



ODVODENIE 3-D MODELU POVRCHU KORÚN LESNÉHO PORASTU A DETEKCIA KORÚN STROMOV Z LETECKÝCH SNÍMOK S VYSOKÝM ROZLIŠENÍM

TOMÁŠ BUCHA¹, MIROSLAV JURIŠ², JOZEF VLADOVIČ¹

¹Národné lesnícke centrum - Lesnícky výskumný ústav Zvolen, T. G. Masaryka 22,
SK – 960 92 Zvolen, e-mail: bucha@nlcsk.org

²Národné lesnícke centrum - Ústav lesných zdrojov a informatiky Zvolen, Sokolská 2,
SK – 960 52 Zvolen

BUCHA T., JURIŠ M., VLADOVIČ J., 2011: Derivation of a 3-D forest canopy model and detection of tree crowns from high-resolution aerial photos. *Lesn. Čas. – Forestry Journal*, **57**(4): 225-236, 6 fig., tab. 5, ref. 20. Original paper. ISSN 0323 – 1046.

This paper presents our proposal of a methodology procedure aimed at derivation 3-D forest canopy model from aerial multi-spectral stereo photos with a high resolution. Digital model is derived from photos using methods of digital photogrammetry. Furthermore, we used this model to determine the tree tops. For this purpose we created a system of criteria based on mathematical and logical relations. Tree tops represent the number of trees in the forest stand. We examined the accuracy of this classification on 5 areas. Errors of automated classification compared to terrestrial measurements ranged from underestimation by 41 % to overestimation by 40%. It would require to incorporate a spectral information into the process of tree tops determination in order to improve the classification.

Key words: 3-D forest canopy model, digital photogrammetry, tree-top, aerial photos

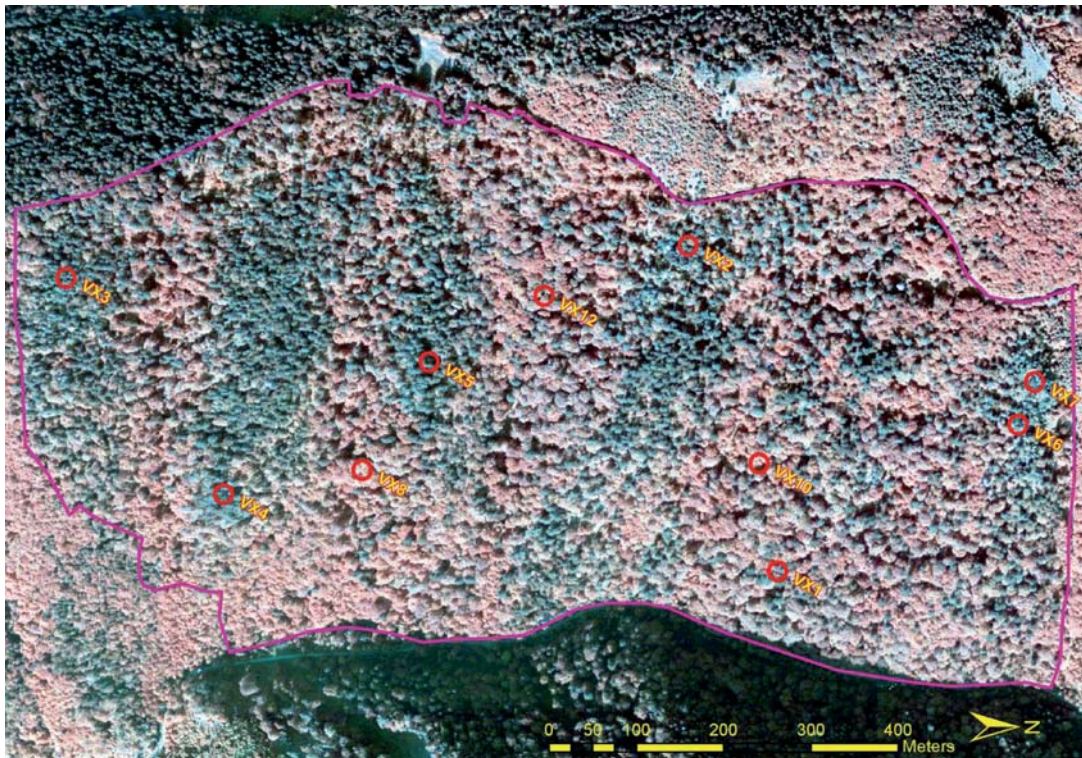
V práci prezentujeme návrh metodického postupu odvodu 3-D modelu povrchu korún lesného porastu z leteckých meračských multispektrálnych stereosnímkov s vysokým rozlíšením. Digitálny model odvodzujeme zo snímkov metódami digitálnej fotogrametrie. Následne sme model využili pri určení vrcholov stromov a vymedzení korún. K tomu sme vytvorili systém kritérií založený na matematicko-logických vzťahoch. Vrcholy stromov reprezentujú počet stromov v poraste. Správnosť klasifikácie sme preverili na 5 plochách. Chyby automatizovanej klasifikácie sa pohybovali od podhodnotenia o 41 % po nadhodnotenie o 40 % pri porovnaní s terestrickými meraniami. Spresnenie klasifikácie si vyžiada zapracovanie spektrálnych informácií do procesu ohraničenia korún stromov.

Kľúčové slova: 3-D model porastu, digitálna fotogrametria, koruna stromu, letecká snímka

1. Úvod a problematika

Zavedením digitálnej fotogrametrie ako rutínnej metódy na vyhodnotenie leteckých meračských snímkov do lesníckej praxe sa vytvorili predpoklady pre racionalizáciu mapovacích prác v lesníctve (ŽIHLAVNÍK *et al.* 2005, HALVOŇ 2008). Kvalitne pripravený stereoskopický model snímkov je základom pre odvodenie digitálneho modelu terénu (DMT), pre vytvorenie ortofotosnímkov a ortofotomáp a ďalších lesníckych aplikácií, akými sú určenie stromových a štruktúrnych porastových cha-

rakteristík. Príkladmi sú napríklad odvodenie výšok ADLER (2001) a ohraničenia korún stromov PITKÄNEN (2001), POULIOT *et al.* (2002), ŠUMBERA (2003), MAJLINGOVÁ (2007), MATĚJKA (2008). Uvedení autori vychádzali z predpokladu, že vrchol stromu je možné detekovať na základe najvyššej hodnoty jasu, to jest že vrchol koruny je najsvetlejší. Okraj koruny naopak predstavuje minimálna hodnota jasu. Pre spresnenie algoritmov sa zaviedli prahové hodnoty vo vzťahu k spektrálnym hodnotám odrazivosti snímky alebo limitná veľkosť



Obr. 1. Modelové územie Medvedia úboč s lokalizáciou výskumných plôch: CIR kompozícia na mozaike leteckých snímok z roku 2009. Kombinácia kanálov infračervený, červený a zelený kanál. Zrejmá je rozdielna textúra porastov, v závislosti od veku a spôsobu vzniku ako aj rozdielny spektrálny prejav ihličnatých a listnatých drevín. LS Predajná, Lomnistá dolina – lokalita Medvedia úboč

Fig. 1. Test area Medvedia úboč with localization of research plots: CIR composition on the mosaic of aerial photos from 2009. Combination of channels – infrared, red and green. Evident differences in forest stands texture, according to the age and origin as well as different spectral display of coniferous and broad-leaved tree species. LS Predajná, Lomnistá dolina – Locality of Medvedia úboč

priemeru koruny. RAWERT (2004), POONE *et al.* (2005), HIRSCHMUGL *et al.* (2007) využívajú stereosnímky na odvodenie digitálneho modelu povrchu porastu. Následne ho využívajú na vymedzenie korún jednotlivých stromov, a to v kombinácii s postupmi založenými na spektrálnych vlastnostiach snímok, na maximálnej a minimálnej odrazivosti na vrchole koruny a na okraji koruny. Ide o príklad syntézy poznatkov z oboru dvojsnímkovvej leteckej fotogrametrie a klasifikácie obrazu z oboru diaľkového prieskumu Zeme (DPZ). Nedoriešené ostáva polohové stotožnenie DMT a snímky. Napr. HIRSCHMUGL *et al.* (2007) to riešili vytvorením DMT zo snímok s pozdĺžnym prekrytom 90 %. WOLF & HEIPKE (2007) navrhli postup na automatizované ohraničenie korún stromov z ortorektifikovaných infračervených snímok v kombinácii s DMT založený na fuzzy logike a aproximácii koruny stromov elipsou.

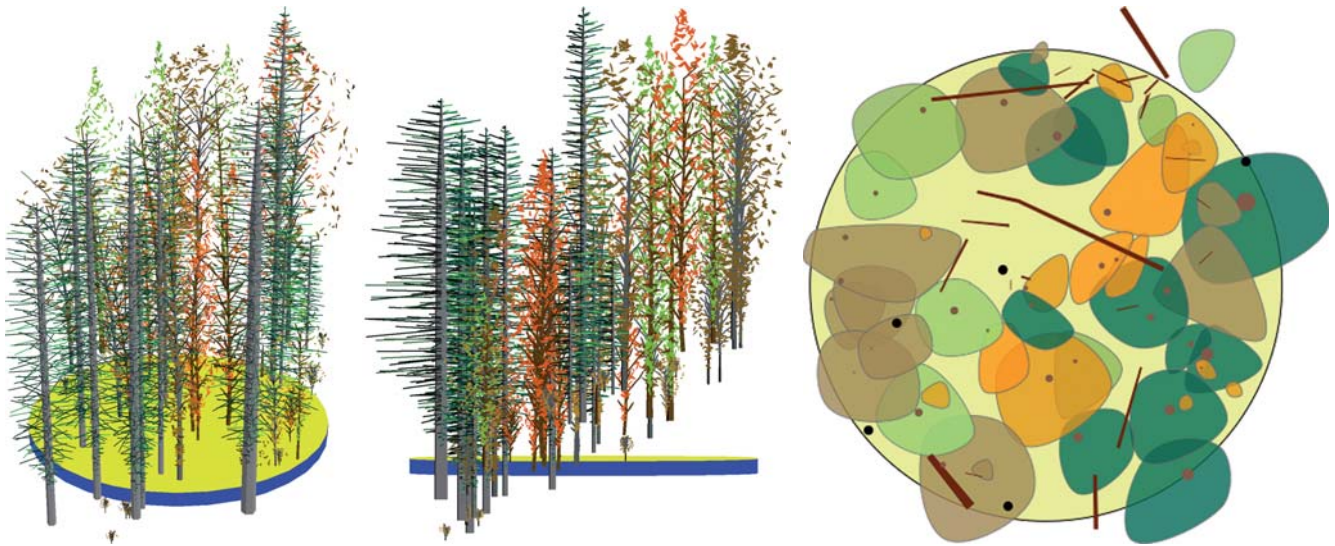
Z daného rozboru problematiky vyplýva, že s rozvojom technológií sa aj v lesníctve zvyšuje záujem o využitie celého potenciálu leteckých meračských snímok (LMS). Napriek tomuto úsilíu pre podmienky našich lesov nie sú vyvinuté prakticky realizovateľné metódy (algoritmy) pre automatizované zisťovanie stromových

a porastových taxačných veličín lesných porastov založené na kombinácii spektrálnych a geometrických vlastností korún stromov. V našej práci sa zaoberáme využitím digitálnych leteckých meračských multispektrálnych snímok (LMMS) s vysokým rozlíšením pri odvodení 3-D modelu povrchu korún porastu, z ktorého odvodzujeme prvky vnútornej štruktúry lesných porastov, a to vrcholy stromov a koruny stromov. Použitý prístup je založený na využití metód digitálnej fotogrametrie pri tvorbe 3-D modelu povrchu korún a matematicko-logických vzťahov pri určení vrcholov a vymedzení korún stromov. Cieľom je navrhnúť prakticky aplikovateľnú metódu na odvodenie uvedených prvkov výstavby porastov ako súčasť tematického mapovania a klasifikácie priestorovej štruktúry porastov.

2. Metodika a materiál

2.1. Základná charakteristika hodnoteného územia

Modelové územie Medvedia úboč sa nachádza v Lomnistej doline (obr. 1), v lesnej oblasti 46Ba *Nízke Tatry*, podoblast *Ďumbier, Prašivá*, časť *juh* (VLADOVIČ *et al.* 1994). Organizačne patrí do lesnej správy Predaj-



Obr. 2. Výskumná plocha VX 1 podrobne meraná technológiou FieldMap – vizualizácia jednotlivých stromov, projekcií korún, ležiaceho i stojaceho odumretého dreva, druhovej, vertikálnej a horizontálnej výstavbovej štruktúry drevinovej zložky
Fig. 2. Research plot VX 1 measured in detail with FieldMap technology – visualization of individual trees, projections of tree crowns, lying and standing dead-wood, species, vertical and horizontal structure of tree species composition

ná. Územie je charakteristické tým, že ide o zachovalý komplex prevažne prírodných lesov na stanovištiach v kategórii lesov ochranných s prevažujúcou funkciou ochrany pôdy. Výmera spracovaného územia je približne 100 ha a jeho prevažujúca časť sa stotožňuje s modelovou lokalitou, ktorá bola v r. 2009 a 2010 predmetom podrobného výskumu a tematického mapovania v rámci vedeckého projektu „Výskum metód klasifikácie a štruktúrnych modelov priaznivého stavu lesných ekosystémov Slovenska – Hodnotenie stavu a vývoja lesov v krajine s podporou DPZ“. Posudzované územie má priemerný sklon terénu 32°. Nadmorské výšky sa pohybujú od 684 do 1 054 m n. m. Podklad je tvorený metamorfovanými horninami, prevažujú migmatizované ortoruly a niekoľko ostrovov amfibolitov. Územie sa nachádza v jedľovo-bukovom vegetačnom stupni. Lokalita sa v rámci výskumu v uvedenom projekte podrobne typologicky zmapovala segmentovou metódou. Bola vyhotovená tiež podrobná litogeografická mapa. Prevažujúce skupiny lesných typov v zmysle geobioecologickej typizácie sú *Abieto-Fagetum* nst (33 %), *Fageto-Abietum* nst (27 %), *Fageto-Aceretum* nst (26 %), *Fraxineto-Aceretum* nst (12 %). V každom segmente sa zaznamenal aj aktuálny stav drevinovej zložky na úrovni súborov porastových typov (SPT). Prevažujúce SPT sú jedľové bučiny (51 %), porasty jedle s listnáčmi (22 %), bučiny s cennými listnáčmi (14 %), cenné listnáče a ich zmesi (7 %), smrekovo-bukové jedliny (6 %).

V rámci citovaného projektu sa v modelovej lokalite založilo 10 trvalých výskumných plôch kruhového tvaru so štandardizovanou výmerou 1 000 m². GPS metódou boli zamerané stredy plôch, technológiou FieldMap pozície jednotlivých stromov na ploche. Zamerané boli

priemety korún stromov, výška nasadenia koruny, hrúbka $d_{1,3}$ a výšky stromov. Výskumné plochy sa zakladali ako reprezentatívne pre plošne prevažujúce štruktúrne typy posudzovaného územia. Plochy sú vizualizované v prostredí ArcGIS a v systéme Stand Visualisation System (SVS) (obr. 2). V našej práci sme 5 plôch využili pri overení správnosti klasifikácií počtu stromov z LMMS.

2.2. Letecké snímkovanie a spracovanie snímok

Letecké snímkovanie sa realizovalo v rámci obnovy LHP na lesných celkoch v obvode LS Predajná. Parametre snímkovania sú uvedené v tabuľke 1. Organizačné a administratívne práce ako aj všetky náležitosti leteckého meračského snímkovania zabezpečila firma Photomap, s. r. o., Košice. Samotné snímkovanie realizovala firma ARGUS GEO SYSTÉM, s. r. o., Hradec Králové v dňoch 1. 9. 2008 a 22. – 23. 7. 2009 digitálnou kamerou Vexcel Ultracam X v 4 pásmach, a to modrom, zelenom, červenom a infračervenom. Dodané snímky boli rádiometricky upravené, s multispektrálnymi kanálmi prevzorkovanými na priestorové rozlíšenie panchromatického kanála.

2.3. Podkladové materiály

Využili sme lesnícke porastové mapy záujmového územia mierky 1 : 10 000 so stavom k roku 2000. Údaje o porastových charakteristikách jednotlivých jednotiek priestorového rozdelenia lesa (JPRL) sme získali z lesného hospodárskeho plánu (LHP) z opisu porastov pre Lesný celok (LC) Lesy Jasenie. Obnova LHP sa uskutočnila v roku 2000. Údaje z LHP slúžili ako podporné údaje pre spracovanie a vyhodnotenie leteckých snímok. Digitálny model reliéfu (DMR) sme získali cez mapovú

Tabuľka 1. Parametre leteckého snímkovania
Table 1. Flight parameters

Meno lokality ¹⁾	Chabenec
Mierka snímkovania ²⁾	1 : 27 600, resp. ³⁾ 1 : 30 358 pre rok ⁴⁾ 2009
Prekryt pozdĺžny ⁵⁾ p	60 %
Prekryt priečny ⁶⁾ q	20 %
Dátum snímkovania ⁷⁾	1. 9. 2008; 22. 7. 2009 (23. 7. 2009)
Hodina snímkovania ⁸⁾	12,20 – 13,51; 10,45 – 11,32 h (8,40 – 8,50 h)
Konštanta fotokomory ⁹⁾ (mm)	100,5
Snímkový formát ¹⁰⁾	14 430 × 9 420 pixelov
Typ fotokomory ¹¹⁾	UltraCam X – digitálna multispektrálna kamera ¹²⁾
Priestorové rozlíšenie ¹³⁾	20 × 20 cm
Rádiometrické rozlíšenie ¹⁴⁾	modrý – zelený – červený – blízky infračervený kanál. Úroveň spracovania 3 ¹⁵⁾
Filter ¹⁶⁾	bez filtra ¹⁷⁾
Plocha analyzovaného úze- mia Medvedia úboč ¹⁸⁾	100 ha

¹⁾Locality, ²⁾Scale of aerial photography, ³⁾Or, ⁴⁾For, ⁵⁾Longitudinal overlap, ⁶⁾Cross overlap, ⁷⁾Date of aerial photography, ⁸⁾Hour of aerial photography, ⁹⁾Camera constant, ¹⁰⁾Image format, ¹¹⁾Camera type, ¹²⁾Digital multi-spectral camera, ¹³⁾Spatial resolution, ¹⁴⁾Radiometric resolution, ¹⁵⁾Blue – green – red – near infrared channel. Level of processing 3, ¹⁶⁾Filter, ¹⁷⁾Without filter, ¹⁸⁾Analyzed area of Medvedia úboč

službu Geodetického a kartografického ústavu. DMR je odvodený z výškopisu základnej mapy SR v mierke 1:10 000.

Všetky údaje boli polohovo zjednotené v systéme JTSK. Získané údaje využívame ako referenčné k údajom odvodeným z leteckých snímkov.

2.4. Metodika vyhodnotenia snímkov

Základnou úlohou je vytvorenie digitálneho modelu terénu. V práci rozlišujeme termín digitálny model reliéfu (DMR) a digitálny model terénu (DMT). Termín DMR ponímame v zmysle KRCHA (1990), ktorý definuje reliéf Zeme ako pevné, ale pritom dynamické rozhranie medzi litosférou, resp. pedosférou, na jednej strane a atmosférou, resp. hydroférou na strane druhej. Termín DMT zahŕňa DMR vrátane vegetácie, budov či iných technických prvkov. Termín digitálny model povrchu korún lesného porastu je v našej práci synonymom termínu DMT. V oboch prípadoch DMR aj DMT ide o modelovo odvodené rozhranie v počítačovom prostredí.

Postup odvodenia DMT a vymedzenia korún stromov pozostáva z krokov uvedených na obrázku 3.

Príprava projektu: aerotriangulácia, interná a externá orientácia snímkov

Prípravu projektu, aerotrianguláciu, internú a externú orientáciu snímkov ako aj ortorektifikáciu snímkov vykonalo pracovisko diaľkového prieskumu Zeme a kartografie NLC-ÚLZI Zvolen na pracovnej stanici Image Station. Správnosť aerotriangulácie (ŠMELKO *et al.* 2003) vyjadrená strednou polohovou súradnicovou chybou m_{xy} bola ~ 0,5 m. Pri transformácii jednotlivých snímkov do systému JTSK (ortorektifikácii) sa dosiahla stredná polohová chyba m_{xy} ~ 1 m. Uvedené výsledky sú na hornej hranici, resp. prekračujú kritériá piatej triedy presnosti (STN 01 3410). Pre potreby tematického mapovania prvkov porastovej výstavby však plne postačujú. Parametre jednotlivých operácií boli uložené do projektu. Samotné vyhodnotenie snímkov sme vykonali na fotogrametrickej stanici v softvéri PhoTopoL v. 9.0.2, do ktorého sme cez funkcionality importu načítali projekt z Image station so všetkými potrebnými parametrami.

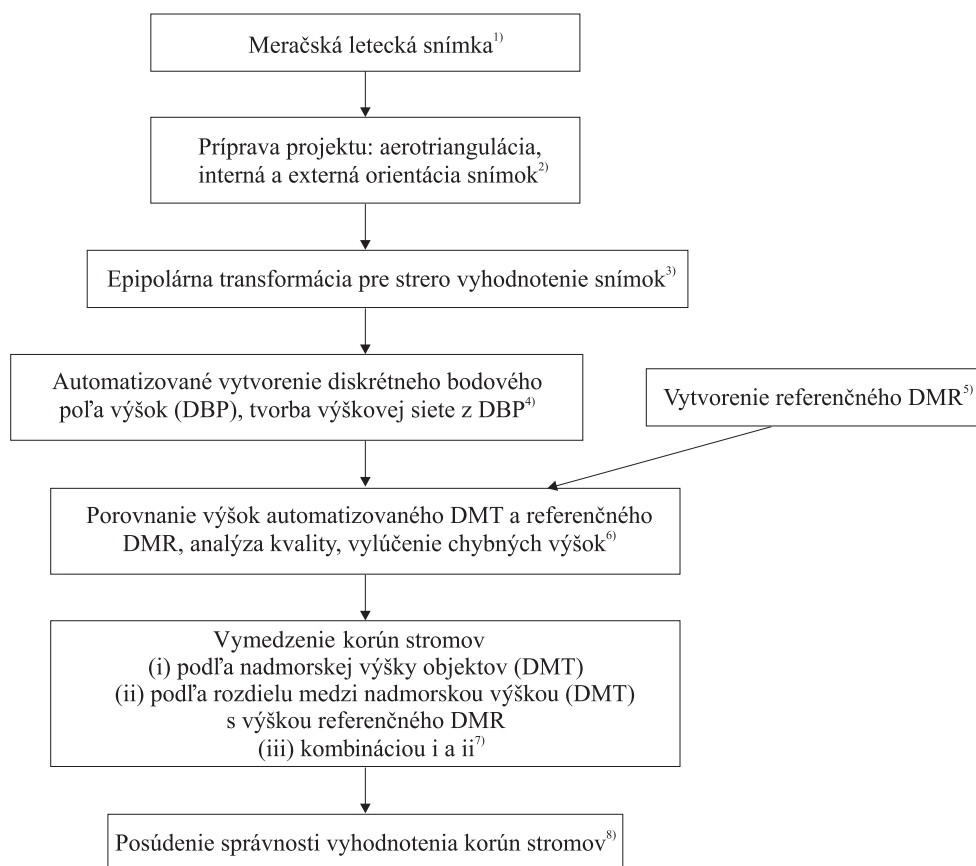
Epipolárna transformácia pre stereo vyhodnotenie snímkov

Po vykonaní internej a externej orientácie snímkov v prostredí PhoTopoL podľa parametrov z importovaného projektu sme vykonali epipolárnu transformáciu snímkov. Ide o transformáciu snímkov, v ktorej sa identické body na snímkach umiestnia do jedného riadku. Tým sa odstráni vertikálna paralaxa. Rozdiel v umiestnení identických bodov v smere x-ovej osi snímkov zodpovedá horizontálnej paralaxe.

Automatizované vytvorenie siete výškopisných bodov a DMT

Pre získanie bodov pre DMT sme použili funkcionality PhoTopoL na automatickú tvorbu DMT zo stereo dvojice snímkov. Zo snímkov sme vybrali územie o výmere asi 100 ha v lokalite Medvedia úboč. Výstupom funkcionality pre automatickú tvorbu DMT je súbor bodov – diskretné bodové pole výšok (DBP), ku ktorým je v zvolenej súradnicovej sústave pripojená výšková súradnica Z. Kvalitu odvodeného DMT ovplyvňuje nastavenie viacerých parametrov:

- krok mriežky, pri „dospelých“ porastoch sa osvedčila veľkosť 2 × 2 m,
- okolie záujmu bodu mriežky, najlepšie výsledky sme dosiahli s hodnotou 10 × 10 pixelov,
- filtrácia bodov odvodeného DMT. Využili sme preddefinované hodnoty korelačného koeficientu (0,15), minimálnej vzdialenosti lúčov (6,0) a rozdielu výšok menej ako 40 m. Parameter „rozdiel výšok“ sleduje nadmorskú výšku bodov a ak sa niektorý odliší od susedov o viac ako povolenú hodnotu z výstupu je vylúčený. Týmto spôsobom sme eliminovali chybné vypočítané výšky DBP. Ich výskyt je v podmienkach tvorby DMT v lesnom poraste vysoký.



Obr. 3. Postup tvorby DMT a vymedzenia korún stromov z leteckých meračských snímok
Fig. 3. Creation of DMT and determination of tree crowns from aerial photos

Pri výpočte výšok je potrebné poznať veľkosti horizontálnych a vertikálnych paraláx. PhoTopoL pre zjednodušenie výpočtu pracuje s epipolárnymi projekciami, pričom na vyhľadávanie zodpovedajúcich si objektov na dvoch susedných stereosnímokach je využitá metóda tzv. plošne založeného párovania (Area based correlation matching). Metóda je založená na korelácii hodnôt jasú identických objektov. Výstupom z automatickej tvorby DMT je súbor bodov s výškovou súradnicou, ktorá zodpovedá nadmorskej výške povrchu korún porastu.

Vytvorenie referenčného DMR a odvodenie výšky porastu

V modelovom území sa lesné porasty nachádzajú vo výrazne sklonitom teréne (priemerný sklonom svahu je 32°). Pre vyhodnotenie výškovej diferenciácie korún stromov je preto nutné eliminovať nadmorskú výšku reliéfu. Rozdiel medzi DMT a DMR nám potom určuje výšku stromu, resp. výšku objektu v každom obraze prvku na snímke. Ide o jednoduchý matematický úkon, ktorého praktická realizácia je však veľmi problematická. Dôvodom je nepoznaná nadmorská výška reliéfu. Praktické odvodenie digitálneho modelu reliéfu v lesných porastoch je práčne, ak aj metóda existuje, pod korunami stromov spravidla zlyháva, napr. laser

scanové metódy. V našom riešení vytvárame referenčnú plochu z vrstevníc základnej mapy mierky 1 : 10 000. Ide o zjednodušené riešenie z hľadiska geometrickej presnosti, avšak pre potreby určenia výstavby porastu ho považujeme za postačujúce.

Jednoduchým matematickým výpočtom, rozdielom nadmorských výšok DMT a referenčného DMR získame výšku objektu (HVR): $HVR = DMT - DMR$.

Touto operáciou eliminujeme vplyv sklonu reliéfu na súradnicu výškopisného bodu Z. Týmto sa jednotlivé výškové body dostanú do vzájomne porovnateľnej výškovej pozície, kde porovnávacia rovina má hodnotu 0. V ďalšom ju nazývame virtuálna rovina. Modelovo je situácia zobrazená na obrázku 4.

Z frekvenčného histogramu zastúpenia výšok HVR na celom záujmovom území vyplýva, že najpočetnejšou skupinou DBP sú body s výškou od 14 do 32 m. Z výpočtov sme ako chyby vylúčili body s extrémnymi hodnotami, v našom prípade išlo o body s hodnotami mimo intervalu -10 m až 50 m. Z hľadiska ďalšieho využitia údajov pri identifikácii korún stromov majú väčší význam body na hornej hranici intervalu. Tieto body majú väčší predpoklad stať sa vrcholom stromu, jadrom entity stromu.

Priradenie plochy k jednotlivým výškovým bodom

Z bodového poľa výšok prostredníctvom funkcionalitu PhoTopoL „Vytvorenie oblasti z bodov“ sme vytvorili uholníkovú sieť, t. j. automatizovane sa priradila oblasť ku každému výškovému bodu, ktorý sme v predchádzajúcich krokoch odvodili a ktorý prešiel stanovenými kritériami kvality. Výhodou tohto prístupu je, že medzi pôvodnými výškovými bodmi vznikajú topologické a geometrické vzťahy (susedí, nesusedí, vyšší, nižší...), ktoré je možné kvantifikovať a analyzovať. Vzhľadom k tomu, že výškové body nie sú vytvorené v pravidelnej sieti, sú vytvorené plochy nepravidelného tvaru a rôznych veľkostí. Veľkosť tejto plochy je daná hustotou získaného výškového bodového poľa a algoritmom použitého softvéru.

3. Výsledky

3.1. Vymedzenie korún stromov

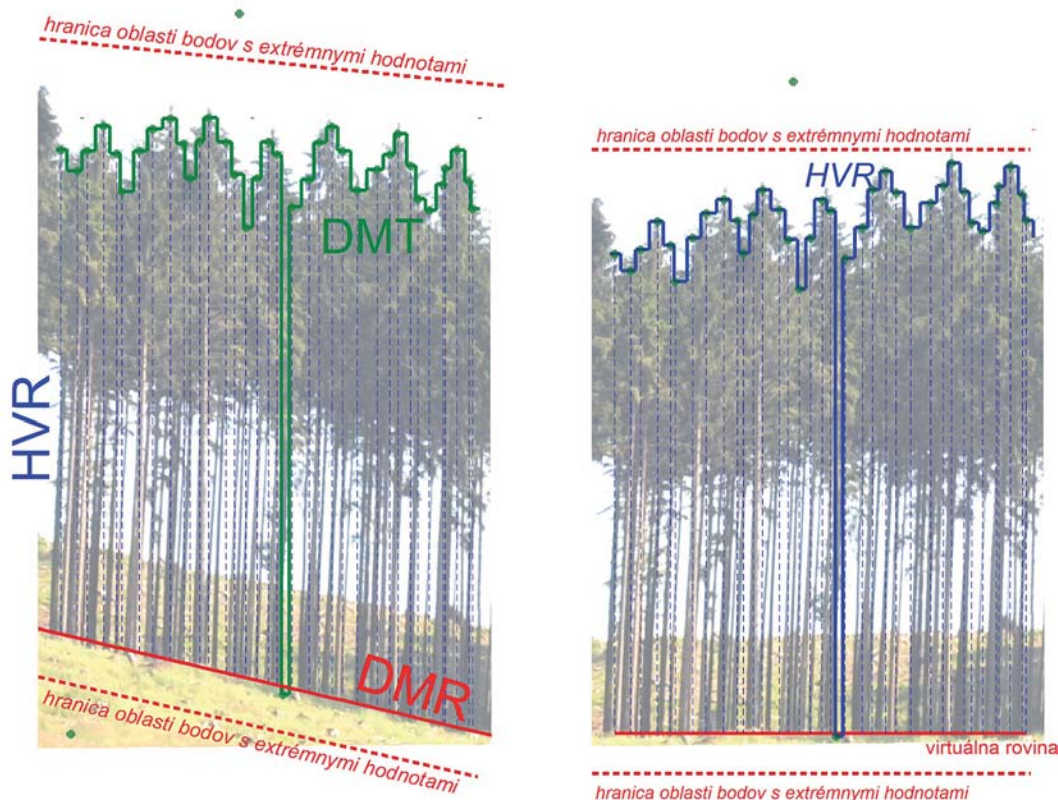
Vymedzenie korún strom sme založili na využití topologických vzťahov na vytvorenej sieti DMT a formulovaní matematicko-logických kritérií odvodených z poznatkov o veľkosti a tvare koruny stromu.

Pri určení vrcholu stromu v skupine plôch sme preverili dva varianty. V prvom variante vychádzame pri určení vrcholu v skupine plôch z DMT s absolútnymi nadmorskými výškami (obr. 5 vľavo). Vrcholom je vzťažný bod plochy (ťažisko plochy), ktorej n.m.v. je vyššia ako n.m.v. susedných plôch. Ak sa vedľa seba nachádzajú dve alebo viac vrcholových plôch, tieto sa agregujú a vzťažný bod novej (zlúčenej) plochy sa stáva vrcholom.

V druhom variante sme pri určení vrcholu stromu metodicky postupovali totožne, avšak namiesto nadmorskej výšky DMT sme použili rozdiel výšok HVR vypočítaný podľa vzťahu: $HVR = DMT - DMR$. Vstupná vrstva je zobrazená na obrázku 5 vpravo.

Pre zistenie plôch, ktoré sú výškovo dominantné a je predpoklad, že budú zodpovedať vrcholcom stromov boli napísané aplikačné formuláre v internom jazyku PhoTopoL, v jazyku Topas.

V ďalšom kroku sme priradili k vrcholu širšiu oblasť – entitu. Pod entitou rozumieme skupinu plôch prislúchajúcu k jednému vrcholu. V ideálnom prípade by každá entita mala predstavovať korunu jedného stromu v poraste. Pre priblíženie sa k tomuto ideálnemu prípadu sme vytvorili systém kritérií, na základe ktorých priradíme jednotlivé plochy k entite:



Obr. 4. Na obrázku vľavo je zobrazený reálny stav porastu. Na obrázku vpravo je zobrazená situácia po prepočítaní súradnice Z vzhľadom k virtuálnej rovine ($HVR = DMT - DMR$)

Fig. 4. Picture shows a real condition of the forest stand on the left. On the right side it shows the situation after recalculation of Z coordinates relative to the virtual plane ($HVR = DMT - DMR$)

- nadmorská výška plochy je nižšia ako vrchol,
- testovaná plocha vo vzťahu k vrcholu leží na pomyselnéj línii, tvorenej vzťažnými bodmi plôch ležiacimi medzi testovanou plochou a zisteným vrcholom. Nadmorská výška tejto línii systematicky klesá (povolená malá tolerancia na stúpanie) smerom od vrcholu k testovanej ploche,
- plocha ešte nebola zaradená do inej entity,
- vzťažný bod plochy je k danému vrcholu bližšie ako je limita (max. predpokladaná šírka koruny/2),
- rozdiel medzi n.m.v. plôch je nižší ako stanovená prahová hodnota.

Graficky je uvedený postup zobrazený na obrázku 6.

Limita (maximálna očakávaná šírka koruny) je definovaná ako polovica priemeru koruny najkošatejšieho stromu v skúmanej oblasti. Žiadna entita získaná vyhodnotením údajov preto nemôže mať väčší polomer. Z praktického hľadiska postačí kvalifikovaný odhad priemeru plošne najväčších stromov v stereo móde PhoTopoL.

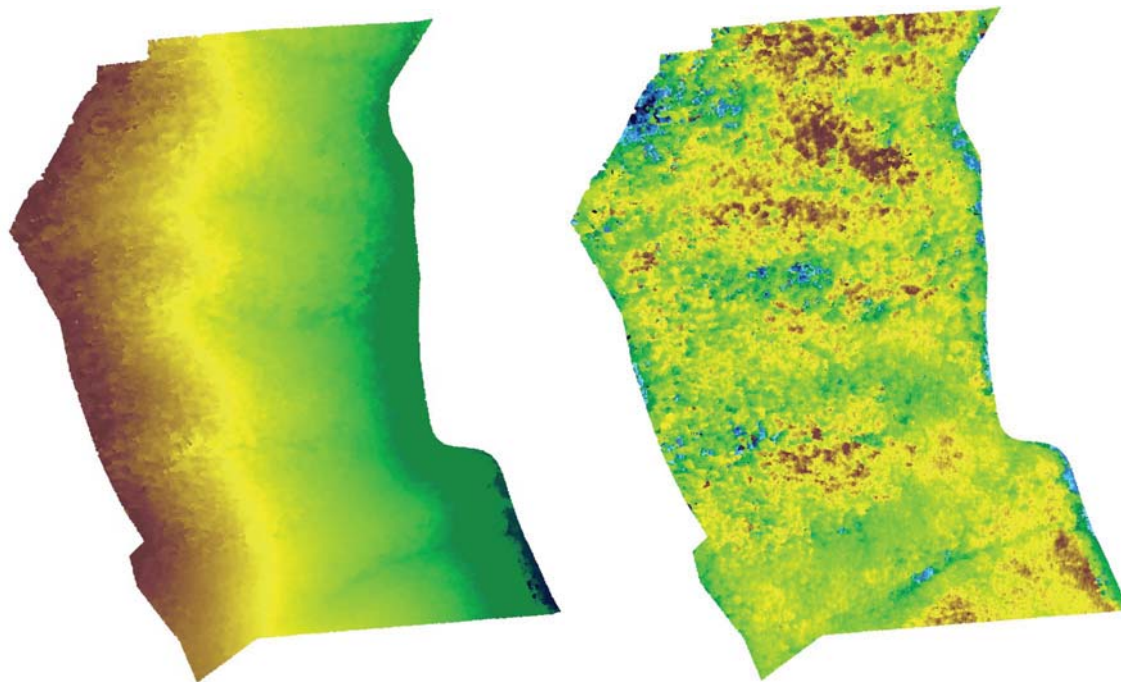
V poslednom kroku algoritmu vymedzenia korún stromov sme spojili výsledky oboch variant rozlíšenia korún do jedného výstupu. Vychádzame pritom z empiricky zistenej skutočnosti, že vrcholy zistené na základe

analýzy DMT sú menej početné ale spoľahlivejšie ako vrcholy zistené analýzou vrstvy DMR. Preto berieme entity z DMT ako základ konečného výstupu. Pri určení vrcholu stromu môžu nastať tieto situácie:

- a) patrí do entity odvodenéj z DMT,
- b) patrí súčasne do entity odvodenéj z DMT ako aj DMR (v ideálnom prípade tzv. prekryv korún),
- c) patrí do entity pôvodom z DMR,
- d) plôšku sa nepodarilo priradiť k žiadnemu vrcholu (v ideálnom prípade tzv. redukovaná holina).

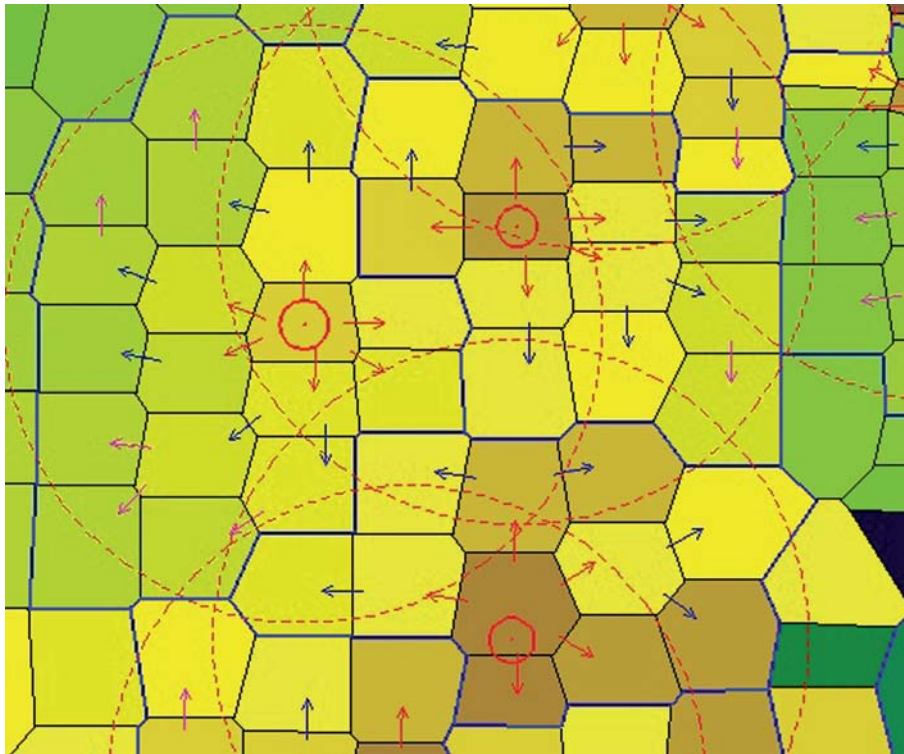
Za pevne stanovený vrchol koruny stromu považujeme výstup z prvého kroku odvodený z DMT. Do výstupu sa ďalej zahrnú tie entity z druhého kroku, ktorých jedinečnosť vo vzťahu k entitám z DMT nie je spochybnená. Pre vylúčenie duplicitného evidovania entít (korún stromov) sme stanovili prahovú hodnotu – limitu v hodnote max. veľkosť korún/2 (polomer koruny). V prípade porastov na našom modelovom území ide o hodnotu 5 m. To znamená, že algoritmus neprevezmeme do výstupu entitu z DMR, ktorej vrchol leží bližšie ako 5 m k vrcholu entity pôvodom z DMT. V týchto prípadoch predpokladáme, že vrcholy zobrazujú ten istý objekt (strom). Konečný výstup obsahuje tieto objekty:

- a) vrcholy (body) zistené na základe DMT,
- b) vrcholy (body) zistené na základe DMR plôšky po



Obr. 5. Vľavo: Digitálny model povrchu korún z modelového územia Medvedia úboč. Kolorovanie plôch podľa nadmorskej výšky povrchu korún porastu od zelenej po hnedú (najvyššia nadmorská výška). Vpravo: Výšky stromov v poraste vypočítané z rozdielu DMT a DMR. Kolorovanie plôch podľa výšky povrchu korún porastu od najnižšej (modrá) po hnedú (nadúrovňové stromy). Modré hodnoty HVR < 0, HVR > 0 škála od zelenej po tmavohnedú

Fig. 5. Left: A digital model of the of forest canopy in the research area of Medvedia úboč. Coloring the areas by altitude of the tree tops in a forest stand from green to brown (highest altitude). Right: Height of trees in the forest stand calculated from the difference between DMT and DMR. Coloring the areas by heights of the tree tops from the lowest (blue) to brown (dominant trees). Blue values HVR < 0, HVR > 0 range from green to darkbrown



Obr. 6. Priradovanie plôch k entite. Plôška s kruhom reprezentuje vrchol stromu. Entita sa rozširuje postupným priberaním nižších a ešte neobsadených plôch, pokiaľ nie je zastavená niektorou z limitných (prahových hodnôt). Limita max. šírky korony je vyznačená na obrázku kružnicami (čiarkovane). Jednotlivé plôšky sú priradované po etapách. Etapa prebehne naraz pre všetky entity. Na obrázku etapu 1 znázorňuje červená šípka, 2. etapu modrá, šípky ďalších etáp sú ružové

Fig. 6. Assigning areas to the entity. Area with a circle represents the tree top. Entity extends gradually by taking the lower and free areas, unless it is terminated by one of the limits (threshold value). Limit of the maximum crown width is marked with dash circles in the figure. Individual areas are assigned in stages. One stage takes place once for all entities. Figure 1 shows 1. stage with a red arrow, 2. stage with blue, other phases with pink arrow

- testovaní jedinečnosti vrcholu stromu (limita 1/2 veľkosti korony),
- c) línie reprezentujúce obvod korún stromov.

3.2. Vyhodnotenie správnosti vymedzenia korún stromov

Správnosť vymedzenia korún sme overili na 5 plochách, na ktorých sme vykonali podrobné terestrické šetrenia a merania. Po zameraní pozícií stromov na ploche boli stromy zaradené podľa ich výškového postavenia do 4 tried v zmysle ZLATNÍKA (1976). Prehľad zastúpenia jednotlivých tried udáva tabuľka 2. Z hľadiska drevinového zloženia ide na plochách VX1, VX4 a VX5 o zmiešané porasty buka s jedľou. Na ploche VX3 prevláda v zastúpení jedľa s primiešaným bukom a smrekom, na ploche VX8 dominujú listnaté dreviny, zastúpené sú buk, jaseň štíhly, javor horský a javor mliečny, vtrúsená je jedľa.

Na všetkých 5 plochách ide o viacvrstvové porasty. V ďalšom sú vyhodnocované len stromy výškového postavenia 1 a 2, t. j. nadúrovňové a úrovňové stromy. Stromy podúrovňové (výškové postavenie 3 a 4) je možné pri prehustlom a ani pri uvoľnenom zápoji z leteckých snímok identifikovať. Uvedené konštatovanie je založené

na vizuálnom určení stromov na obrazovke monitora v 3-D zobrazení a porovnaní týchto výsledkov s terestricky zisteným počtom stromov na plochách (tab. 3).

Pre porovnanie terestrických meraní s výsledkami odvodenými zo snímok bolo potrebné čo najpresnejšie polohovo zosúladiť jednotlivé plochy na úrovni stotožnenia jednotlivých stromov. Stotožnenie sa vykonalo na základe vizuálneho posúdenia vzájomného posunu na obrazovke monitora, kde sme položili polygónovú vrstvu priemetu korún stromov na stereo model leteckej snímky. Veľkosť posunu v teréne zameraných plôch vzhľadom k snímke sa pohybovala od 4,2 m pri ploche VX4 po 7,5 m pri ploche VX5.

Z výsledkov v tabuľke 3 vyplýva dobrá zhoda medzi terestrickým a operátorom na 3-D modeli odvodeným počtom stromov na plochách č. VX1, VX3 a VX4. Chyba určenia počtu stromov sa pohybuje o 0 do +10 %, čo znamená, že operátor počet stromov nadhodnotil. Na plochách VX5 a VX8 operátor počet stromov podhodnotil o 22 %, resp. o 20 %.

V tabuľke 4 sú porovnané automatizovane vymedzené korony s terestrickými meraniami na uvedených 5 plochách. Automatizovaná klasifikácia na plochách

VX1, VX3, VX4 a VX5 viedla k podhodnoteniu počtu stromov na plochách od 14 do 41 %. Opačný výsledok, nadhodnotenie o 40 % sme dosiahli na ploche VX8. Ide o plochu s takmer 100 % zastúpením listnatých drevín. Podľa výsledkov v tabuľke 3 pri uvedenej ploche operátor naopak počet stromov podhodnotil. To potvrdzuje poznatky z literatúry (KOCH *et al.* 2006) na problémy určenia korún stromov v listnatých zapojených porastoch.

Výsledky publikované v tabuľkách 3 a 4 poukazujú na to, že tak operátor na 3-D modeli ako aj automatizovaná klasifikácia stromov v priemere podhodnocujú počet stromov oproti referenčnému terestrickému zisťovaniu. Veľkosť podhodnotenia o -5 %, resp. -15 % za všetky plochy spolu poukazuje na možné využitie prezentovaných prístupov pri odvodení porastových charakteristík (počtu stromov v poraste). Menšie podhodnotenie ako aj menšie variačné rozpätie od -22 % do +10 % bolo dosiah-

Tabuľka 2. Zaradenie stromov na výskumných plochách podľa ich výškového postavenia (ZLATNÍK 1976)

Table 2. Categorization of tree on research areas according to their height position (ZLATNÍK 1976)

Plocha č. ¹⁾	Terestrické merania: počet stromov s výškovým postavením ²⁾						Priemerná výška ⁴⁾ 1+2
	1	2	3	4	Spolu ³⁾	Spolu ³⁾ 1+2	
VX1	11	10	8	16	45	21	34,5
VX3	5	22	14	28	69	27	26,1
VX4	3	16	23	26	68	19	30,4
VX5	7	16	14	81	118	23	31,2
VX8	6	14	8	18	46	20	33
Spolu ³⁾	32	78	67	169	346	110	31,04

¹⁾Plot code, ²⁾Terrestrial measurement (number of trees and height status), ³⁾Total, ⁴⁾Average height 1+2

Tabuľka 3. Porovnanie terestricky zistených a operátorom určených korún stromov na 5 plochách

Table 3. Comparison of terrestrially determined tree tops and tree tops detected by operator on 5 areas

Plocha ¹⁾	Terestrické meranie (počet stromov) ²⁾	Operátor na 3-D modeli ³⁾	Rozdiel ⁴⁾	Chyba v % ⁵⁾
VX1	21	23	+2	+10
VX3	27	28	+1	+4
VX4	19	19	0	0
VX5	23	18	-5	-22
VX8	20	16	-4	-20
Spolu ⁶⁾	110	104	-4	-5

+ chyba nadhodnotenia – Error of overestimation, - chyba podhodnotenia – error of underestimation

¹⁾Plot code, ²⁾Terrestrial measurement (number of trees), ³⁾Operator of 3D model, ⁴⁾Difference, ⁵⁾Errors in %, ⁶⁾Together

Tabuľka 4. Porovnanie terestricky zistených a automatizovane vymedzených korún na 5 plochách

Table 4. Comparison of terrestrially determined tree tops and automatically detected tree tops on 5 areas

Plocha ¹⁾	Terestrické meranie (počet stromov) ²⁾	Automatizovaná klasifikácia ³⁾	Rozdiel ⁴⁾	Chyba v % ⁵⁾
VX1	21	18	-3	-14
VX3	27	16	-11	-41
VX4	19	16	-3	-16
VX5	23	16	-7	-30
VX8	20	28	+8	+40
Spolu ⁶⁾	110	94	-16	-15

+ chyba nadhodnotenia – Error of overestimation, - chyba podhodnotenia – error of underestimation.

¹⁾Plot code, ²⁾Terrestrial measurement (number of trees), ³⁾Automated classification, ⁴⁾Difference, ⁵⁾Errors in %, ⁶⁾Together

Tabuľka 5. Porovnanie automatizovane klasifikovaných a operátorom vymedzených korún, ktoré bolo možné polohovo jednoznačne stotožniť

Table 5. Comparison of automatically determined tree tops and tree tops detected by operator, that can be exactly identified in a position

Plocha ¹⁾	Operátor na 3-D modeli ²⁾	Automatizovaná klasifikácia / z toho stotožnených ³⁾	Správnosť klasifikácie pre prípad stotožnených stromov (%) ⁴⁾
VX1	23	18/14	61
VX3	28	16/9	32
VX4	19	16/12	63
VX5	18	16/10	56
VX8	16	28/11	69
Spolu ⁵⁾	104	94/56	54

¹⁾Plot code, ²⁾Operator of 3D model, ³⁾Automated classification/from that clearly assigned to the reference trees, ⁴⁾Classification accuracy for a case of clearly assigned trees, ⁵⁾Together

nuté pri vizuálnom určení korún stromov operátorom na 3-D snímky. Veľké variačné rozpätie od -41 % do +40 % v prípade automatizovanej klasifikácie poukazuje na potrebu spresnenia algoritmu vymedzenia korún alebo nastavenia parametrov algoritmu podľa stavových parametrov porastu (vek, drevinové zloženie).

Pri uvedenom vyhodnotení správnosti určenia korún stromov nebolo brané v úvahu polohové stotožnenie stromov na analyzovaných plochách. Porovnané boli len počty stromov, čo môže viesť k nadhodnoteniu správnosti ich určenia. Pre posúdenie veľkosti nadhodnotenia sme vykonali klasifikáciu správnosti len na stotožnených stromoch. Postup sme založili na porovnaní korún stromov určených automatizovanou klasifikáciou a tými korunami, ktoré operátor vizuálne vymedzil a následne stotožnil s klasifikáciou na 3-D modeli na obrazovke monitora. Výsledky sumarizujeme v tabuľke 5.

Z výsledkov vyplýva, že percento stotožnených stromov sa pohybuje od 32 do 69 %, v priemere za všetky plochy 54 %. Ide o výsledok, ktorý nepovažujeme za dostatočný pre uplatnenie postupu v hospodársko-úpravnickej praxi. Poukazuje na potrebu podstatnejšieho dopracovania navrhnutého algoritmu vymedzenia korún. Treba poznamenať, že proces polohového stotožnenia korún zameraných terestricky s korunami na snímke je závislý od rozhodnutia operátora, od jeho vyhodnotenia a eliminácie vzájomných posunov vyplývajúcich z chýb zamerania plochy a stromov, presnosti fotogrametrického modelu, naklonenia stromu, viditeľnosti koruny atď.

4. Diskusia

Náš experiment potvrdzuje, že vývoj algoritmov v oblasti spracovania a klasifikácie leteckých snímok vedie k postupnému zvyšovaniu presnosti a správnosti odvodenia stromových a porastových veličín. Kým MALLINGER (1997 in KOCH 2006) konštatoval, že 3-D model povrchu korún je nepresný a preto nevhodný pre odvodenie stromových a porastových charakteris-

tík lesných porastov, ADLER (2001) už dosiahla 45 % správnosť automatickej identifikácie korún stromov v ihličnatých porastoch. Problémom bola predovšetkým veľká spektrálna rozdielnosť osvetlenej a zatienenej časti koruny. WASER *et al.* (2006) dosiahli 74 % správnosť určenia jednotlivých stromov z CIR snímok v kombinácii s lidarovými údajmi. MAJLINGOVÁ (2007) pri využití infračervených snímok dosiahla správnosť klasifikácie 71 % v počte vymedzených stromov, resp. 55 % v počte stromov jednoznačne stotožnených s referenčnými stromami. KOCH *et al.* (2006) využili pre ohraničenie korún 3-D model povrchu korún odvodený z lidarových údajov. Pri poraste douglasky tisolistej zo 49 stromov určili automatizovane 47, z čoho až 87,3 % jednoznačne stotožnili s pozemnými šetreniami. Pri listnatých porastoch (hrab obyčajný, javor horský, jaseň štíhly zo 49 stromov automatizovane vymedzili 30 a z nich bolo možné len polovicu (50 %) jednoznačne prisúdiť k referenčným stromom zameraným terestricky. V porovnaní s fotogrametrickým určením referenčných stromov bolo jednoznačne stotožnených 61,7 % automatizovane vymedzených korún. Autori konštatujú, že pri zapojených listnatých porastoch navyše výskovo homogénnych algoritmus separácie korún stromov zlyháva. Túto skutočnosť potvrdzuje aj náš výsledok na ploche VX8, keď pri automatizovanej klasifikácii došlo k nadhodnoteniu o 40 % a naopak pri vyhodnotení korún operátorom na 3-D modeli k podhodnoteniu o 20 %.

Z konfrontácie s výsledkami citovaných prác vyplýva, že výsledky dosiahnuté nami navrhnutým algoritmom pre LMMS s vysokým rozlíšením sú porovnateľné s výsledkami dosiahnutými citovanými autormi. Dosiahnutá 95 % správnosť v počte stromov určených operátorom na obrazovke v porovnaní s terestrickým zistením na všetkých výskumných plochách spolu (tab. 3) ako aj 85 % správnosť automatizovaného vymedzenia korún k terestrickému zisteniu (tab. 4) sa javí ako perspektívna pre praktické využitie na úrovni zisťovania

porastu. Veľké variačné rozpätie chýb pri automatizovanej klasifikácii na skusných plochách však poukazuje na potrebu spresnenia modelu. Na ďalšie nedostatky algoritmu poukázalo porovnanie automatizovane klasifikovaných a operátorom určených korún, ktoré bolo možné polohovo jednoznačne stotožniť. Správnosť bola v tomto prípade len 54 % (tab. 5). Tieto výsledky naznačujú, že okrem doladenia algoritmu bude nutné do neho zahrnúť aj ďalšie kritériá a vstupné parametre ako, napr. spektrálne charakteristiky, prípadne kombinovať snímku s údajmi laserového skenovania.

Ďalším limitujúcim faktorom je možnosť vymedzenia len úrovňových a nadúrovňových stromov. Z pohľadu využitia odvodeného počtu stromov a veľkosti korún pri odhade zásob sa táto skutočnosť nemusí javiť ako rozhodujúca, vzhľadom k tomu že hlavná časť zásoby sa kumuluje v jedincoch výškového postavenia 1 a 2.

Algoritmus odvodenie DMT z leteckých snímok v presnosti potrebnej pre určenie v práci opísaných stromových charakteristík je výpočtovo náročný. Pri sieti výškových bodov 2×2 m sme sa už na modelovom území asi 100 ha dostali k stovkám tisícom objektov, navyše s 3-D záznamom (x, y, z súradnica). Bežný 32 bitový softvér má navyše limitovanú správu pamäte schopnosťou adresovať pamäť maximálne na 2^{32} byte, čo limituje množstvo objektov, ktoré je možné efektívne spracovať.

Ďalším obmedzením, s ktorým sme sa stretli v našej analýze bolo zlyhanie algoritmu pre odvodenie bodov digitálneho modelu povrchu porastu v nadire snímky. Ide o výrazné obmedzenie, pričom nie je z našej práce možné zovšeobecniť či ide o neriešiteľný fotogrametrický problém alebo o nedostatok algoritmu použitého softvéru.

Pre zistenie plôch, ktoré sú výškovo dominantné a je predpoklad, že budú zodpovedať vrcholom stromov, boli napísané aplikačné formuláre v internom jazyku PhoTopoLu, v jazyku Topas. Nevýhodou tohto makro jazyka je pomalý prístup k dátam a nemožnosť dynamického programovania. V prípade spracovania väčších území by bolo vhodné prepísať formuláre do iného jazyka ako externé programy.

5. Záver

Digitálne multispektrálne snímky s vysokým rozlíšením 20×20 cm sa stali štandardom v lesníckom mapovaní. Pri ich spracovaní sa už rutinne zaviedli metódy digitálnej fotogrametrie. Vytvorili sa tak predpoklady pre rozvoj špecializovaných aplikácií v oblasti tematického lesníckeho mapovania založené na využití leteckých meračských snímok.

Dosiahnuté výsledky nie sú zatiaľ vyhovujúce pre uplatnenie sa v rámci hospodársko-úpravníckych prác. V ďalšom výskume sa sústredíme na kombináciu fotogrametrického a spektrálneho prístupu. Kľúčovou úlohou je vykonať ortorektifikáciu snímok podľa DMT

odvodeného z fotogrametrického modelu a tým zabezpečiť polohové zjednotenie výstupov z fotogrametrického a spektrálneho vyhodnotenia snímok. Vzájomnou kombináciou prístupov sa rozšíri systém kritérií pre vymedzenie korún a vrcholov stromov. Ďalší možný smer výskumu je zapracovanie trigonometrických vzťahov definujúcich pozíciu slnko – strom – tieň do algoritmu určenia vrcholov stromov v 3-D priestore. Perspektívne sa javí aj prepojenie digitálnej fotogrametrie a pozemného laserového skenovania, a to predovšetkým pre potreby odvodenia výšok jednotlivých stromov ako aj strednej a hornej výšky porastu. Precíznejšie odvodenie DMR je predpokladom pre ďalšie rozvinutie problematiky určenia výšok stromov a s ňou súvisiacej problematiky hodnotenie vertikálnej výstavby porastov.

Podakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0632-07, v rámci projektu „Výskum metód klasifikácie a štrukturálnych modelov priaznivého stavu lesných ekosystémov Slovenska – hodnotenie stavu a vývoja lesov v krajine s podporou DPZ“.

Literatúra

- ADLER P., 2001: Einsatz digitaler Photogrammetrie zur Beschreibung von Waldbeständen. Am Beispiel der digitalen photogrammetrischen Erfassung der Level 2 Flächen Baden-Württemberg. Dissertation an der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg. 148 p.
- BUCHA T., VLADOVIČ J., 2000: Klasifikácia zdravotného stavu lesov pomocou kozmických snímok Landsat TM na modelovom území Lomnistej a Vajskovskej doliny. *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, **46**(2): 117-127.
- HALVOŇ E., 2008: Lesnícke mapové dielo. In: *Lesnícka geodézia a fotogrametria – trendy*. Zvolen: TU Zvolen, s. 112-132.
- CHUBEY M.S., FRANKLIN S.E., WULDER M., 2006: Object-based Analysis of Ikonos-2 Imagery for Extraction of Forest Inventory Parameters. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **72**(4): 383-394.
- KIM M., MADDEN M., 2006: Determination of optimal scale parameter for alliance-level Forest classification of multispectral ikonos images. 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), ISPRS, Volume No. XXXVI – 4/C42, ISSN 1682-1777.
- KOCH B., HEYDER U., STRAUB CH., WEINACKER H., 2006: 3-D data for forest and environmental planning. In: KOUKAL T., SCHNEIDER, W. (eds): *3-D Remote Sensing in Forestry*, International workshop ERSeL – Vienna, p. 1-14.
- KRCHO J., 1990: Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu. Bratislava: VEDA.
- MAJLINGOVÁ A., 2007: Digitálna obrazová analýza dát DPZ s vysokým priestorovým rozlíšením a jej využitie v lesníctve. GIS-Ostrava 2007. Dostupné na internete: http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2007/sbornik/Referaty/Sekce2/majlingova.pdf
- MATĚJKA K., 2007: Assessment of tree layer biomass and structure using Aerial photos in lake catchments of the Šumava Mts. *Journal of Forest Science*, **55**(2): 63-74.
- PERSON A., HOLMGREN J., SÖDERMAN U., 2006: Identification of tree species of individual trees by combining very high resolution laser data with multi-spectral images. In: KOUKAL T., SCHNEIDER W. (eds.): *3-D Remote Sensing in Forestry*, International workshop ERSeL – Vienna, p. 102-107.

- RADOUX J., DEFOURNY P., 2006: Influence of image segmentation parameters on positional and Spectral quality of the derived objects. *1st International Conference on Object-based Image Analysis* (OBIA 2006), ISPRS, Volume No. XXXVI – 4/C42, ISSN 1682-1777.
- TOWNSHEND J.R.G., HUANG ., KALLURI S.N.V., DEFRIES R.S., LIANG S., 2000: Beware of Per-pixel Characterization of Land Cover. *International Journal of Remote Sensing*, **21**(4): 839-843.
- ŠUMBERA S., ŽIDEK V., 2002: Automated tree top identification using colour infrared aerial photographs of high spatial resolution. *Ecology* (Bratislava), **21**(3): 229-238.
- SCHEER L., 1995 : Zisťovanie zásob dvojfázovým regresným výberom pomocou družicových scén a terestrického merania. *Lesníctví-Forestry*, **41**(5): 224-229.
- ŠMELKO Š., SCHEER L., PETRÁŠ R., ĎURSKÝ J., FABRIKA M., 2003: Meranie lesa a dreva. Zvolen: ÚVVP LVH SR, 239 s.
- Wang Y., Soh S.Y., Schultz H., 2006: Individual tree crown segmentation in aerial forestry images by mean shift clustering and graph-based cluster merging. *International Journal of Computer Science and Network Security*, **6**(11):40-45.
- WASER L.T., ECKER K., GINZLER CH., KÜCHLER M., SCHWARZ M., THEE P., 2006: Extraction of forest parameters in a mire environment using airborne spectral data and digital surface models. In: KOUKAL T., SCHNEIDER W. (eds.): *3-D Remote Sensing in Forestry*, International workshop ERSeL – Vienna, p. 15-23.
- WOLF B.-M., HEIPKE CH., 2007: Automatic extraction and delineation of single trees from remote sensing data. *Machine Vision and Applications*, **18**(5): 314-330.
- ZLATNÍK A., 1976: Lesnická fytoecologie. Praha: SZN.
- ŽIHĽAVNÍK Š., CHÚDY F., KARDOŠ M., 2005: Digitálna fotogrametria v lesníckom mapovaní. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, ISBN 80-228-1545-4, 80 s.
- Dostupné na internete: <http://www.microsoft.com/ultracam/downloads/default.aspx>
- Základná mapa SR, 1 : 10 000, Geodetický a kartografický ústav, dostupné na internete ako webová mapová služba: http://atlas.sazp.sk/wmsconnector/com.esri.wms.Esrimap?ServiceName=share_raster_zakladne_mapy&

Summary

This paper deals with derivation of a method for crown detection from a 3-D model of forest canopy created from multi-spectral aerial stereo photos with a high resolution. Test area Medvedia úboč of approx. 100 ha is situated in a terrain with an average gradient of 32°. There are aged fir-beech multi-layered stands mixed with maple, ash and spruce.

3-D model of forest canopy (DMT) is derived from photos using methods of digital photogrammetry (Fig. 3). We created an angle network from the point array of heights, i.e. area was assigned to each height point automatically. There are generated topological and geometric relationships (adjacent, higher, lower, ...) by defining area around elevation points. These can be used to determine tree crowns by formulation of mathematical and logical criteria derived from the knowledge of the size and shape of the tree crown:

Firstly, we have to determine the tree tops in a group of areas (polygons). We have checked two variants. Variant A) determines the tree tops in a group of areas from DMT with absolute altitudes. The tree top is field reference point (gravity centre of the area), which altitude is higher than altitude of other neighboring areas (Fig. 5 on the left). If there are two or more tree top areas next each other, these are aggregated and the reference point of the new (merged) area is becoming the top. The methodology procedure in Variant B) was the same, but instead of an absolute altitude we used the height difference from digital model of forest canopy and digital relief model: $HVR = DMT - DMR$ (Fig. 5 on the right). Digital relief model was derived from contour lines on a basic map of SR in a scale of 1 : 10 000.

Secondly, we assigned broader area to the tree top – entity (Fig. 6). Under the entity we understand a group of areas appertaining to a single top. Therefore, entity represents a tree crown. The individual areas are assigned to entity based on the following criteria:

- Altitude of the area is lower than the top.
- Test area in relation to the top lies on the imaginary line formed by the centre of gravity of the areas lying between the tested area and the detected top. Altitude of this line systematically decreases from the top of the test area.
- Area has not yet been assigned to any other entity.
- Reference point of the area is closer to the top than a limit (maximum estimated crown width / 2).
- The difference between altitudes of the areas is lower than the set threshold level.

Third (final) step combines the results of both variants of tree tops detection into one single output. A fixed tree top is considered to be an output from the first step derived from DMT. Output includes also those entities from the second step that are undisputed in relation to the entities from DMT. In our solution the algorithm does not take any entity of DMR into the output with top lying closer than 5 meters to the top of the entity from the DMT. We assume that the tops display the same object (tree) in these cases.

Tree tops represent the number of trees in the forest stand. Their correct determination was checked on the five research plot. We could not identify subdominant and suppressed trees from aerial photos. Therefore, we evaluated only trees of height 1 and 2, i.e. dominant and co-dominant trees (Table 2). Table 3 shows a comparison between the number of tree terrestrially determined on 5 research areas and the number of trees determined by operator from the images on the screen. Error of determining the number of trees ranges from -22% (i.e. operator underestimated the number of trees in the area) to +10% (i.e. operator overestimated the number of trees).

Table 4 shows a comparison of terrestrially determined and automatically detected tree tops on 5 research areas. Errors of the automated classification were in the range from -41% to +40% when compared with terrestrial measurements. It is required to include also other criteria into the algorithm for other detailed classification. It will concern particularly use of spectral information in the determination of the tree crown.

Translated by J. LÁSKOVÁ