickej chyby. Po odstránení hrubých chýb sme opäť určili charakteristiky presnosti digitálnych modelov (smerodajná odchýlka, stredná kvadratická chyba). Systematickú zložku strednej kvadratickej chyby (vychýlenosť) sme posudzovali na základe T-testu, ktorý má potvrdiť alebo vyvrátiť, že ak vznikne nejaká systematická chyba, tak nevznikla z titulu náhodných činiteľov.

Stanovenie nulovej hypotézy: $\mu_h = 0$
Výpočet hodnoty T (Böhm, J. a kol., 1990)

$$T_h = \frac{\frac{\mu_h}{\sigma_h}}{\sqrt{n-1}}$$

Určenie hodnoty $t_{0,025(n)}$:

Určíme ju z tabuľky „Kritické hodnoty Studentovho t rozdelenia pre zvolenú hladinu významnosti.“ (Böhm, J. a kol., 1990)

n – je počet uvažovaných hodnôt v súbore pri testovaní

Potvrdenie alebo popretie hypotézy:

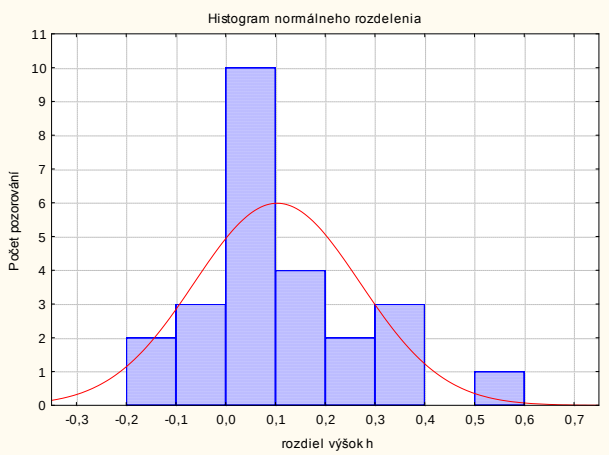
- ak $T < t_{0,025(n)}$ - nulová hypotéza sa prijíma, čo znamená, že systematická chyba je štatisticky nevýznamná
- ak $T > t_{0,025(n)}$ - nulová hypotéza sa zamieta a vysloví sa tvrdenie s 95% spoľahlivosťou, že súbor je zaťažený systematickou chybou.

Ak sa má táto systematická chyba odstrániť, je potrebné príslušné hodnoty opraviť o hodnotu rovnajúcu sa opačnej hodnote aritmetického priemeru základného súboru hodnôt.

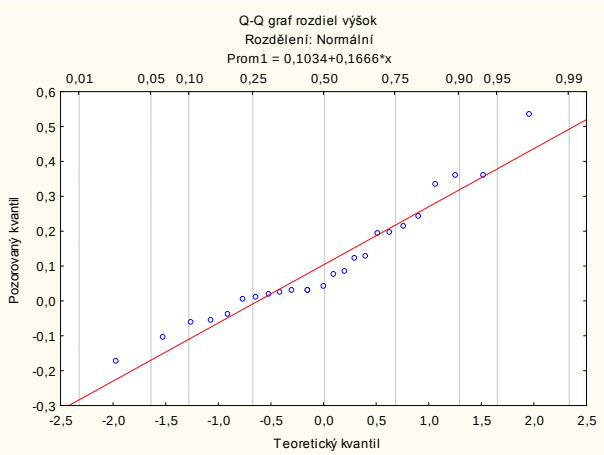
5 Výsledky

5.1 Posúdenie presnosti digitálneho modelu terénu na základe geodeticky zmeraných bodov

Tieto referenčné body boli zamerané metódou GNSS s využitím služby SKPOS, alebo to boli body štátnej priestorovej siete (ŠPS). Konkrétne bolo zmeraných 25 kontrolných bodov, ktoré sme porovnávali s bodmi DMT a následne sme určili odchýlky hodnôt výšok Δh_i. Pomocou histogramového rozdelenia hodnôt a Q-Q kvantilových grafov (Obr.3,4) sme posudzovali či sa jedná o normálne rozdelenie a prítomnosť odľahlých (hrubých) chýb. Na odhalenie počtu hrubých chýb sme použili vzťah $|\Delta h_i| > 3*M_h$. V tomto prípade sme nezaznamenali prítomnosť hrubých chýb, pretože sa nevyskytla väčšia hodnota vo výberovom súbore ako $3*M_h$ (3*0,19329).



Obr. 3 Histogram výškových chýb s početnosťou n=25



Obr. 4 Q-Q graf znázorňujúci rozdelenie výškových chýb a prítomnosť hrubých chýb

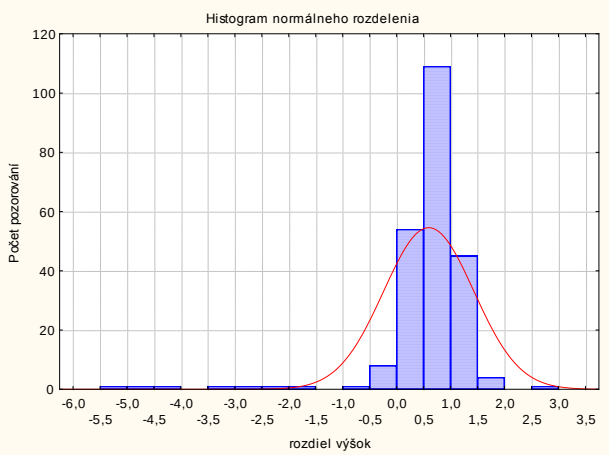
Tab. 4 Výsledné hodnoty presnosti DMT pre normálne rozdelenie s počtom kontrolných bodov 25 bez vylúčenia odľahlých hodnôt

Presnosť DMT	Hodnoty [m]
Stredná kvadratická chyba M_h	0,19329
Aritmetický priemer μ	0,10344
Smerodajná odchýlka σ	0,16328
Stredná kvadratická chyba (po odstranení systematickej chyby) M_h	0,16328

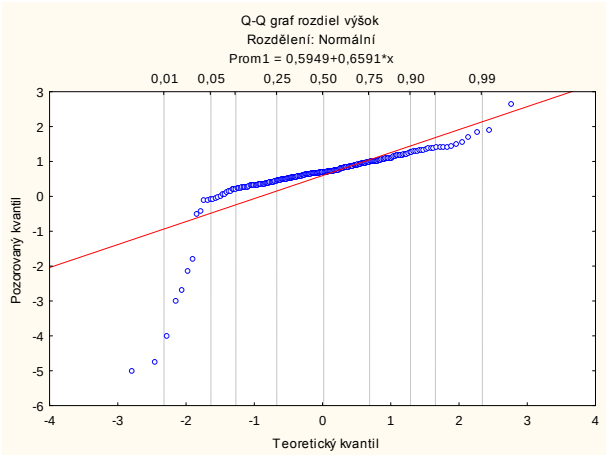
5.2 Porovnanie DMT a s bodmi určených stereoskopicky zo stereomodelov

Jednalo sa konkrétne o 229 bodov s priestorovými súradnicami určených stereoskopicky z jednotlivých stereomodelov vytvorených v rámci fotogrametrického procesu aerotriangulácie. Priestorové rozmiestnené kontrolných (určených steroskopicky) bodov je náhodné, pričom sa prihliada na miesta náhlej zmeny výšky. Z jednotlivého porovnávania výšok sme určili výškové

odchýlky Δh_i a tie sme následne vyniesli do histogramového a kvantilového Q-Q grafu. Z histogramového a kvantilového Q-Q grafu sme posúdili či sa jedná o normálne rozdelenie hodnôt a prítomnosť odľahlých hrubých chýb (Obr.5,6). Na odhalenie počtu hrubých chýb sme použili vzťah $|\Delta h_i| > 3*M_h$ (3*1,02547), kde sa vyskytlo 5 hrubých chýb. Po odstránení hrubých a systematických chýb sme znova určili smerodajnú odchýlku a strednú kvadratickú chybu(Tab.5). Z tabuľky môžeme vidieť výrazný vplyv systematickej chyby, to bolo pravdepodobne spôsobené chybou vyhodnocovateľa pri určovaní výšok pomocou stereoskopického videnia.



Obr. 5 Histogram výškových chýb s početnosťou n= 229



Obr. 6 Q-Q graf znázorňujúci rozdelenie výškových chýb a prítomnosť hrubých chýb

Tab. 5 Výsledné hodnoty presnosti DMT pre normálne rozdelenie s počtom kontrolných bodov 229 z toho 5 odľahlých hodnôt

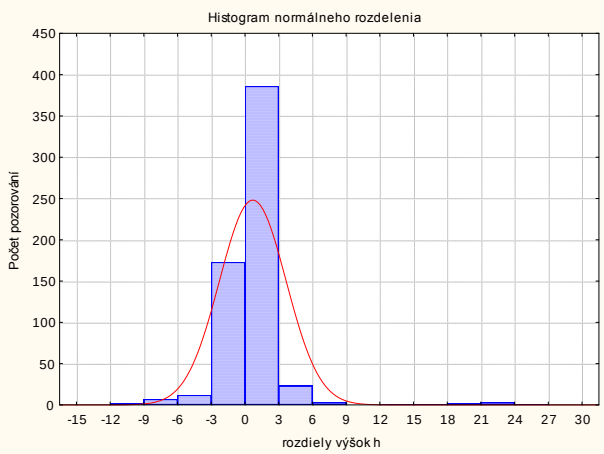
Presnosť DMT	Hodnoty [m]
Stredná kvadratická chyba M_h	1,02547
Aritmetický priemer μ	0,59485
Smerodajná odchýlka σ	0,83531
Aritmetický priemer μ po odstránení hrubých chýb	0,69525
Smerodajná odchýlka σ po odstránení hrubých chýb	0,48240
Stredná kvadratická chyba M_h po odstránení hrubých chýb	0,84622
Stredná kvadratická chyba (po odstránení systematickej chyby) M_h	0,48240

5.3 Porovnanie DMT s iným digitálnym modelom reliéfu

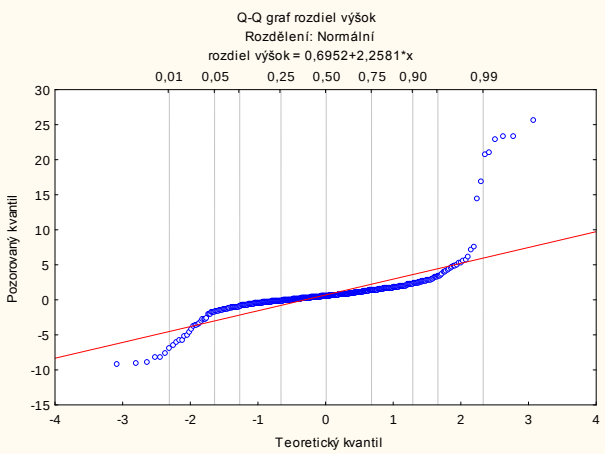
Digitálny model reliéfu 3. úrovne je digitálny súbor informácií o výškových údajoch terénu z územia Slovenskej republiky, ktoré sú reprezentované maticou výškových údajov terénu vo vzťahu k definovanému polohovému a výškovému systému. Základným zdrojom pre tvorbu DMR-3 sú tlačové podklady topografických máp v mierke 1:10 000 a topografických máp v mierke 1:25 000.

Z tohto digitálneho modelu terénu DMR 3 sme vyselektovali body s priestorovými súradnicami s rozstupom 100 m a následne sme tieto body s celkovým počtom 614 porovnali s DMT vytvorený digitálnou fotogrametriou. Jednotlivé hodnoty výškových rozdielov sme

vyjadrili opäť pomocou histogramového a kvantilového grafu (Obr.7,8), a následne sme určili typ rozdelenia a hodnôt a prítomnosť odľahlých (hrubých). Počet hrubých chýb sme stanovili na základe vzťahu $|\Delta h_i| > 3*M_h$ (3*3,03979), ich počet je 10 (Tab.6). Po odstránení hrubých a systematických chýb sme znova určili smerodajnú odchýlku a strednú kvadratickú chybu.



Obr. 7 Histogram výškových chýb s početnosťou n= 614



Obr. 8 Q-Q graf znázorňujúci rozdelenie výškových chýb a prítomnosť hrubých chýb

Tab. 6 Výsledné hodnoty presnosti DMT pre normálne rozdelenie s počtom kontrolných bodov 614 z toho 10 odľahlých hodnôt

Presnosť DMT	Hodnoty [m]
Stredná kvadratická chyba M_h	3,03979
Aritmetický priemer μ	0,69525
Smerodajná odchýlka σ	2,95922
Aritmetický priemer μ po odstránení hrubých chýb	0,45986
Smerodajná odchýlka σ po odstránení hrubých chýb	1,71023
Stredná kvadratická chyba M_h po odstránení hrubých chýb	1,77098
Stredná kvadratická chyba (po odstránení systematickej chyby) M_h	1,71023

6 Záver

Digitálne výškové modely získané z digitálnych kamier cez proces digitálnej fotogrametrie predstavujú dobrý zdroj priestorových údajov o danom teréne a povrchu krajiny. Kvalita a presnosť digitálnych modelov sa ťažko posudzuje, čo je pre používateľov nevýhodné z hľadiska vhodného použitia. Získané modely majú v sebe často skryté systematické a hrubé chyby, ktoré znehodnocujú ich kvalitu. Kvalita digitálneho modelu má výrazný vplyv na klasickú a pravú ortofotosnímku. Najmä na tvorbu pravých ortofotosnímok je potrebný kvalitný digitálny model povrchu, tu sa však stretávame s problémom editácie povinných hrán (hrany s náhlou zmenou terénu). Editovanie povinných hrán je časovo veľmi náročné a vyžaduje si určitú skúsenosť vyhodnocovateľa. Presnosť digitálneho modelu sme overovali na základe referenčných dát. Ako referenčné dáta sme použili geodetický zmerané body. Tieto body boli zmerané pomocou GNSS s využitím služby SKPOS. Ďalšie referenčné dáta sme mali stereoskopicky zmerané body získané zo stereomodelov, ktoré sú vytvorené po vzájomnom usporiadaní snímok

v procese aerotriangulácie s odstránením vertikálnych paraláx. V poslednom rade sme daný digitálny model porovnali s digitálnym modelom reliéfu tretej generácie (Tab. 6). Vo všetkých prípadoch sme určili strednú kvadratickú chybu, ktorá predstavuje strednú výškovú chybu daného modelu. V rámci referenčných dát sme pomocou Q-Q kvantilových grafov odstránili vplyv hrubých odľahlých chýb a pomocou štatistických testov sme overovali prítomnosť systematickej chyby.

Nakoniec môžeme skonštatovať, že najlepšie výsledky overenia presnosti sme dosiahli pri použití geodetických dát, ale ich získanie je časovo a ekonomicky najviac náročné. Pri referenčných dátach získaných stereoskopicky narazíme na otázku manuálneho zberu priestorových bodov, na ktorú má výrazný vplyv operátor. Stereoskopický zber priestorových dát je pomerne efektívny z hľadiska dostačujúceho počtu bodov. Pri porovnávaní digitálneho modelu s digitálnym modelom reliéfu sme zaznamenali najväčšie výškové rozdiely, čo je možno v dôsledku spôsobu vytvorenia digitálneho modelu reliéfu tretej generácie.

Príspevok vznikol v rámci riešenia vedeckého projektu VEGA MŠ SR a SAV č. 1/0560/09 s názvom „Racionalizácia lesníckeho mapovania“ na Katedre hospodárskej úpravy lesov a geodézie Lesníckej fakulty TU vo Zvolene.

7 Zoznam referencií

Böhm, J. a kol. 1990. *Teórie chýb a vyrovnávací počet.* Praha : GKP Praha, 1990. s. 416. ISBN 80-7011-056-2.

Daniel, C., Tennant, K. 2001. DEM quality assessment. 1 st ed. *In: Maune, D.F. (Ed.), Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM User Manual.* 2001. s. 395-440. ISBN: 1-57083-064-9.

Fořt,J.-Janec,M. 2004. Srovnávaní přesnosti vojenskeho DMR a DEM vytvořeným z dat družice SPOT a jejich použiteľnost pro tvorbu ortofota. Praha : ČVUT Prraha, 2004.

Hofierka, J.- Šúri, M. 1998. Rastrové digitálne modely reliéfu. *In :GeoInfo.* Ostrava : Computer Press, 2/ 1998. s. 48-50.

Höhle, J. 2009. DEM generation using a digital large format frame camera. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.* January 2009. No.1, s. 87-93.

Höhle, J., Höhle, M. 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust. *In ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* s.l. : Elsevier B.V. All rights reserved, 2009. 64, s. 398-406.

Höhle, J., Potuckova, M. 2006. The EuroSDR test checking and improving of digital. *In EuroSDR Official Publication.* 2006. no. 51, s. 10-55. ISBN: 9789051794915.

Kardoš, M., Chudý, F. 2007. Posúdenie presnosti automatickej blokovej aerotriangulácie pri použití materiálov digitálneho snímkovania. *In: Aktuálne problémy lesníckeho mapovania : zborník referátov : sympózium s medzinárodnou účasťou.* Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2007. s. 19-29. ISBN 978-80-228-1809-4.

Kardoš, M., Chudý, F.. 2008. Problematika tvorby klasických a pravých digitálnych ortofotosnímok. *In: Lesnícka geodézia a fotogrametria - trendy : sympózium s medzinárodnou účasťou : zborník referátov.* Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2008. s. 101-111. ISBN 978-80-228-1949-7.

Linder, W. 2006. *Digital Photogrammetry : a Practical Course.* 2nd Edit. Berlin : Springer - Verlag, 2006. s. 214. ISBN 978-3-540-29152-7.
Šíma, J. 2002. Musíme používat pracovní slang při prezentacích a v publikacích o geografických informačních systémech? *In. sborník z konference GIS Ostrava 2002.* [Online] 2002. [Dátum: 12. 4 2008.] http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2002/Sbornik/Referaty/sima.htm.
Voženílek, V. a kol. 2001. *Integrace GPS/GIS v geomorfologickém výzkumu.* 1.vydanie. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, 2001. s. 185. ISBN 80-244-0383-8.
Zhang, B., Miller, S., Walker, S., DeVenecia, K. 2007. Next generation automatic terrain extraction using Microsoft Ultracam imagery. *Conference, ASPRS 2007 Anuual.* Tampa, Florida, 7-11. May 2007. s. 12.
Žíhlavník, Š. 2004. *Geodézia, fotogrametria a mapovanie v lesníctve.* Zvolen : Technická univerzita Zvolen, 2004. ISBN 80-228-1287-0.