

PŘESNOST POZEMNÍHO SNÍMKOVÁNÍ PRO ZJIŠŤOVÁNÍ STAVU POŠKOZENÍ KRYTŮ VOZOVEK LESNÍCH CEST

ACCURACY OF TERRESTRIAL IMAGING FOR THE DETECTION OF FOREST ROAD WEARING COURSE DAMAGE

PETR HRŮZA¹⁾ ✉ - TOMÁŠ MIKITA²⁾ - PŘEMYSL JANATA²⁾ - MILOŠ CIBULKA²⁾ - ZDENĚK PATOČKA²⁾

¹⁾Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav inženýrských staveb, tvorby a ochrany krajiny, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Czech Republic

²⁾Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav hospodářské úpravy lesů a aplikované geoinformatiky, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Czech Republic

✉ e-mail: petr.hruza@mendelu.cz

ABSTRACT

The aim of the study is to verify whether it is possible to determine the extent of the damage to the forest road wearing course using terrestrial imaging and compare this method with the current method of tacheometric measurement of the road surface damage. The 3D model was created using photographs of the current state of a damaged forest road section taken by a commonly available camera with a resolution of 16 megapixels, carried manually on the 4 m telescopic rod. Cross sections of the forest road surface were surveyed tacheometrically and compared with the cross sections created in the 3D model. The results of the test section compared with the accuracy of the current method of tacheometric measuring show that the method of terrestrial imaging can be used to detect the damage with an accuracy of up to 3 cm. The Root Mean Square Error of height differences of the 3D model cross sections compared to the point values from the tacheometric measurements of cross sections reached 0.026 m, the X and Y horizontal errors were 0.019 m and 0.029 m, respectively. Based on the results we can conclude that it is possible to use this method to obtain high-quality data on the extent of the damage to penetration macadam road wearing course.

Klíčová slova: lesní cesty; pozemní snímkování; vozovky; 3D modely

Key words: forest roads; terrestrial imaging; road surfaces; 3D models

ÚVOD

NAJAFI et al. (2008) uvádí, že výstavba lesních odvozních cest je od ne-paměti jednou z nejnákladnějších činností v lesním hospodářství. MURRAY (1998) k tomu dodává, že časově i odborně značně náročná je také tvorba projektové dokumentace lesní cestní sítě. KRČ, BEGUŠ (2013) dále uvádí, že návrh a výstavba lesní cestní sítě je klíčový element úspěšného lesního hospodářství. Dodávají, že je potřeba si zároveň uvědomit fakt, že lesní cesty neslouží jenom samotnému lesnímu hospodaření, ale mají i další funkce. Z toho všeho vyplývá, že udržitelný způsob hospodaření v lesních ekosystémech vyžaduje kvalitní infrastrukturu lesních cest i navzdory možnému negativnímu ekologickému dopadu výstavby lesní cestní sítě (ARICAĀ 2015). YANG et al. (2014) uvádí, že zvyšující se podíl finančních prostředků na údržbu a opravy lesních cest vyvstává nejenom z důvodů poskytování kvalitní infrastruktury pro dopravu dříví, ale i z požadavků široké veřejnosti na poskytování vysoce kvalitní lesní cestní sítě pro rekreační účely. Podobně POTOČNIK et al. (2005) zmiňuje, že díky využívání lesní cestní sítě k rekreačním účelům se požadavky na standard údržby lesních cest neustále zvyšují. Tím vyvstává požadavek správců lesa na rychlé a kvalitní údaje o aktuálním stavu lesních cest tak, aby

bylo možné operativně rozhodovat a pracovat s finančními prostředky určenými každoročně na správu lesních cest. YANG, REGAN (2013) využívají k volbě správného rozhodnutí o využití finančních prostředků na opravy a údržbu metodou označovanou jako AHP (Analytic Hierarchy Process), která má pomoci správcům lesa rychle a snadněji rozhodnout. V jejich navrhovaném procesu rozhodování hrají ale často roli údaje zjišťované vizuálně a až následně zaznamenávané do databázové podoby. COULTER et al. (2006) ve své studii uvádí, že nejvhodnějším prostředkem pro návrh údržby lesní cestní sítě je kombinace heuristické analýzy, analýzy finančních nákladů, dopadů na životní prostředí a profesionální odhad (v práci uváděn termínem „expert judgment“). Jako jedni z mála autorů vkládají do jinak převážně exaktního způsobu rozhodování i určitou míru zkušeností pracovníků odpovědných za stav zpřístupňování lesa. PELLEGRINI et al. (2013) využívá kombinaci nástrojů AHP a GIS (Geographic information system) pro vytvoření podpůrného rozhodovacího systému, který bude sloužit pro rozhodování o údržbě lesní cestní sítě na základě jejího současného stavu. Systém je ale také z části postaven na vizuálním terénním hodnocení. V takovém případě můžeme předpokládat časově náročný sběr dat o každé cestě a potřebu lidské práce pro zaznamenávání úda-

ju do databázového systému. Je však možné konstatovat, že se jedná v současné době o zcela běžně používaný systém pro inventarizaci lesních odvozních cest, přičemž data jsou však často pouze technického směru. Za příklad takového postupu je možné vydávat systém britské organizace Forestry Commission, kdy každý správce lesního úseku, v rámci své pracovní náplně, zaznamenává jednotlivá poškození a události na lesní cestní síti fotografií s polohou GNSS (Global Navigation Satellite System) odesílá ihned odpovědnému pracovníkovi na ústředí lesní správy a ten tyto údaje vyhodnocuje a zaznamenává do systému GIS. Data jsou pak následně k dispozici lesní správě, což ovšem předpokládá u všech jejich pracovníků alespoň částečnou znalost programového prostředí GIS.

V souvislosti s využitím technologie GNSS publikuje ABDI et al. (2012) článek na téma přesnosti a využitelnosti této technologie v lesním prostředí ve spojitosti s mapováním lesních cest, kde uvádí, že vzhledem k relativně malé pořizovací ceně je inventarizace lesní cestní sítě pomocí GNSS často používaná metoda. V článku ale zároveň dodává, že tato metoda může být v lesním prostředí také nepřesná. Spolu s autory RODRIGUEZ-PEREZ et al. (2007) uvádí, že využívání GNSS v lesním ekosystému s sebou přináší problémy týkající se příjmu signálu pod zápojem lesního porostu, a to včetně viditelnosti počtu satelitních družic na daném území v aktuálním čase.

Jak uvádí AZIZI et al. (2014), v současné době je pro průzkum lesní cestní sítě nejdále propracována metoda LiDAR (Light Detection And Ranging). Jedná se o metodu dálkového měření vzdálenosti na základě výpočtu rychlosti odraženého pulsu laserového paprsku od snímaného objektu, která slouží především k tvorbě DMT (digitálního modelu terénu). Nejčastěji je metoda LiDAR využívána v podobě leteckého skenování neboli ALS (Airborne Laser Scanning), kdy je skener umístěn na letadle, dále pozemního skenování neboli TLS (Terrestrial Laser Scanning), kdy je skener staticky umístěn na stativu a případně mobilního skenování neboli MLS (Mobile Laser Scanning), kdy je skener umístěn na pohyblivém se vozidle (např. autě).

V oboru zpřístupňování lesa bylo ALS využito například pro stanovení rozložení lesních cest v lesním porostu, a to s přesností od jednoho do dvou metrů (WHITE et al. 2010; AZIZI et al. 2014). Tato metoda může usnadnit aktualizaci map lesní cestní sítě, zvýšit účinnost zpřístupnění, může sloužit k plánování těžebně-dopravních procesů, např. směrů a délek přibližování a odvozů dříví, avšak zpracování dat může být zdlouhavější, a pro stanovení přesnějších, detailnějších údajů, např. o poškození krytů vozovek, není použitelná.

SAITO et al. (2013) publikuje možnost využití metody LiDAR pro automatický návrh lesní cestní sítě, který zohlední negativní kardinální body pro její trasování, jako například lokality, kde hrozí sesuvy půdy. Na základě přesného DMT vytvořeného s využitím LiDAR dat lze také lokalizovat umístění odvodňovacích objektů na lesních cestách a minimalizovat erozi vzniklou výstavbou lesních cest (ARUGA et al. 2005). CONTRERAS et al. (2012) se snaží takto vytvořený DMT model využít ke stanovení velikosti zemních prací při návrhu trasy lesní odvozní cesty a porovnává jeho přesnost s daty získanými klasickou metodou pozemního zaměření. ARICAK (2015) používá k tvorbě DMT komerční systém satelitních snímků GeoEye-1, které umožňují vysoký stupeň rozlišení udávaný s přesností 0,46 m. Ty následně zpracovává počítačovými programy ERDAS a ArcGIS, které využívá k vylišení míst náchylných k tvorbě eroze a odnosu půdních materiálů jako podklad pro navrhování lesní cestní sítě.

Výše zmíněné TLS je moderní technologií, která se v poslední době začíná využívat i v lesnictví. Prozatím se jedná pouze o jednotlivé výzkumy, nicméně podle LIANG et al. (2014) bylo prokázáno, že TLS může být do budoucna vhodnou technologií pro měření na lesních plochách i v běžné lesnické praxi. Mnohé výzkumy provedené v této oblasti ukazují, že potenciál této technologie je vysoký, avšak výsledky jsou závislé na mnoha faktorech. PUESCHEL et al. (2013) upozorňuje na fakt, že rozdíly ve výsledcích jednotlivých výzkumů jsou dány fak-

tory jako typ a nastavení použitého skeneru, rozmístění skenovacích pozic, použitý algoritmus, ale i dřevinná skladba porostu a jeho věkova a prostorová struktura. LEEUWEN, NIEUWENHUIS (2010) poukazují na malý prostorový rozsah v lesních porostech (clony kmenů, větvi, listí, jehličí aj.) a rovněž na vysokou finanční náročnost hardware. Na druhou stranu konstatují, že v porovnání s daty z ALS zachycuje tato technologie objekty pomocí mračna bodů s daleko větším detailem. Měřická technika této technologie zaznamenává okolní povrch nebo objekty automaticky a velmi rychle, včetně mnoha důležitých atributů v milimetrovém detailu (LIANG et al. 2016). Tvorbě 3D modelů založené na datech TLS však předchází mnoho činností a intenzivní manuální práce – příprava návrhu umístění pozic skeneru, transport a umístění techniky na jednotlivých stanoviskách, rozmístění terčů (HYYPÄ et al. 2013).

V praxi jsou preferovány měřické metody, které umožňují jednoduché a rychlé získání kvalitních dat. Proto jsou dnes především zkoumány nové možnosti ke zlepšení efektivity sběru dat. V současnosti byla pozemnímu laserovému skenování dána nová, kinematická platforma, na jejímž základě je postaven systém MLS (někdy nazývaný VLS – Vehicle-based Laser Scanning). Systém mobilního mapování může být považován za vyplnění prostoru mezi ALS a TLS (LEHTOMÄKI et al. 2010). MLS je definován jako laserový systém, který je namontován na dopravním prostředku (např. automobil, čtyřkolka, loď) a měření se provádí, když je tento prostředek v pohybu. Jedná se o multi-senzorový systém, laserová součást sestává z jednoho nebo více laserových měřících přístrojů, systém pro určování polohy sestává z přijímače GNSS a inerciální měřické jednotky (IMU).

Pro povrch v lese jsou charakteristické terénní nerovnosti a překážky, jako skály, kameny, spadlé dřevo, případně podrost. Pro některé dopravní prostředky se stává terén méně dostupný, případně zcela nedostupný. V těchto případech je možné pro měření využít speciální terénní automobily nebo metodu PLS (Personal Laser Scanning). Její podstatou je připevnění všech senzorů na krosně, kterou nese operátor (měřič) na zádech. První prototypy zařízení byly velké a především těžké (až 30 kg), což limitovalo použitelnost (KUKKO et al. 2012). Větší využití PLS nastalo až v důsledku rychlé miniaturizace používaných senzorů (HYYPÄ et al. 2013; LIANG et al. 2015). Podle LIANG et al. (2015) je hlavní výhodou PLS vysoká mobilita v rozličných terénních podmínkách a rychlý sběr dat. Další výhodou PLS oproti TLS je možnost mapovat i rozsáhlejší plochy v kratším časovém horizontu, např. průsek o rozloze 5 ha lze změřit přibližně za 15 minut (LIANG et al. 2016). Přesnost bodů měřených těmito mobilními systémy je v rozmezí 2–7 cm (LIANG et al. 2015), ale je velmi ovlivněna signálem GNSS, který je pod lesním porostem celkem nestabilní. Z tohoto důvodu je třeba hledat další způsoby získávání dat, zaručující jednoduchost a rychlost s požadovanou přesností bez požadavku příjmu družicového signálu.

Další z rychle se rozvíjejících technologií je využití bezpilotních letadel, označovaných jako UAS (Unmanned Aerial System) nebo UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Bepilotní letadla sloužila po desetiletí především pro armádní účely, v posledních letech se však začínají výrazně prosazovat i mimo armádu. Lze je vybavit termokamerami, radarem k mapování zemského povrchu, senzory mikrovlnného a ultrafialového záření, laserovým spektroskopem či biochemickými detektory nebo jednoduše digitálním fotoaparátem. Využití UAV vybaveného digitálním fotoaparátem v lesním hospodářství prezentuje PIERZCHALA et al. (2014) na příkladu stanovení velikosti odnosu zemin z přibližovacích linek v rámci těžebně dopravního procesu. V jeho studii byly pořízeny letecké snímky multi-rotorovým UAV pro detailní potěžební model terénu spolu s poškozeními přibližovacími linkami. Pro stanovení velikosti odnosu půdy přibližováním dříví byly tyto snímky následně porovnány se snímky pořízenými pomocí ALS před těžbou. Vzhledem k velikosti těžebních ploch a potřeby detailního zaznamenání jednotlivých porušení terénu typu erozních rýh shledává autor použití UAV k tomuto účelu jako velmi vhodné. Zdůrazňuje

také finanční výhodnost získání dat pomocí UAV, velkou variabilitu těchto systémů, jednoduchost pořízení snímků a následného počítačového zpracování a zejména přesnost ve srovnání s ALS. Data ALS je možné získat většinou jen komerčním způsobem, jejich nákupem, na rozdíl od datových podkladů získaných pomocí UAV, které jsou v podstatě založené na získání dat na konkrétní lokalitě. Existuje také předpoklad, že tato zařízení se v brzké budoucnosti stanou cenově dostupnými. Vývoj používání UAV v oboru fotogrammetrie a dálkového průzkumu Země diskutují v rozsáhlém článku COLOMINA, MOLINA (2014). Výsledkem jsou dosahované přesnosti datových údajů na centimetry s přístroji velmi příznivé ceny. Také SIEBERT, TEIZER (2014) zmiňují rychle se rozvíjející zájem o využití UAV v zemědělských a lesnických oborech. A to zejména pro jejich nízkonákladovost, operativnost nasazení, manévrovací vlastnosti a relativně vysokou bezpečnost provozu. Konstatují, že UAS a UAV jsou již v těchto oborech schopny plnohodnotně nahradit satelitní systémy a pilotovaná letadla. Navíc překonávají ve svých schopnostech jejich nevýhody, jako jsou malá flexibilita nebo vysoké náklady na pořízení satelitních či leteckých snímků z pilotovaných letadel. Také současný vývoj v počítačové vizualizaci poskytuje daleko lepší možnosti tvorby 3D modelů ze snímků pořízených UAV. Snímky pořízené UAV jsou často získané z běžně dostupných fotoaparátů, které nejsou speciálně přizpůsobené pro zaznamenávání přesných metrických údajů (TURNER et al. 2012). Pro řešení této skutečnosti zpracování snímků se využívá metoda SfM (Structure from Motion), která umožňuje pracovat s kalibrační fotoaparátů, pozicí a orientací neuspořádaných a překrývajících se snímků a s 3D geometrií scény (LISEIN et al. 2013). Využívá přitom algoritmus označovaný zkratkou SIFT (Scale Invariant Feature Transform) pro extrahování objektů nebo prvků, který je vhodně aplikovatelný u UAV snímků vzhledem k jeho odolnosti na změny v rotaci, měřítku a překryvu snímků (LINGUA et al. 2009).

Použití UAV v podmínkách lesního porostu, kdy musí letadlo letět mezi stromy okolního porostu, však přináší určité bezpečnostní riziko. Hrozí jeho poškození nebo pád, a tím i odpovídající finanční škoda. Dále jsou tady určitá legislativní omezení, neboť využití bezpilotního letounu za tímto účelem vyžaduje v ČR povolení k létání a registraci pilota, které vydává úřad pro civilní letectví. Tato skutečnost spolu s rizikem havárie letounu vlivem kolize s okolním porostem nad lesními komunikacemi značně komplikuje celý proces. Pro zjednodušení celého postupu proto autoři řeší tuto situaci umístěním fotoaparátu na teleskopickou tyč, která je manuálně nesena obsluhou. Cílem studie je ověřit, zda je možné pomocí této metody pozemního snímkování zaměřit současný stav krytů vozovek lesních cest s přesností adekvátní k současně používané metodě tachymetrického měření velikosti poškození krytů vozovek.

MATERIÁL A METODIKA

Možnosti využití pozemního snímkování k monitoringu stavu krytů vozovek lesních odvozních cest byly testovány na lesní odvozní cestě „Hradská“ na Školním lesním podniku „Masarykův les“ Křtiny Mendelovy univerzity v Brně. Jedná se o lesní cestu třídy 1L s krytem vozovky z penetračního makadamu, který byl využíván ve velké míře pro zpevnování lesních odvozních cest zejména v druhé polovině minulého století, kdy docházelo k rozsáhlé výstavbě lesní cestní sítě v České republice. Během čtyřiceti let výstavby se zvýšila hustota lesních odvozních cest v ČR z 5 m.ha⁻¹ na 16 m.ha⁻¹ (BENEŠ 1978). Vzhledem k tomu, že se životnost krytů vozovky dimenzuje standardně na dobu 20 let, nastává nyní požadavek na jejich obnovu. Hodnocený úsek lesní odvozní cesty měl délku 1100 metrů a nacházely se zde různé typy poškození jako výtluky, vyjeté koleje, trhliny, mozaika trhlín nebo obrus krytů vozovky.

Pro získání obrazových dat bylo použito fotoaparátu značky Sony model NEX 5r s objektivem Voigtlander Super Wide Heliar s pevnou ohniskovou vzdáleností 15 mm. Velikost snímače fotoaparátu je APSC

(24 mm × 16 mm) a rozlišení 16 megapixelů (4912 × 3264 pixelů). Fotoaparát byl umístěn na výtyčce o výšce 4 metry na držáku s vertikálním úhlem ve sklonu 45° (obr. 1). Tento sklon fotoaparátu poskytuje relativně velké pokrytí snímkané plochy a zároveň optimální snímání všech nerovností na tělese cesty.

Snímky byly pořízeny dne 10. 5. 2016 během poledne, kdy se daly předpokládat nejlepší světelné podmínky. Snímky byly zhotoveny kontinuálně na základě průchodu po podélné ose cesty při rychlosti cca 4 km/hod. Fotoaparát pořizoval fotografie s frekvencí 60 snímků za minutu s podélným překryvem snímků cca 90 %, každý bod snímkaného zkušebního úseku tak byl zachycen minimálně na devíti snímcích.

Pro přesné slícování jednotlivých fotografií, vytvoření přesného digitálního modelu povrchu a následně ortofoto mozaiky bylo třeba v terénu vyznačit a geodeticky zaměřit vličovací body v požadovaném souřadnicovém systému, které slouží pro určení měřítka a také georeferencování modelu. V tomto případě jich bylo umístěno a zaměřeno celkem 22. Jejich počet a umístění bylo stanoveno dle počtu a umístění totální stanice pro tachymetrické měření. Tyto body byly vyznačeny pomocí speciální šablony, která umožňuje jejich automatickou identifikaci na fotografiích, a výrazně tak snižuje manuální práci při zpracování dat. Předdefinované šablony jsou dostupné k tisku v softwaru AGISOFT PhotoScan.

Celkem bylo na cestě o délce 1100 m pořízeno 1298 snímků za dobu cca 25 minut. Snímky byly následně zpracovány v počítačovém programu AGISOFT PhotoScan Professional do podoby ortorektifikovaného RGB (RGB barevný model) snímku s rozlišením 1 cm a dále stereofotogrammetrického mračna 3D bodů s průměrnou hustotou 2,47 bodu na 1 cm² (obr. 2).

Tachymetrické zaměření vličovacích bodů bylo provedeno pomocí GNSS přijímače Topcon Hiper Pro v kombinaci s totální stanicí Trimble M3. Body byly zaměřeny v souřadnicovém systému JTSK a výškovém systému Baltském po vyrovnání. Vzhledem k délce měřeného úseku a špatnému GNSS signálu byly touto metodou zaměřeny pouze krajní body cesty. Ostatní body byly zaměřeny tachymetricky na základě zaměřeného a vyrovnaného polygonového pořadu.

Kromě vličovacích bodů bylo po celém úseku cesty zaměřeno také 23 kontrolních bodů umístěných v podélné ose komunikace, které byly následně využity k porovnání horizontální přesnosti, a dále celkem 42 příčných profilů k porovnání vertikální přesnosti (celkem 559 podrobných bodů).

Stereofotogrammetrické mračno bodů bylo následně zpracováno v softwaru ArcGIS Desktop 10.3 s použitím nadstaveb 3D Analyst a Spatial Analyst (obr. 3). Prvním krokem zde bylo vymezení hranic volné šířky v koruně lesní odvozní cesty na základě ruční identifikace krajnic cesty nad ortofotosnímkiem. V dalším kroku bylo stereofotogrammetrické mračno bodů interpolováno pomocí lineární interpolace do podoby souvislého rastrového 3D modelu lesní odvozní cesty. Vzhledem k výpočetní náročnosti dalších analýz byl výsledný model generalizován na rozlišení 1 cm, ačkoliv hustota mračna bodů by umožňovala ještě vyšší rozlišení.

Na základě srovnání nadmořských výšek bodů v příčných řezech z 3D modelu s nadmořskými výškami kontrolních bodů z geodetického měření byla výpočtem základních statistických charakteristik a střední kvadratické chyby ověřena přesnost modelu.

Kromě porovnání přesnosti digitálního modelu povrchu lesní odvozní cesty byly řešeny možnosti modelování a výpočtu hloubky poškození a celkového množství materiálu potřebného k opravě. Pomocí nástrojů tzv. fokální statistiky (Focal Statistics) v softwaru ArcGIS 10.3 bylo simulováno navýšení a vyhlazení povrchu cesty tak, aby výsledný stav co nejvíce odpovídal příčnému tvaru vozovky s vyplněním výtluků. Pro účely výpočtu celkového množství materiálu potřebného k opravě cesty bylo simulováno navýšení a vyhlazení povrchu cesty do původního požadovaného příčného tvaru krytů vozovky a na základě

rozdílu s tvarem povrchu ze stereofotogrammetrického modelu bylo vypočteno celkové množství chybějícího materiálu.

VÝSLEDKY

Horizontální odchylky modelu oproti měřeným datům byly zjištěny na základě 23 zaměřených kontrolních bodů. Porovnání hodnot proběhlo v softwaru AGISOFT PhotoScan na základě výpočtu střední kvadratické chyby (Root Mean Square Error – RMSE) a bylo dosaženo horizontální RMSE 2,9 cm (tab. 1).

Tab. 1.
Porovnání horizontální přesnosti na kontrolních bodech
Comparison of horizontal accuracy at control points

Počet bodů/Number of points	X error	Y error	XY error
23	0,019 m	0,026 m	0,029 m



Obr. 1.
Detail uchycení fotoaparátu pomocí držáku na výtyčce
(foto: T. Mikita)

Fig. 1.
Detail of the camera fitted to a ranging road using a special holder (photo: T. Mikita)

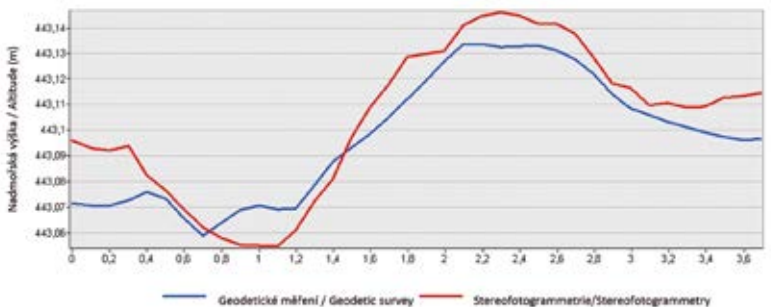


Obr. 2.
Současný stav poškozeného povrchu cesty – snímek cesty s ukázkou vličovaciho bodu (foto: T. Mikita)

Fig. 2.
Current state of the damaged road surface – a photo of the road with an example of a ground control point (photo: T. Mikita)



Obr. 3.
Náhled na fotogrammetrické mračno bodů
Fig. 3.
View of a photogrammetric point cloud



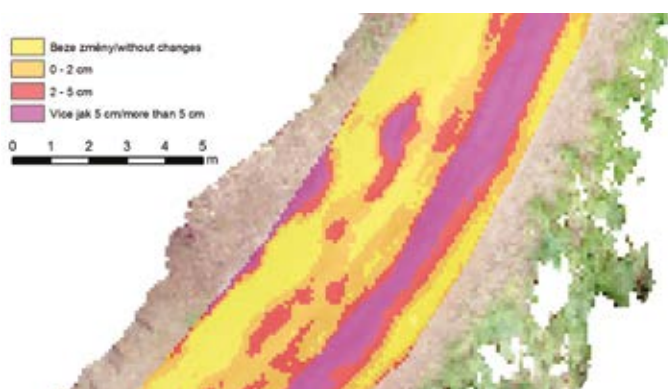
Obr. 4.
Příklad příčného profilu vozovky s viditelnými vyjetými kolejemi
Fig. 4.
Example of a wearing course cross profile with evident ruts

DISKUSE

Oproti dřívě provedené studii (HRŮŽA et al. 2016) bylo dosaženo mírně horší horizontální i vertikální přesnosti. Ve výše uvedené studii bylo za použití bezpilotního létajícího prostředku (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) dosaženo RMSE menší než 2 cm.

Navržená metoda dosahuje relativně dobré polohové a výškové přesnosti, významná je však časová úspora při samotném sběru dat. Kompletní sběr dat, tzn. snímkování cesty a dále zaměřování vličovacích bodů pomocí GNSS a totální stanice trval přibližně 2 hodiny, zatímco časová náročnost pozemního měření profilů tachymetrickou metodou představovala 8 hodin práce. Vyšší je časová náročnost stereofotogrammetrické metody při zpracování snímků v softwaru AGISOFT PhotoScan (cca 12 hodin), toto zpracování je však při využití šablon pro identifikaci vličovacích bodů takřka plně automatické a nevyžaduje aktivní vstupy zpracovatele, může tak proběhnout např. během noci. Výhodou modelu je však plně plošné pokrytí cesty a možnost identifikace poškození v jakémkoliv místě cesty. Z výsledků rovněž vyplývá, že podmínkou pro získání kvalitního modelu cesty je předchozí údržba krajnic sečením, aby nedocházelo k chybám vlivem zachycení vegetace.

Dřívější snaha o využití dálkového průzkumu země v oboru zpřístupňování lesa se vzhledem k přesnosti výsledných údajů ukázala jako nevhodná pro detailnější zpracování stavebních projektů lesních cest nebo detekci jejich lokálních poškození prakticky nevyužitelná. AHMED et al. (2000) udává přibližnou horizontální přesnost metody



Obr. 5. Hloubka poškození cesty vypočtená na základě rozdílu navýšeného modelu a zaměřeného modelu povrchu cesty

Fig. 5. The depth of road damage calculated based on the difference of a model of repaired road and the actually surveyed road surface

Tab. 2.

Porovnání vertikální přesnosti digitálního modelu povrchu cesty v příčných profilech
Comparison of vertical accuracy of the road surface digital model in cross profiles

Počet bodů/Number of points	559
Minimum	-0,050 m
Maximum	0,050 m
Průměr/Mean	0,006 m
Směrodatná odchylka/Standard deviation	0,025 m
Střední kvadratická chyba/Root Mean Square Error – RMSE	0,026 m

LiDAR 1,0 m a vertikální 15 cm. Dále je nutné zmínit, že je nezbytné disponovat kvalitními daty a pracovat s velkým objemem dat, která interpolací při tvorbě DMT mohou ztrácet svoji přesnost. Také v konečné míře udávaná relativně velká velikost gridu 1 m (DEHVARI, HECK 2013) dává této metodě možnosti využití spíše pro posouzení lesní cestní sítě jako celku v rámci řešeného gravitačního území. Pro stanovení velikosti poškození a údržby jednotlivých lesních cest se metoda LiDAR ukazuje těžko využitelná. Je možné konstatovat, že jakkoliv je využívání AHP, LiDAR a DMT vytvořeného na základě dálkového průzkumu Země v rámci oboru zpřístupňování lesa celkem detailně propracováno, poskytuje rámcové údaje, které v konečném důsledku při tvorbě podkladů pro investiční činnost obnáší potřebu upřesnění dat terénním šetřením a detailnější finanční analýzou nákladů. Tento fakt může u správců nebo projektantů lesních cest vyvolávat dojem dvojí práce a být jedním z důvodů, proč se tyto metody v praxi příliš neprosadily. Stejně tak systémy MLS nebo PLS, které jsou závislé na příjmu družicového signálu GNSS, kdy jeho kvalita může pod lesním porostem ovlivnit přesnost měřených dat. Využití technologie GNSS, jak publikuje ABDI et al. (2012) v článku na téma přesnosti a využitelnosti této technologie v oboru zpřístupňování lesa, dosahuje rozdílné přesnosti od 6,49 m do 88,03 m v závislosti na GNSS signálu.

Naopak prezentované výsledky studie dokazují, že přesnost pozemního snímkování, ať už předkládanou metodou, nebo i s využitím UAV (HRŮŽA et al. 2016), je do budoucna příslibem dalšího úspěšného rozvoje tímto směrem.

V současnosti jsou běžně dostupné rovněž velmi sofistikované systémy sběru dat pomocí mobilních mapovacích systémů, umístěných na automobilu, které kombinují sadu kamer s laserovým skenerem. Tyto systémy dosahují vertikální přesnosti do 3 cm (CLARKE 2004; BARBER et al. 2008). Tyto technologie jsou však výrazně dražší a vyžadují další vstupy v podobě dalšího zpracovatelského softwaru při podobné rozlišovací schopnosti a přesnosti. Prezentovaná metoda je však finančně dostupná pro širokou skupinu uživatelů ve srovnání s pořízením výše uvedeného systému sběru dat mobilním mapovacím systémem umístěným na automobilu.

V další fázi bude výzkum této problematiky zaměřen na urychlení procesu sběru dat pomocí instalace kamery na automobil a dále bude snaha o eliminaci procesu zaměřování vličovacích bodů a s tím spojené urychlení terénních prací.

ZÁVĚR

Využití pozemního snímkování pro tvorbu 3D modelu se stále se zlepšujícími vlastnostmi digitálních technologií a jejich snadnější finanční dostupnost ukazuje další možný směr vývoje zjišťování stavu poškození stmelovaných krytů vozovek. Jedná se o technologii, která je pro současnost stále větší samozřejmostí a do budoucna uchopitelnější pro širší okruh uživatelů než metody klasické geodzie. V lesním hospodářství se může uplatnit zejména u staveb pro plnění funkcí lesa.

Poděkování:

Článek vznikl za podpory Interní grantové agentury Mendelovy univerzity v Brně, IGA č. LDF_PSV_2016016.

LITERATURA

- ABDI E., SISAKHT S.R., GOUSHBOR L., SOUFI H. 2012. Accuracy assessment of GPS and surveying technique in forest road mapping. *Annals of Forest Research*, 55: 309–317.
- AHMED K.M., REUTEBUCH T.A., CURTIS T. A. 2000. Accuracy of high-resolution airborne laser data with varying forest vegetation cover. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Earth Observation and Environmental Information*. Cairo, Egypt: 11–14.

- ARICAK B. 2015. Using remote sensing data to predict road fill areas affected by fill erosion with planned forest road construction. A case study in Kastamonu Regional Forest Directorate (Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment*, 184: 417. DOI: 10.1007/s10661-015-4663-7
- ARUGA K., SESSIONS J., MIYATA E.S. 2005. Forest road design with soil sediment using a high-resolution DEM. *Journal of Forest Research*, 10: 471–479. DOI: 10.1007/s10310-005-0174-7
- AZIZI Z., NAJAFI A., SADEGHIAN S. 2014. Forest road detection using LiDAR data. *Journal of Forestry Research*, 25 (4): 975–980. DOI: 10.1007/s11676-014-0544-0
- BARBER D., MILLS J., SMITH-VOYSEY S. 2008. Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 63 (1): 128–141.
- BENEŠ J. 1978. Výzkum přírodních faktorů ovlivňujících tvorbu lesní dopravní sítě. Závěrečná zpráva VÚ. Brno, VŠZ: 85 s.
- CLARKE K.C. 2004. Mobile mapping and geographic information systems. *Cartography and Geographic Information Science*, 31 (3): 131–136.
- COLOMINA I., MOLINA P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92: 79–97.
- CONTRERAS M., ARACENA P., CHUNG W. 2012. Improving accuracy in earthwork volume estimation for proposed forest roads using a high-resolution digital elevation model. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 33: 125–142.
- COULTER E.D., SESSIONS J., WING M.G. 2006. Scheduling forest road maintenance using the analytic hierarchy process and heuristics. *Silva Fennica*, 40 (1): 143–160.
- DEHVARI A., HECK J.H. 2013. Effect of LiDAR derived DEM resolution on terrain attributes, stream characterization and watershed delineation. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 6 (13): 949–967. Dostupné na/Available on: <http://ijagcs.com/wp-content/uploads/2013/11/949-967.pdf>
- HRŮZA P., MIKITA T., JANATA P. 2016. Monitoring of forest hauling roads wearing course damage using unmanned aerial systems. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 64 (5): 1537–1546.
- HYYPÄ J., JAAKKOLA A., CHEN Y., KUKKO A. 2013. Unconventional LIDAR mapping from air, terrestrial and mobile. In: *Photogrammetric Week 2013*. Stuttgart, Germany. Berlin, Wichmann: 205–214.
- KRČ J., BEGUŠ J. 2013. Planning forest opening with forest road. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 34 (2): 217–228.
- KUKKO A., KAARTINEN H., HYYPÄ J., CHEN Y. 2012. Multiplatform mobile laser scanning: Usability and performance. *Sensors*, 12: 11712–11733. DOI: 10.3390/s120911712
- LEEUVEN M. VAN, NIEUWENHUIS M. 2010. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research*, 129: 749–770.
- LEHTOMÄKI M., JAAKKOLA A., HYYPÄ J., KUKKO A., KAARTINEN H. 2010. Detection of vertical pole-like objects in a road environment using vehicle-based laser scanning data. *Remote Sensing*, 2010, 2 (3): 641–664. DOI: 10.3390/rs2030641
- LIANG X., HYYPÄ J., KUKKO A., KAARTINEN H., JAAKKOLA A., YU X. 2014. The use of a mobile laser scanning system for mapping large forest plots. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11: 1504–1508. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2297418
- LIANG X., WANG Y., JAAKKOLA A., KUKKO A., KAARTINEN H., HYYPÄ J., HONKAVAARA E., LIU. J. 2015. Forest data collection using terrestrial image-based point clouds from a handheld camera compared to terrestrial and personal laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53: 5117–5132. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2417316
- LIANG X., KANKARE V., HYYPÄ J., WANG Y., KUKKO A., HAGGRÉN H., YU X., KAARTINEN H., JAAKKOLA A., GUAN F., HOLOPAINEN M., VASTARANTA M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 63–77.
- LINGUA A., MARENCHINO D., NEX F. 2009. Performance analysis of the SIFT operator for automatic feature extraction and matching in photogrammetric applications. *Sensors*, 9: 3745–3766. DOI: 10.3390/s90503745
- LISEIN J., PIERROT-DESEILLIGNY M., BONNET S., LEJEUNE P. 2013. A photogrammetric workflow for the creation of forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests*, 4: 922–944. DOI: 10.3390/f4040922
- MURRAY T.A. 1998. Route planning for harvest site access. *Canadian Journal of Forest Research*, 28 (7): 1084–1087.
- NAJAFI A., SOBHANI H., SAEED A., MAKHDOM M., MOHAJER M. M. 2008. Planning and assessment of alternative forest road and skidding networks. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 29: 63–73.
- PELLEGRINI M., GRIGOLATO S., CAVALLI R. 2013. Spatial multi-criteria decision process to define maintenance priorities of forest road network: an application in the Italian Alpine region. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 34: 31–42.
- PIERZCHAŁA M., TALBOT B., ASTRUP R. 2014. Estimating soil displacement from timber extraction trails in steep terrain: application of an unmanned aircraft for 3D modelling. *Forests*, 5: 1212–1223. DOI: 10.3390/f5061212
- POTOČNIK A., YOSHIOKA T., MIYAMOTO Y., IGARASHI H., SAKAI H. 2005. Maintenance of forest road network by natural forest management in Tokyo University Forest in Hokkaido. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 26: 71–78.
- PUESCHEL P., NEUNHAMB G., ROCK G., UDELHOVEN T., WERNER W., HILL J. 2013. The influence of scan mode and circle fitting on tree stem detection, stem diameter and volume extraction from terrestrial laser scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77: 44–56. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.12.001
- RODRIGUEZ-PEREZ J.R., ALVAREZ M.F., SANZ-ABLANEDO E. 2007. Assessment of low-cost receiver accuracy and precision in forest environments. *Journal of Surveying Engineering*, 133 (4): 159–167.
- SAITO M., GOSHIMA M., ARUGA K., MATSUE K., SHUIN Y., TASAKA T. 2013. Study of automatic forest road design model considering shallow landslides with LiDAR data of Funyu Experimental Forest. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 34: 1–15.
- SIEBERT S., TEIZER J. 2014. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*, 41: 1–14. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.01.004
- TURNER D., LUCIEER A., WATSON C. 2012. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. *Remote Sensing*, 4: 1392–1410. DOI: 10.3390/rs4051392
- WHITE R., DIETTERICK B.C., MASTIN T., STRIHMAN R. 2010. Forest road mapped using LiDAR in steep forested terrain. *Remote Sensing*, 2: 1120–1141.
- YANG C.H., REGAN A.C. 2013. Methodology for effective operation of road management equipment. *Transport Policy*, 30: 199–206.
- YANG C.H., REGAN A.C., KIM I.S. 2014. Estimating road management equipment inventory needs and associated purchase costs. *Transport Policy*, 36: 242–247.

ACCURACY OF TERRESTRIAL IMAGING FOR THE DETECTION OF FOREST ROAD WEARING COURSE DAMAGE

SUMMARY

The construction of forest roads has always been one of the most costly activities within the forest management; additionally, the creation of project documentation of a forest road network is also time-consuming and requires a lot of expertise. The main activity of the forest road owners is the maintenance or reconstruction of the roads. The detection of road damage, including the localization of damaged areas, requires time-consuming and costly tacheometric measurement. With the development of algorithms for stereo photogrammetric data processing, especially the Structure from Motion algorithm, terrestrial imaging is increasingly applied.

The aim of the study is to verify whether it is possible to use the method of terrestrial imaging to survey the current state of road wearing course, and whether this method is sufficiently accurate to bear comparison with the currently used method of tacheometric measuring of the extent of road damage.

The possible application of terrestrial imaging to the monitoring of the forest road network wearing course was tested in the forest road "Hradská", Training Forest Enterprise Masaryk Forest Křtiny, Mendel University in Brno (Czech Republic). This is a forest road class 1 L with penetration macadam wearing course. The investigated forest road section was 1100 m long and there were various types of damage, such as potholes, ruts, cracks, crack mosaics, and course wear.

To get the image data we used the Sony camera, model NEX 5r, with Voigtlander Super Wide Heliar lens with a fixed focal length of 15 mm. The camera photo sensor size is APSC (24 mm × 16 mm) and resolution is 16 Megapixel (4912 × 3264 pixels). The camera was put up the ranging rod, 4 m high, using a holder with a vertical angle of 45° (Fig. 1). The camera inclination provides a relatively large coverage of the taken area and at the same time the optimum capture of all road bumps. The photos were taken on May 10, 2016, around noon, when the best light conditions were expected. The images were taken continuously along the road longitudinal axis at a speed of approx. 4 km/hour. The camera took photos with a frequency of 60 frames per minute with a longitudinal overlap of about 90%, which means that each point of the test section was captured in nine frames at minimum. For accurate fitting of individual photos, creation of an accurate digital model of the surface and the subsequent orthophoto mosaics, it was necessary to set and survey ground control points in the desired coordinate system; the control points are used to determine the scale and georeferencing the model. In this case, a total of 22 ground control points were placed and surveyed. These points were marked using a special template that allows their automatic identification in the photos and significantly reduces the manual labor when processing the data. Further, 42 cross profiles with a total of 559 points were surveyed for the comparison of vertical accuracy.

In total, 1298 photos were taken on the road 1100 m long, in about 25 minutes. They were then processed in AGISOFT PhotoScan Professional into the form of an orthorectified RGB color model of the image with a resolution of 1 cm and stereophotogrammetric 3D point cloud with an average density of 2.47 points per 1 cm² (Fig. 2). The stereophotogrammetric point cloud was then processed in ArcGIS Desktop 10.3 using 3D Analyst and Spatial Analyst extensions (Fig. 3).

In addition to the comparison of the forest road surface digital model accuracy, the options of modelling and calculation of the damage depth and the total quantity of material necessary for the repair were investigated.

The horizontal deviations of the model compared to the measured data were determined on 23 surveyed control points. The comparison of the values was performed in the AGISOFT PhotoScan software on the basis of Root Mean Square Error - RMSE - calculation. The horizontal RMSE was 2.9 cm (Tab. 1). Fig. 4 shows only minimum differences between the surface modelling from the photogrammetric cloud and the surveyed points. Larger deviations are visible especially on road edges, as they are covered by low grass. The vertical deviations of the model were compared with the measured data from the cross profiles using STATISTICA 10 and they reached values of up to 2.6 cm (Tab. 2). We can conclude that the created model achieves a positional accuracy of control points with the RMSE up to 3 cm.

Using the tools of the Focal Statistics, we simulated the upward expansion and smoothing to the road repaired surface so that the result matches as much as possible the cross shape of the road with all potholes filled (Fig. 4), and the quantity of the material necessary for the repair was calculated (Fig. 5).

The use of terrestrial imaging for the creation of a 3D model with the ever improving digital technologies and their larger financial affordability shows another possible direction for the development of the detection of road wearing course damage. As regards forest management, this method can be particularly used for the purposes of constructions serving for the performance of forest functions.

Zasláno/Received: 06. 02. 2017

Přijato do tisku/Accepted: 07. 04. 2017