



## ACCURACY OF DIGITAL TERRAIN MODEL ON FOREST ROADS USING AIRBORNE LIDAR AND UAV POINT CLOUDS

**Miroslav Kardoš**  
Technical university in Zvolen  
Faculty of Forestry  
T. G. Masaryka 24  
96001 Zvolen

**Michal Ferenčík**  
Technical university in Zvolen  
Faculty of Forestry  
T. G. Masaryka 24  
96001 Zvolen

### Abstract

*A sufficiently dense forest road network is a basic prerequisite for the professional management of forests on the basis of close to nature management. For the purposes of forest management, it is of great importance to determine the state of damage of forest roads, to plan their reconstruction and to calculate the costs of their repair. The dominant method for forest mapping is photogrammetry, which is currently combined with airborne laser scanning data. The combination of these two methods makes it possible to obtain up-to-date and representative forest and landscape information for the purpose of professional and sustainable forest management in the context of 'precision forestry', which is based on the use of detailed site-specific information for the planning, management and implementation of forestry activities. In this paper, we discuss the application of the mentioned remote sensing methods for modelling the surface of selected forest road sections and evaluating the elevation accuracy of the data used. From the point of view of the methods used, both appear to be very suitable for the purpose of detailed surface mapping, condition and damage assessment, or for the optimization and design of new roads.*

### Keywords

*Digital terrain model, forest road, airborne laser scanning, unmanned aerial vehicle*

### 1. ÚVOD

Základným predpokladom odborného manažmentu lesov na báze prírody blízkeho hospodárenia je dostatočne hustá lesná cestná sieť. Problematike lesnej dopravnej siete sa venovala v predchádzajúcom období značná pozornosť vzhľadom na ich dôležitosť pre lesnícku prevádzku a v súčasnosti aj pre verejnosť v spojitosti so zvýšenými požiadavkami na plnenie ďalších funkcií lesa pre spoločnosť. V oblasti využívania bezkontaktných systémov DPZ, pri porovnaní len s krajinami V4 je oproti podmienkam SR viditeľný rozdiel. Lesné cesty tvoria základný prostriedok pre sprístupňovanie lesných celkov [1].

V prípade mapovania lesných ciest je potrebné nájsť vhodné technológie merania, ktoré budú zároveň v sťažených lesných podmienkach, čo najhospodárnejšie [2].

Digitálny model terénu nachádza uplatnenie pri identifikácii prvkov lesníckeho mapovania, špeciálne lesných ciest [3], pri detekcii poškodení na povrchu lesných ciest [4], resp. pri identifikácii stavu lesnej cestnej siete využitím nástrojov GIS [5], [6]. Autori sa zhodujú nad nutnosťou vykonávania prieskumu ciest z dôvodu zhodnotenia existujúceho stavu sprístupnenia a kvality. Na hodnotenia kvality resp. poškodenia (výtlky, praskliny) lesných ciest sa v súčasnosti dostávajú do popredia metódy laserového skenovania. Jedná sa najmä o technológie mobilné, ktoré sú využívané najmä vo verejnom sektore [7].

Pre účely lesného hospodárstva má veľký význam zisťovanie stavu poškodenia lesných ciest, plánovanie ich rekonštrukcie a výpočet nákladov na ich opravu. Ako vhodná metóda pre tento účel sa preukázala technológia mobilného profilometrického skenovania [4].

Poškodzovanie povrchu vozovky vzniká pôsobením rôznych vonkajších mechanických a fyzikálnych procesov, ktoré následne ovplyvňujú jej prevádzkové funkcie a únosnosť jej konštrukcie [8].

Dominantnou metódou pri mapovaní lesov je však fotogrametria, ktorá sa v súčasnosti kombinuje s údajmi leteckého laserového skenovania (LLS). Kombinácia týchto dvoch metód umožňuje získanie aktuálnych a reprezentatívnych informácií o lese a krajine za účelom odborného a trvalo udržateľného hospodárenia v lese v kontexte tzv. precízneho lesníctva, ktoré je založené na využívaní podrobných informácií o konkrétnej lokalite na plánovanie, riadenie a vykonávanie lesníckych činností.

Ortofotomapy spolu s bodovým mračnom z laserového skenovania slúžia ako vhodný podklad pre mapovanie siete dočasných a trvalých ciest, ktoré sú prvkom lesníckych máp [9]. Za výrazný prvok automatizácie v spracovaní fotogrametrických snímkov môžeme považovať digitálnu obrazovú koreláciu, ktorá umožňuje riešenie problémov automatickej vzájomnej orientácie, priradovania obrazov v pásme trojnásobného a priečného prekrytu. Jednou z menej „tradičných“ metód získavania 3D bodových mračen, sú metódy spracovania snímkov najmä z diaľkovo pilotovaných leteckých systémov pomocou „structure from motion SFM“ technológie [10].

V lesníckej praxi boli doposiaľ zaužívané postupy merania poškodenia lesných ciest prostredníctvom zdĺhavého terestrického merania s použitím meračských lát. LLS s dostatočnou hustotou bodov resp. mobilné laserové skenovanie poskytujú nové možnosti efektívneho zisťovania presných informácií o povrchu vozovky. Mobilné terestrické a letecké systémy zberu údajov poskytujú oproti terestrickému meraniu efektívny zber dát (rýchlosť skenovania je závislá od povrchu vozovky a požadovanej presnosti a hustoty bodového mračna). Mobilné mapovacie systémy poskytujú údaje na tvorbu 3D modelov, presné, aktuálne informácie špeciálne vhodné pre navigáciu chodcov, automobilov a poskytovanie služieb [11].

Doposiaľ boli mapovacie systémy využívané najmä pre skenovanie a vyhodnotenie ciest v urbánnych oblastiach, pričom

sa jedná o rýchlu metódu umožňujúcu získanie veľmi hustého realistického bodového mrača [12].

V oblasti identifikácie lesnej cestnej siete sú najčastejšie aplikované metódy založené na klasifikácii obrazu [13].

Využívanie LiDAR údajov ponúka možnosti klasifikácie a techniky detekcie ciest realizované pomocou bodového mrača. Klasifikačné techniky využívajúce kombináciu snímok a bodových mračien sú do istej miery účinné aj v zalesnenom prostredí [14].

### Lesná cestná sieť

Pre plnenie cieľov lesného hospodárstva (ekologických, prevádzkových, ekonomických) je potrebné kombinovať niekoľko prístupov pre sprístupňovanie lesa. Lesné cesty tvoria základný prostriedok pre sprístupňovanie lesných celkov [1].

Z hľadiska sprístupnenia zalesnených oblastí je dôležité dodržanie optimálnej hustoty lesných ciest. Práve dodržanie optimálnej hustoty lesnej cestnej siete môže byť značne ovplyvnené rôznymi faktormi. Predovšetkým sa jedná o topografické pomery, sklon, hodnotu dreva, druh ťažbovej metódy, a iné [15].

Lesná cesta sa radí najmä k zariadeniam, ktoré slúžia na sprístupňovanie a prepájanie viacerých lesných komplexov a dopravu dreva [1].

Na základe normy STN 73 6108 „Lesná dopravná sieť“ sa lesné cesty delia do tried 1L, 2L, 3L a technologické komunikačné zariadenia. Uvedené triedy ciest musia spĺňať základné parametre uvedené v STN. V prípade, ak lesná cesta nespĺňa niektorú z podmienok, je automaticky zaradená do nižšej kategórie lesnej cestnej siete. Správnym naplánovaním a následným vybudovaním lesnej cestnej siete tak dokážeme dlhodobo ovplyvniť ako ekonomickú a prevádzkovú funkčnosť lesov, tak aj ich ekologickú a estetickú hodnotu. Kvantitatívne a kvalitatívne nevhodne vybudovaná cestná sieť, môže zapríčiniť devastáciu krajiny a nižšiu efektívnosť hospodárenia [1].

Cieľom príspevku je vytvorenie a porovnanie modelov terénu na povrchu lesnej cesty z bodového mrača získaného technológiou UAV a leteckého laserového skenovania poskytnutého Geodetickým a kartografickým ústavom (GKÚ). Posúdenie možností uvedených technológií pre účely spravovania a projektovania lesnej cestnej siete v lesnom hospodárstve.

## 2. MATERIÁL A METÓDY

Experiment sa realizoval na území Vysokoškolského lesníckeho podniku (VŠLP) Technickej univerzity vo Zvolene, ktorý tvorí prírodné laboratórium so širokou databázou údajov o lesných porastoch v našom prípade lesných cestách, ktorých hustota je 47,5 m/ha, čo predstavuje viac ako 2-násobok oproti priemernej hustote lesnej cestnej siete na území Slovenska. Výskumná referenčná plocha pre tvorbu modelov terénu, analýzu výškovej presnosti, predstavuje úsek lesnej cesty s názvom „Štagiar“ o celkovej dĺžke 1044 m, ktorá pozostáva zo šiestich samostatných úsekov s rôznym povrchom vozovky (v závislosti od typu konštrukcie a použitých materiálov), pričom sa jedná o úsek lesnej cesty kategórie 1 L (odvozná lesná cesta najvyššej kategórie). Pre náš experiment sme vybrali 3 typy povrchov, ktoré sa medzi sebou líšia najviac z pohľadu použitého stavebného materiálu.

Charakteristika jednotlivých úsekov lesných ciest:

4. úsek cesty č. 1 (obr. 1): 15 cm podkladová vrstva štrková vrstva ( $\varnothing$  32 – 63 mm) prekrytá 5 cm vrstvou štrku ( $\varnothing$  4 – 8 mm), spevnená **cementom** (30 kg.m-2) a zavalcovaná (190 m).
5. úsek cesty č. 2 (obr. 2): na vyrovnané zemné teleso bola uložená 10 cm podkladová vrstva kameniva ( $\varnothing$  0 – 32 mm), na nej je 10 cm rozomletého **asfaltu (73 m)**.
6. úsek cesty č. 3 (obr. 3): 10 cm hrubá vrstva kameniva ( $\varnothing$  32 – 63 mm) prekrytá 10 cm vrstvou jemnejšieho kameniva ( $\varnothing$  0 – 32 mm) – **štrk** (414 m)



Obrázok 1 - lesná cesta kategórie 1L – cementom spevnený povrch



Obrázok 2 - lesná cesta kategórie 1L – asfaltový povrch



Obrázok 3 - lesná cesta kategórie 1L – štrkový povrch

Na každom úseku lesnej cesty v dĺžke 100 m boli zabezpečené údaje leteckého laserového skenovania aktuálne poskytovaného bezodplatne prostredníctvom Goedetického a kartografického ústavu (GKÚ) pre výskumné účely. Od roku 2017 Úrad geodézie, kartografie a katastra SR (ÚGKK SR) zabezpečuje dodávateľským spôsobom nový DMR 5.0 – digitálny model reliéfu, ktorý je vytvorený pre celé územie Slovenska, z údajov LLS. Predpokladá sa, že tento projekt bude ukončený v roku 2023. Celé územie, ktoré zachytáva v Slovenskej republike sa rozdeľuje na 42 lokalít. Skenovanie jednotlivých lokalít postupuje smerom od západu na východ Slovenska. Údaje, ktoré majú menší rozsah (teda výrezy) môžeme sťahovať prostredníctvom aplikácie Mapový klient ZBGIS (ÚGKK SR, 2022). Tento model vzniká interpoláciou z klasifikovaného mračna bodov. Trieda, ktorá je použitá na vstupnú klasifikáciu je trieda č. 02 Reliéf (Ground). ESRI GRID alebo ASC je vstupným rastrom v rozlíšení 1 x 1 m [16].

Druhý údajový dataset predstavovali snímky z fotogrametrického snímkovania diaľkovo pilotovaným leteckým systémom, resp. dronom. Digitálne fotogrametrické vyhodnotenie snímok s vysokým prekrytom (až 80 x 80%) zahŕňa výpočet a spresnenie parametrov vonkajšej orientácie snímok metódou structure from motion, generovanie bodových mračien, výpočet digitálneho modelu terénu, tvorba digitálnej farebnej ortofotomapy. Spracovanie a vyhodnotenie materiálov z terestrického merania zahŕňa postprocessing, výpočet súradníc bodov, generovanie bodových mračien. Za týmto účelom bol použitý softvér Photoscan. Fotogrametrický zber údajov bol realizovaný prostredníctvom dronu Phantom 4 PRO s nízkou výškou letu (4-6m) nad povrchom vozovky pod clonou lesného porastu. Jedná sa o kvadroptéru s 4K Ultra HD kamerou umiestnenou na trojosom stabilizovanom závесе s integrovaným systémom Lightbridge pre prenos obrazu a mnohými ďalšími funkciami, ktorej konštrukcia je zhotovená zo zliatin titánu a horčíka, čo zvyšuje tuhosť trupu a znižuje hmotnosť. Fotografie sú vyhotovované kamerou, ktorá je osadená jednopalcovým 20 megapixelovým snímačom, ktorý je schopný natáčať video v 4K/60 fps alebo dokáže vyhotoviť až 14 fotiek za sekundu s rozlíšením 12 MPx. Optika má širokouhlé ohnisko 20 mm, kvalitu fotiek zabezpečuje trojosá stabilizácia. Dron je možné ovládať ručne alebo tiež môžeme zvoliť niektorý z automatických režimov. V režime TapFly alebo ActiveTrack je dron schopný sa bezpečne vyhnúť prekážke. Elektronika v ňom je nastavená tak, že automaticky stráži stav batérie a zabezpečí návrat v prípade, keď klesne na určitú hodnotu. Prvým zdrojom údajov bolo bodové mračno vygenerované zo snímok

vyhotovených kamerou nesnenou na nízko letiacom drone nad povrchom testovacieho úseku lesnej cesty. V procese spracovania snímok boli tieto transformované do súradnicového systému na základe vlícovacích bodov. Tieto boli zamerané terestrickým meraním totálnou stanicou a GNSS technológiou priamo pred snímkovaním.

Za účelom vyhodnotenia presnosti digitálneho modelu terénu vytvoreného fotogrametricky, na 3 typoch povrchov lesnej cesty sme zvolili uvedené 2 typy zdrojových údajov. V oboch prípadoch sa jednalo o bodové mračno, z ktorého sa následne generoval digitálny model terénu, ktorý postupoval do procesu tvorby rozdielového modelu a výpočtu diferencií medzi modelmi (DMT UAV – DMT ZBGIS, postup v programe ArcGis).

Evaluáciu modelov terénu sme realizovali v programe ArcGis, nakoľko umožňuje import, spracovanie bodových mračien, generovanie DMT aj jeho analýzu a vyhodnotenie. Prvým krokom v procese vyhodnotenia bol import bodových mračien z fotogrametrického spracovania snímok ako aj leteckého laserového skenovania. V ďalšom kroku bolo potrebné zjednotiť a definovať súradnicový systém importovaným údajom (fotogrametrické dáta v súradnicovom systéme ETRS89 UTM 34N, dáta ZBGIS v JTSK). Nasledujúcim krokom bolo generovanie modelov terénu (interpolácia LAS súborov z minimálnych hodnôt s jednotným rozlíšením 0,20 m). Vytvorené rastre sme ďalej od seba odčítali funkciou zonálnej štatistiky (raster z údajov ZBGIS – raster z údajov fotogrametricky vytvorených). Týmto spôsobom sme dostali 3 rozdielové rastre pre každý povrch cesty. Pre štatistické vyhodnotenie diferencií sme tieto previedli na vektorový tvar. Následne sme dostali k dispozícii atribútovú tabuľku, kde pre každý bod pôvodného rastra obsahovala diferenciu medzi modelmi terénu. Štatistické zhodnotenie tak predstavovalo zistenie veľkosti jednotlivých diferencií (strednej diferencie, minimálnej, maximálnej odchýlky a strednej chyby) pri určitej spoľahlivosti (tabuľka č. 1).

### 3. VÝSLEDKY

Výsledky porovnania digitálneho modelu terénu zo snímok získaných fotogrametricky systémom UAV a z bodových mračien získaných prostredníctvom ZBGIS (letecké skenovanie pre vyhotovenie DMR 5.0) uvádzame v tabuľke č. 1.

Tabuľka 1 - Štatistické charakteristiky vypočítané z diferencií medzi DMT z LLS a fotogrametricky získaným DMT (jednotky v metroch)

Typ povrchu	Počet párových hodnôt	Min	Max	Priemer (ē)	Stredná chyba (m <sub>z</sub> )
Cement	3077	-0,11	0,16	0,028	0,035
Asfalt	2487	-0,16	0,11	0,011	0,038
Štrk	1886	-0,14	0,43	0,041	0,053

Celková početnosť diferencií súvisí s dĺžkou úseku cesty, pričom pre oba porovnávané digitálne modely terénu bolo zvolené jednotné rozlíšenie (0,20 m). Treba poznamenať, že digitálne modely terénu vstupujúce do výpočtu rozdielového modelu boli pre každý povrch cesty orezané zhodne podľa vlícovacích bodov, ktoré boli rozmiestnené po okrajoch vozovky (za účelom získania jednotného porovnávacieho základu). Minimálne a maximálne hodnoty diferencií dosiahli úroveň od - 16 cm (úsek č. 2) do +43 cm (úsek č. 3), čo mohlo byť spôsobené miestami vyrastajúcou trávou najmä v stredových častiach telesa cesty. Najlepšia

priemerná diferencia bola dosiahnutá na úseku cesty č. 2 (1,1 cm), najvyššia na úseku cesty č. 3 (4,1 cm). Presnosť charakterizovaná strednou chybou dosiahla hodnoty od  $\pm 3,5$  cm na úseku č. 1 až po  $\pm 5,3$  cm na úseku cesty č. 3. Z pohľadu rozdielov medzi modelmi terénu najnižšiu priemernú diferenciu  $\bar{e} = 1,1$  cm sme zaznamenali na povrchu vytvorenom z drveného asfaltu. Uvedený typ povrchu obsahoval aj najmenej lokálnych poškodení na vozovke. Pri cementovom type povrchu sme zaznamenali najnižšiu hodnotu dosiahnutej strednej chyby  $m_z = \pm 3,5$  cm, čo je takmer identický výsledok s typom povrchu asfalt. Hodnota priemernej odchýlky však bola mierne vyššia  $\bar{e} = 2,8$  cm (predpokladáme súvis s drsnejším typom povrchu s väčším počtom poškodení). Najmenej presné výsledky z pohľadu dosiahnutej strednej chyby sme zaznamenali na štrkovom povrchu lesnej cesty s hodnotou  $m_z = \pm 5,3$  cm, čo bolo s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené lokálnymi miestami s nízkou trávnu vegetáciou v strede telesa cesty, ktorú automatický klasifikačný algoritmus ponechal v triede terén. Oba dátové zdroje pochádzali z vegetačného obdobia. Z pohľadu celkového zhodnotenia môžeme charakterizovať model terénu generovaný z fotogrametricky získaných dát ako mierne nadhodnotený oproti DMT ZBGIS (kladné priemerné odchýlky diferencií). Štatistickú významnosť tohto predpokladu by však bolo potrebné preukázať štatistickým testom.

#### 4. ZÁVER

Významným prínosom použitej metódy je overenie technológie nízko nákladovej fotogrametrie (diaľkovo pilotovaného leteckého systému) na snímkanie úseku lesnej cesty, ktoré je možné aj pod clonou lesného porastu. Týmto spôsobom môžeme získať veľmi rýchlo a efektívne precízne údaje napr. pri havarijných situáciách, pri monitorovaní poškodenia ciest apod. Hlavnú úlohu pri spracovaní hrajú vlícovacie body, kde sme overili ich vhodnosť rozmiestnenia (optimálne po okrajoch vozovky a doplnujúce body aj stredom vozovky s rozstupom cca 10-15 m) čo viedlo k veľmi presným výsledkom transformácie (na úrovni do 3 cm polohovej a výškovej chyby). Rozmiestnenie vlícovacích bodov týmto spôsobom je nevyhnutné aj z dôvodu, že teleso cesty predstavuje relatívne úzku a dlhú líniu bodov, ktoré je z nízkym počtom vlícovacích bodov obťažné transformovať. Porovnanie dvoch technológií získania bodových mračien za účelom vyhodnotenia presnosti zachytenia povrchu vozovky lesnej cesty poukázalo na vysokú kvalitu oboch typov údajov. Rozdiel medzi digitálnymi modelmi terénu získaných z oboch typov bodových mračien (ZBGIS aj fotogrametria) bol v rozsahu strednej chyby od 3,5 do 5,3 cm. Takto získané výsledky sú v rámci presnosti samotnej technológie terestrického merania bodov prostredníctvom GNSS resp. totálnej stanice, pričom navyše poskytujú veľmi rýchly a efektívny spôsob získania údajov (údaje ZBGIS sú pre užívateľa prístupné online). Jedinou nevýhodou údajov leteckého laserového skenovania je ich aktuálnosť vzťahnutá k určitému obdobiu kedy boli vyhotovené (dynamika dopravy a meteorologických javov značne vplýva na zmeny povrchu vozovky). Za tým účelom sa javí fotogrametria s použitím diaľkovo pilotovaného leteckého systému ako vhodná technológia pre častejšie monitorovanie záujmových lokalít v menšom rozsahu. Z pohľadu presnosti poskytovaných výsledkov sú obe technológie relevantné pre akýkoľvek účel, či už z pohľadu plánovania opráv, projekčnej činnosti, mapovania cestnej siete pre lesnícke mapy a pod.

#### PodĎakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Výskum a vývoj bezkontaktných metód pre získavanie geopriestorových údajov za účelom monitoringu lesa pre zefektívnenie manažmentu lesa a zvýšenie ochrany lesov, kód ITMS 313011V465, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

#### Referencie

- [1] Smreček, R., Sedliak, M. 2012. Lesná cestná sieť a účelové objekty – mapovanie a tvorba databázy. In Sborník Gis Ostrava 2012.
- [2] Tuček, J., Kardoš, M., Koreň, M., Smreček, R., 2013. Lesné cesty ako objekt lesníckeho tematického mapovania a súčasť informačných systémov. In Karto. listy. Zvolen. 2013. vol. 21, no. 1 60 -72 s.
- [3] Sačkov, I., Kardoš, M. 2014. Forest delineation based on LiDAR data and vertical accuracy of the terrain model in forest and non-forest area. *Annals of Forest Research*. vol. 57, no. 1, p. 119-136.
- [4] Ferenčík, M., Kardoš, M., Allman, M., Slatkovská, Z., 2019. Detection of forest road damage using mobile laser profilometry. *Computers and Electronics in Agriculture* 166, 105010. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105010>
- [5] Tománek, J., Volný, C., Klíč, P., 2010. Výskum súčasného stavu poručnosti sítě odvodných cest ve flyšovém území lesní správy Ostravice. In *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 2010, vol. 53, no. 1, 47-57 pp.
- [6] Klíč, P., Bránka, L., Žáček, J., 2010. Výskum struktury lesní dopravní sítě ve vybranem modelovém území. *Lesnícky časopis- Forestry Journal*. 2010, vol. 56, no.3, 295 -304 pp.
- [7] Wu, B., Yu, B., Yue, W., Shu, S., Tan, W., Hu, chunling, Huang, Y., Wu, J., Liu, H., 2013. A Voxel-Based Method for Automated Identification and Morphological Parameters Estimation of Individual Street Trees from Mobile Laser Scanning Data. *Remote Sensing* 5. <https://doi.org/10.3390/rs5020584>
- [8] Ferenčík, M., Kardoš, M., Slatkovská, Z., Allman, M., Messingerová, V., 2017. Application of Vhicle-borne Laser scannig for evaluation of damage of the forest roads (case study). In *Uzytkowanie maszyn rolniczych i leśnych badania naukowej dydaktyka* . Zakopane: 2017, s. 48.
- [9] Kardoš, M., Tuček, J., Chudý, F., Tomašík, J., Slatkovská, Z., 2017. Aplikácie laserového skenovania v lesníctve. *Slovenský geodet a kartograf (recenzovaný odborný časopis Komory geodetov a kartografov SR)*, Bratislava 2017, ročník XXII, č. 4, p. 11 – 17. ISSN-1335-4019.
- [10] Mathavan, S., Kamal, K., Rahman, M., 2015. A Review of Three-Dimensional Imaging Technologies for Pavement Distress Detection and Measurements. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 16, 2353–2362.

- [11] Kaartinen, H., Hyypä, J., Kukko, A., Jaakkola, A., Hyypä, H., 2012. Benchmarking the Performance of Mobile Laser Scanning Systems Using a Permanent Test Field. *Sensors* 12, 12814–12835. <https://doi.org/10.3390/s120912814>
- [12] Hruža, P., Mikita, T., Tyagur, N., Krejza, Z., Cibulka, M., Procházková, A., Patočka, Z., 2018. Detecting Forest Road Wearing Course Damage Using Different Methods of Remote Sensing. *Remote Sensing* 10, 492. <https://doi.org/10.3390/rs10040492>
- [13] Wang, Jianhua, Qin, Q., Yang, X., Wang, Jun, Ye, X., Qin, X., 2014. Automated road extraction from multi-resolution images using spectral information and texture. Presented at the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 533–536. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946477>
- [14] Ferraz, A., Mallet, C., Chehata, N., 2016. Large-scale road detection in forested mountainous areas using airborne topographic lidar data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 112, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.12.002>
- [15] Najafi, A., Sobhani, H., Saeed, A., Makhdoum, M., Mohajer, M., 2008. Planning and Assessment of Alternative Forest Road and Skidding Networks. *Croatian Journal of Forest Engineering* (crojfe@sumfak.hr); Vol.29 No.1 29.
- [16] Úrad geodézie, kartografie a katastra SR, 2022. Dostupné na internete: <https://www.geoportal.sk/sk/zbgis/lis-dmr/>