

Česká zemědělská univerzita v Praze

**Systém operativního leteckého snímkování pro doplňování
ortofotografií po hospodářských zásazích nebo po kalamitách**

Metodika

Karel Kuželka, Peter Surový

Praha 2017

Dedikace

Metodika vznikla jako výstup projektu NAZV QJ1520187 „Vývoj bezpilotních prostředků pro monitoring v lesním hospodářství“ řešeného v letech 2015-2018.

Metodika byla certifikována Ministerstvem zemědělství České republiky, odborem koncepcí a ekonomiky lesního hospodářství pod číslem 75841/2017-MZE-16222/M161.

Oponenti

Ing. Přemysl Janata, Ph.D. – Správa Krkonošského národního parku

Ing. Roman Bystrický – Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem

Autorský kolektiv

Rok vydání

Vydání

Vydal

Tisk

Náklad

Rozsah

ISBN

Karel Kuželka, Peter Surový

2017

1. vydání

Česká zemědělská univerzita v Praze

Tribun EU s.r.o., Cejl 892/32, Brno

30 ks

53 stran

978-80-213-2811-3

Obsah

I.	Cíl metodiky	5
II.	Současný stav problematiky	6
III.	Vlastní metodický postup	8
III.1	Proveditelnost snímkování a výběr vybavení	8
III.1.1	Požadavky na vybavení a kritéria výběru	8
III.1.2	Určení základních parametrů leteckého snímkování	14
III.1.3	Nastavení parametrů snímkování	24
III.2	Postup snímkování pomocí UAV	28
III.2.1	Plánování leteckých prací	28
III.2.2	Vykonání leteckého snímkování	29
III.3	Zpracování snímků	32
IV.	Srovnání novosti postupů	36
V.	Popis uplatnění certifikované metodiky	38
VI.	Ekonomické aspekty	39
VII.	Seznam použité literatury	40
VIII.	Seznam publikací, které předcházely metodice	42
IX.	Přílohy	43
IX.1	Grafy pro určení výšky letu na základě známých parametrů fotoaparátu pro požadovanou pozemní vzdálenost vzorků (prostorové rozlišení)	43
IX.2	Grafy pro určení rychlosti letu na základě známých parametrů fotoaparátu pro požadovaný překryv snímků	46
IX.3	Grafy pro určení rychlosti letu pro fotogrammetrické zjišťování trojrozměrné struktury lesa	50

I. Cíl metodiky

Metodika nazvaná „Systém operativního leteckého snímkování pro doplňování ortofotografií po hospodářských zásazích nebo po kalamitách“ byla vytvořena v rámci projektu NAZV QJ1520187 „Vývoj bezpilotních prostředků pro monitoring v lesním hospodářství“ řešeného v letech 2015-2018.

Letecké snímky, zvláště jsou-li georeferencované (tj. jejich pozice je definována v souřadnicovém systému) a ortorektifikované (tj. zbavené geometrického zkreslení), jsou nástrojem, který může poskytnout množství relevantních informací o stavu lesních porostů. Charakter procesu pořizování klasických leteckých snímků předurčuje využití klasického leteckého snímkování pro předem plánované mapování většího rozsahu, např. před tvorbou lesních hospodářských plánů. Využití metod klasického leteckého snímkování pro operativní zjišťování stavu porostů po hospodářských zásazích nebo po kalamitách je značně problematické a neefektivní.

Projekt, jehož výstupem je tato metodika, je zaměřen na ověření možností využití bezpilotních leteckých prostředků (UAV) pro operativní snímkování lesních porostů v malém rozsahu za účelem vizuální kontroly aktuálního stavu porostů. Hlavním cílem metodiky je poskytnout podrobný postup použití AUV pro doplňování ortofotografií a mapových informací po hospodářských zásazích nebo kalamitách v lesním hospodářství.

Metodika je určena především pro subjekty vykonávající letecké práce při mapování lesních porostů, případně přímo pro provozovatele bezpilotního letadla z řad odborné lesnické veřejnosti, kteří mají zájem o vytvoření nebo získání informací o aktuálním stavu lesních porostů pomocí bezpilotního letadla. Popsané postupy vyžadují značné odborné znalosti a dovednosti jak z oblasti lesnictví, tak z oblasti provozu UAV, pořizování a zpracování fotografií. Postupy předpokládají využití bezpilotního letadla vázané na splnění všech legislativních omezení (současný stav v r. 2017 je popsán v Doplnku X – Bepilotní systémy předpisu L 2 – Pravidla létání) a specializovaného softwarového vybavení.

Výstupem uvedených postupů jsou georeferencované ortomozaiky aktuálního stavu lesních porostů, které mohou být zobrazeny v kontextu stávajících map nebo ortofotomap a mohou tak být využity pro doplňování a aktualizaci mapových dat.

II. Současný stav problematiky

Dálkový průzkum Země (DPZ) je definován jako detekce, rozpoznávání a vyhodnocování objektů na zemském povrchu snímaných a zaznamenávaných pomocí vzdálených zařízení bez fyzického kontaktu se zkoumanými objekty (Franklin, 2001). Prudký rozvoj metod DPZ v posledních dekadách je následován jejich využitím v hospodářské úpravě lesů jako cenný zdroj informací při mapování a monitorování aktivit a změn na lesních majetcích.

DPZ nabízí široké spektrum technik, které různými způsoby zaznamenávají objekty na zemském povrchu a jejich vlastnosti projevující se odrazivostí různých typů vlnění v širokém spektru vlnových délek. Přirozených zdrojů záření využívá klasické snímkování ve viditelném spektru nebo v jiných kanálech, zejména infračerveném, případně v rozšířeném spektru s větším počtem kanálů s využitím multispektrálních a hyperspektrálních senzorů. Pro zkoumání objektů ale mohou být využity i umělé zdroje vlnění – jedná se především o rádiové vlny (Synthetic-aperture radar), světlo ve viditelném nebo jiném spektru (LiDAR), případně zvuk (sonar). Aby bylo využití metod DPZ v lesnictví efektivní, je potřeba, aby produkty DPZ poskytovaly takové informace, které naplňují potřeby lesníků, byly snadno pochopitelné a cenově dostupné. Z těchto důvodů byly v lesnictví nejvíce využívány klasické družicové a letecké snímky v pravých barvách, vzhledem k jejich informačnímu obsahu, cenové dostupnosti a snadnosti využití (Franklin, 2001).

Přestože klasické letecké snímky jsou cenným zdrojem informací v hospodářské úpravě lesů, postrádají flexibilitu v časových i prostorových možnostech jejich pořízení. Letecké snímky poskytované státem (Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním) jsou v současnosti aktualizovány jednou za dva roky. Operativní provedení leteckého snímkování je závislé na bezoblačném počasí a aktuální dostupnosti techniky, nehledě na značně vysoké náklady snímkování. Kromě

toho klasické letecké snímky dosahují standardně rozlišení 20 cm/pixel (Getzin, Nuske, & Wiegand, 2014), což nemusí být pro hodnocení hospodářských zásahů a kalamit dostatečné. Malé bezpilotní prostředky (UAV – Unmanned Aerial Vehicles) představují finančně efektivní alternativu pro letecké mapování malých území s nedostižnou kombinací prostorového a časového rozlišení (Wallace, Lucieer, Malenovský, Turner, & Vopěnka, 2016). Snímkování pomocí UAV lze provádět v libovolný čas, realizace snímkování je do značné míry nezávislá na počasí (Grenzdörffer, Engel, & Teichert, 2008) a snímky poskytují rozlišení v řádu jednotek milimetrů na pixel.

Aktuální snímky s vysokým rozlišením pořízené pomocí UAV nachází své využití v průmyslu a stavebnictví (Nikolic et al., 2013), ekologických studiích (Rosnell & Honkavaara, 2012) zemědělství (Herwitz et al., 2004; López-Granados et al., 2016; Torres-Sánchez, Peña, de Castro, & López-Granados, 2014) i v lesnictví pro zjišťování biomasy nebo inventarizačních veličin (Goodbody, Coops, Marshall, Tompalski, & Crawford, 2017). Přestože samotné georeferencované snímky pořízené z UAV mohou představovat silný nástroj pro monitoring stavu porostu a odvozování porostních parametrů (Chianucci et al., 2016), v popředí zájmu využití UAV je fotogrammetrická trojrozměrná rekonstrukce lesních porostů pomocí metody Structure from Motion, která umožňuje rekonstruovat 3D pozici bodů identifikovaných ve fotografiích pomocí relativních posunů v sérii snímků pořízených z různých směrů (Puliti, Ørka, Gobakken, & Næsset, 2015; Thiel & Schmullius, 2016). Ať už je výsledkem mapování georeferencovaná ortomozaika, nebo 3D bodové mračno připomínající výstup laserového skenování, bezpilotní prostředky osazené RGB fotoaparátem představují díky flexibilitě využití a vysokému rozlišení výsledných produktů snímkování vysoce efektivní nástroj pro monitoring kalamit a hospodářských zásahů v lesních porostech.

III. Vlastní metodický postup

III.1 Proveditelnost snímkování a výběr vybavení

Před samotným zahájením příprav na provedení bezpilotního leteckého snímkování vybrané lokality je vhodné provést teoretický rozbor proveditelnosti snímkování. Následující kapitola je shrnutím poznatků o možnostech a požadavcích na vybavení a jsou rozepsána kritéria výběru vhodného vybavení. Vzhledem k použitému vybavení mohou být následně optimalizovány parametry letu na základě prostorových vztahů a požadavků výpočetních algoritmů zpracování snímků.

III.1.1 Požadavky na vybavení a kritéria výběru

Bezpilotní letadlo

V současné době je k dispozici široké spektrum bezpilotních prostředků umožňující výběr vhodného typu prostředku v závislosti na konkrétních podmínkách a požadavcích pro každou aplikaci tak, aby byly optimálně využity specifické vlastnosti každého z vyvíjených leteckých prostředků. Mezi kritéria výběru vhodného leteckého prostředku pro konkrétní aplikaci patří především hmotnost senzoru, který bude využit k získávání dat, požadavky na délku letu a vybrané letové parametry související s umožněním sběru dat pomocí vybraného typu senzoru. Primární rozhodnutí směřuje k výběru mezi dvěma diametrálně odlišnými typy bezpilotních prostředků – multikoptéry a letouny (křídly).

Multikoptéry

Charakteristikou multirotorových leteckých prostředků obecně je vysoká ovladatelnost, multikoptéry disponují schopností snížit rychlost letu na minimum či dokonce na nulovou rychlost letu, což je vlastnost velmi důležitá při pořizování snímků v horších světelných podmínkách, kdy potřebná delší expozice by při vyšších rychlostech způsobovala pohybovou neostrost snímků, případně při podrobném snímání z nižších výšek s potřebou velkého překryvu snímků. Možnost využití některých typů senzoru může být vázána na malou rychlost letu, což činí multikoptéry nepostradatelnými. Díky vertikálnímu vzletu

a přistání mohou být nasazeny i v lesním porostu, kdy k provedení pomalého a kontrolovaného vzletu či přistání postačí cesta či mezera v zápoji korun. Umožňují také definovat trasu letu zcela přesně včetně ostrých změn směru letu, snímkování je tak omezeno pouze na skutečné zájmové území. Přesné řízení a manévrovatelnost jsou zachovány i při větším zatížení prostředku. Využití multikoptér je omezeno maximální délkou letu, která u současných modelů dosahuje nejvýše kolem 30 minut při letu s nízkou zátěží, přičemž zvyšování zátěže klade vysoké nároky na spotřebu baterií a maximální dobu letu výrazně snižuje.

Základním kritériem pro výběr mezi multikoptéry je požadovaná specifikace senzoru. Některé UAV jsou již vybaveny integrovanými kamerami a není již možné je osadit jiným senzorem. V případě potřeby využití senzorů dosahujících vyšší kvality snímků je potřeba vybírat z nabídky UAV, které umožňují uživatelsky připojit zvolený fotoaparát pomocí příslušného stabilizačního závěsu (gimbalu).

V době vydání této metodiky (2017) jsou pro operativní letecké snímkování lesních porostů za účelem doplňování ortofotografií po hospodářských zásazích nebo po kalamitách vhodné zejména multikoptéry čínského výrobce DJI. Pro zavěšení externího fotoaparátu lze doporučit modely F550, S900 a Matrice 600 Pro, seřazené vzestupně podle užitečné zátěže. Z vhodných modelů vybavených integrovanou kamerou lze zmínit kompaktní model Mavic Pro a univerzální Phantom 4 Pro výrobce DJI nebo model GoPro Karma vybavený kamerou GoPro.

Letouny

Silnou stránkou letounů, prostředků s pevnými křídly, je v porovnání s multikoptéry velmi nízká spotřeba energie a tím výrazně delší maximální doba letu. Rychlost letu se nedá výrazně snížit; minimální rychlost pro udržení prostředků tohoto typu ve vzduchu je přibližně 20 km/h (se zátěží více) a let je pouze horizontální, z čehož plynou hlavní nevýhody letounů: potřeba většího prostoru pro vzlet, přistání i otáčení a nemožnost přizpůsobit letové parametry potřebám senzorů. Značné náklony během letu znehodnocují některé snímky. Jejich využití je na místě, pokud je třeba nasnímkovat rozsáhlé území bez

potřeby získání velmi detailních záznamů. Nejvhodnějším letounem pro použití za účelem mapování lesních porostů je aktuálně (2017) letoun senseFly eBee.

Fotografické vybavení

Fotogrammetrická rekonstrukce objektů a mapování s využitím bezpilotních prostředků je specifickou fotografickou aplikací, která má zvláštní nároky na vlastnosti použité fotografické techniky. Při výběru konkrétního modelu fotoaparátu je třeba vzít v úvahu několik specifických kritérií. Není možné dokonale vyhovět všem kritériím, z nichž některá jsou často v protikladu. Je ale potřebné uvážit, jakým způsobem budou pořízené fotografie a výsledné odvozené produkty (3D bodová pole, ortofotomozaiky) ovlivněny vlastnostmi fotoaparátu a zvolit přiměřený kompromis vyhovující konkrétnímu účelu fotogrammetrického mapování. Pro výběr vhodného fotografického vybavení je vhodné vzít v úvahu zejména následující parametry.

Hmotnost fotoaparátu

Hmotnost vybavení umístěného na bezpilotní prostředek má limitující vliv zejména na maximální dobu letu, ale také na jeho ovládání, manévrovatelnost a rychlost. Vzhledem k tomu, že fotoaparát je obvykle dominantní složkou neseného vybavení, je třeba klást důraz na minimalizaci hmotnosti použitého fotoaparátu. Tento požadavek je naneštěstí často v protikladu s požadavky na další parametry fotoaparátu.

Pevný objektiv

Nevýhoda pohyblivého objektivu, který při se při vypnutém fotoaparátu zasouvá do těla přístroje, spočívá v nestálých parametrech objektivu; při každém vysunutí je pozice optických členů objektivu mírně odlišná. To je nevýhodou zejména pro kalibraci objektivu, kalibrační prvky pak nejsou konstantní. Další nevýhoda nastává při použití v prašném prostředí. Prach a nečistoty zvířené rotory a usazené na objektivu jsou zaneseny do pohyblivých částí fotoaparátu, kde při pohybech objektivu působí abrazivně a dlouhodobě degradují kvalitu fotoaparátu. Ze stejných důvodů je vhodné vybrat objektiv s vnitřním ostřením, u něhož veškerý pohyb během ostření probíhá pouze uvnitř objektivu a nedochází ke změně délky tubusu ani k rotacím vnějších prvků objektivu. Změny parametrů objektivu může způsobit také pohyblivý člen

objektivu sloužící pro redukci vibrací a stabilizaci obrazu při pohybu. Doporučuje se raději používat objektivy bez stabilizačního systému, případně stabilizaci vypnout.

Pevná ohnisková vzdálenost

Objektivy s pevnou ohniskovou vzdáleností obecně přináší lepší obrazovou kvalitu při srovnání s objektivy s proměnnou ohniskovou vzdáleností (zoom objektivy). U zoom objektivů navíc hrozí riziko změny ohniskové vzdálenosti během snímání sekvence fotografií, což výrazně komplikuje zpracování dat a tvorbu odvozených produktů.

Manuální ostření

Možnost vypnout automatické ostření je důležitým požadavkem pro zajištění stálého zaostření fotografií. Při automatickém zaostřování může být každý snímek zaostřen jinak, což velmi znesnadňuje vytváření odvozených produktů, zejména detekci identických bodů v záběru a skládání snímků do mozaiky. Automatické zaostřování před exponováním každého snímku navíc prodlužuje čas mezi vydáním povelu k pořízení snímku a samotnou expozicí. V případě záběru s malým kontrastem může být zaostřovací čas velmi dlouhý, případně k zaostření vůbec nemusí dojít, a snímek je pak buď exponován rozostřený, nebo vůbec exponován není.

Rozlišení senzoru

Rozlišení senzoru (počet světločivných buněk) odpovídá počtu pixelů (obrazových bodů) pořízeného snímku. Je zřejmé, že větší množství pixelů představuje větší míru detailu ve fotografii. Samotné vysoké rozlišení senzoru ale nezaručuje vysokou kvalitu fotografií. Naopak, velké množství pixelů umístěných na senzoru malých rozměrů může být spíše kontraproduktivní.

Aby na senzor mohlo být umístěno velké množství pixelů, musí mít každý pixel velmi malé rozměry. Čím je plocha pixelu menší, tím méně světla na něj dopadne při exponování snímku a tím více musí být výstupní signál zesílen k vytvoření správně exponované fotografie. Výsledkem zesilování signálu je snížená obrazová kvalita, patrná zejména v přítomnosti šumu. Rozlišení senzoru musí být proto uvažováno zároveň s velikostí senzoru.

Velikost senzoru

Velikost senzoru má zásadní vliv na vlastnosti a kvalitu pořízených fotografií v několika různých ohledech.

Velikost senzoru spolu s ohniskovou vzdáleností objektivu determinuje zorný úhel. Šíře záběru při použití objektivu o dané ohniskové vzdálenosti je úměrná rozměru senzoru; čím větší senzor, tím širší záběr. Efekt velikosti senzoru na šíři záběru je popsán pomocí tzv. ekvivalentní (také efektivní) ohniskové vzdálenosti. Ekvivalentní ohnisková vzdálenost je ohnisková vzdálenost, jakou by měl objektiv se stejným zorným úhlem na fotoaparátu vybaveném senzorem o standardním rozměru 35 mm (tzv. full-frame). Objektiv o ohniskové vzdálenosti 50 mm má na full-frame fotoaparátu (fotoaparát vybavený snímačem o velikosti kinofilmového políčka) ekvivalentní ohniskovou vzdálenost 50 mm. Při použití na fotoaparátu se senzorem o polovičních rozměrech má ekvivalentní ohniskovou vzdálenost 100 mm – má stejnou šíři záběru, jakou by měl objektiv o ohniskové vzdálenosti 100 mm na full-frame fotoaparátu.

S velikostí senzoru souvisí hloubka ostrosti ve fotografii, neboli rozsah vzdáleností, v nichž se fotografovaný objekt jeví jako ostrý. Zatímco u malých senzorů bývá obvykle ostrá celá scéna, velké senzory (např. full-frame) při nastavení stejného clonového čísla vygenerují fotografie, v nichž zaostřený objekt kontrastuje s rozostřeným popředím i pozadím.

Větší senzory tvoří kvalitnější obrazy díky větší ploše každé jednotlivé buňky (pixelu) senzoru. Ploše pixelu je úměrný počet fotonů, které jsou pixelem senzoru zachyceny a převedeny na výsledný obraz. Menší počet fotonů musí být při přepočtu na obrazové hodnoty více násoben (zesilován), což vede ke snížené obrazové kvalitě a zvyšování šumu. Větší kvalitu obrazu u většího senzoru můžeme odvodit i ze statistického zákona velkých čísel. Čím větší je počet provedených měření (počet zachycených fotonů pixelem), tím více naměřená data (pixelová hodnota ve fotografii) odpovídají skutečnému stavu (skutečnému jasu scény).

S velikostí senzoru souvisí výraznost jevu zvaného difrakce. Difrakce je ohyb světla, který ve fotoaparátu nastává na hraně clony a způsobuje rozptýlení

paprsku světla. Ty pak na senzoru místo bodů vytvářejí plošné disky, čímž vzniká neostrost fotografie. Difrakce je přítomna vždy a nelze ji zcela eliminovat, její vliv je ale ve fotografii patrný zejména při silném zaclonění (vysoká clonová čísla) a u fotoaparátů s malým senzorem. V obou případech je příčinou malý otvor v cloně a tím pádem velký podíl světelných paprsků ovlivněných hranou clony.

Popsané vlivy velikosti senzoru lze shrnout do obecného konstatování, že u fotoaparátu s větším rozměrem senzoru lze očekávat vyšší obrazovou kvalitu. Menší hloubku ostrosti u velkých senzorů je možné kompenzovat dostatečným zacloněním, aby fotografovaná scéna byla ostrá v celém potřebném rozsahu. Negativa velkých senzorů jsou pouze dvě: větší hmotnost a vyšší pořizovací cena fotoaparátů s velkými senzory. Za rozumný kompromis zajišťující dostatečnou obrazovou kvalitu a přitom vyhovující cenou a hmotností zařízení jsou senzory formátu APS-C, jejichž rozměry odpovídají přibližně 2/3 rozměru full-frame senzoru.

Dynamický rozsah senzoru

Typická lesní scéna při pohledu shora má velký rozsah jasů. Osluněné koruny stromů jsou mnohonásobně jasnější než zastíněný povrch terénu v mezerách mezi stromy. Podíl mezi jasnějším a nejtmavším bodem scény se nazývá dynamický rozsah scény. Dynamický rozsah fotoaparátu je podíl nejvyššího a nejnižšího jasu, které byly senzorem fotoaparátu zachyceny v jedné fotografii, aniž by byly namapovány na čistě bílou (přepal) nebo čistě černou barvu (žádný signál). Aby byla scéna správně exponována ve světlech i stínech, je potřeba, aby senzor fotoaparátu měl větší dynamický rozsah, než je rozsah scény. V opačném případě dochází k přexponování (přepálení) jasných nebo podexponování tmavých míst scény – všechny vyšší jasy jsou namapovány na bílou, všechny nižší na černou barvu.

Získat informaci o dynamickém rozsahu konkrétního fotoaparátu nemusí být snadné, ne vždy výrobci tento parametr uvádějí. Obecně se dá říci, že větší dynamický rozsah mají senzory větších rozměrů (což opět souvisí s velikostí pixelů senzoru) a novější a kvalitnější senzory. Zatímco senzory zrcadlovek, systémových kompaktních a kvalitnějších kompaktních fotoaparátů budou mít

dostatečný dynamický rozsah pro zachycení lesní scény, levnější fotoaparáty nebo fotoaparáty mobilních telefonů mohou mít se zachycením jasů kontrastní lesní scény problémy.

V roce 2017 patří mezi nejvíce využívané senzory pro operativní snímkování lesních porostů fotoaparát Sony Alpha 6000, případně další modely řady Sony Alpha (5000, 5100), vybavené manuálním objektivem s pevným ohniskem značek Samyang nebo Voigtlander, dále kompaktní fotoaparát Ricoh GR2, kamera GoPro, případně fotoaparáty mobilních telefonů, např. Huawei Honor 9.

III.1.2 Určení základních parametrů leteckého snímkování

Určení výšky letu

Letová výška je jedním ze základních parametrů letu ovlivňujících kvalitu obrazového materiálu. Výběr optimální letové výšky vzhledem k technickým parametrům vybavení je kruciólní pro získání kvalitních záběrů a v důsledku také produktů odvozených z pořízených snímků.

Optimální letová výška je determinována volitelným parametrem: požadovaným prostorovým rozlišením snímku neboli rozměru části zemského povrchu reprezentovaným na digitálním snímku jedním obrazovým bodem, pixelem. Optimální letová výška dále závisí na technických parametrech použitého optického senzoru. Těmito ovlivňujícími parametry jsou rozlišení senzoru, jeho rozměry a ohnisková vzdálenost použitého objektivu.

Výpočet

Ohnisková vzdálenost objektivu spolu s rozměrem senzoru determinují zorný úhel (ZÚ) podle vzorce:

$$ZU = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{h}{2f} \right)$$

Kde ZU je zorný úhel, h je rozměr senzoru a f je ohnisková vzdálenost.

Čím větší je vzdálenost mezi senzorem a čočkou, která obraz láme, tedy ohnisková vzdálenost objektivu, tím menší je úhel záběru objektivu. Se zvětšujícím se senzorem se naopak zorný úhel rozšiřuje. Tyto dva parametry mohou být souhrnně popsány pomocí tzv. ekvivalentní ohniskové vzdálenosti objektivu pro full-frame senzor (ekvivalent 35 mm). To je fiktivní hodnota udávající ohniskovou vzdálenost objektivu, který by na standardním senzoru o rozměrech 35 x 24 mm měl tentýž zorný úhel.

Při známém zorném úhlu objektivu a vzdálenosti fotografovaného objektu od senzoru lze určit rozměr fotografovaného objektu:

$$l = 2 \cdot v \cdot \tan \frac{ZU}{2}$$

kde v je vzdálenost fotografovaného objektu od senzoru (tj. výška letu při svislém snímání povrchu z UAV) a l je skutečný rozměr fotografovaného objektu (délka zobrazené části povrchu). Rozměr objektu podělený počtem pixelů odpovídá rozměru části objektu, který je zaznamenán jedním pixelem snímku, a tedy zároveň představuje lineární vzdálenost mezi středy sousedních pixelů na zemi označovanou jako pozemní vzdálenost vzorků GSD (Ground Sampling Distance):

$$GSD = \frac{l}{r}$$

kde GSD je pozemní vzdálenost vzorků (představuje lineární vzdálenost mezi středy sousedních pixelů na zemi) a r je počet pixelů (délka řady), které zobrazují v rovině objektu rozměr d .

Tento vztah lze využít k výpočtu vzdálenosti senzoru od fotografovaného objektu takové, aby rozměr pixelu odpovídal předem definovanému prostorovému rozlišení:

$$v = \frac{l}{2 \cdot \tan \frac{ZU}{2}}$$

Dva vztahy definované rovnicemi lze zkombinovat a zjednodušit tak, že výsledný vztah již neobsahuje zorný úhel, pouze vstupní parametry pro jeho výpočet, tedy velikost senzoru a ohniskovou vzdálenost objektivu:

$$v = \frac{GSD \cdot r \cdot f}{h}$$

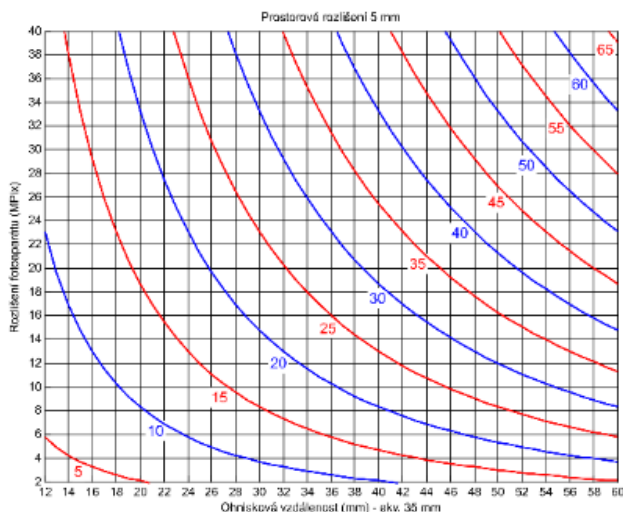
Jedná-li se o fotografování povrchu z bezpilotního prostředku, takto vypočítaná vzdálenost odpovídá takové letové výšce, kdy pixel snímku odpovídá části fotografovaného povrchu o předem definovaném rozměru.

Grafy

S využitím výše popsaných vztahů byla vytvořena série grafů pro určování výšky letu na základě rozlišení senzoru a ekvivalentní ohniskové vzdálenosti použitého objektivu pro různá požadovaná prostorová rozlišení snímků. Grafy byly vytvořeny s předpokladem standardního poměru stran snímku 3:2. Při použití senzoru o poměru stran 4:3 či 16:9 je výška letu pro získání snímků s tímž prostorovým rozlišením mírně odlišná; pro určení přesné výšky letu by bylo potřeba výšku letu odečtenou z grafu vynásobit konstantou 0,9806, resp. 1,0393. Pro praktické použití tak lze odlišnost mezi různými poměry stran senzoru zanedbat; letová výška se liší v řádu nízkých jednotek procent.

Prostorové rozlišení snímku je v těchto tabulkách průměrný rozměr jednoho pixelu na fotografovaném objektu. Vzhledem k tomu, že je jedná o centrální projekci, dochází ke geometrické deformaci pixelů. Skutečný rozměr pixelu na kraji snímku je tedy větší než deklarované prostorové rozlišení, zatímco pixely blízko středu snímků reprezentují část objektu o menším rozměru.

Vytvořená série grafů obsahuje grafy pro požadované prostorové rozlišení 1 mm, 5 mm, 10 mm, 50 mm a 100 mm.



Obrázek 1 Ukázka grafu pro určení výšky letu na základě známých parametrů fotoaparátu pro požadované prostorové rozlišení 5 mm

Určení vzdálenosti mezi následujícími snímky a rychlosti letu

Dalším ze základních letových parametrů je rychlost letu. Letová rychlost je významným faktorem ovlivňujícím kvalitu fotografií: zejména při zhoršených světelných podmínkách, kdy je potřeba pro zajištění správné expozice snímků exponovat delším časem, a při nízkých letových výškách, kdy je fotografovaný objekt je blízko senzoru, může vyšší rychlost letu být příčinou pohybové neostrosti ve snímcích. Objektivně posoudit kvalitu světelných podmínek a přizpůsobit jí rychlost letu podle předem definovaných pravidel není v reálné situaci možné, navíc v tomto ohledu má velký vliv kvalita konkrétního senzoru (možnost navýšení ISO citlivosti senzoru bez výrazného snížení kvality snímků) i objektivu (zejména světelnost a kresba objektivu při nižších clonách) použitých pro snímkování. Obecně lze říci, že při využití kvalitní techniky a výběru vhodného počasí pro snímkování není riziko pohybové neostrosti kritickým faktorem a nejdůležitějším kritériem stanovení rychlosti letu.

Frekvence snímání fotografií při dlouhodobém sekvenčním snímání je omezena, zejména rychlostí čipu zpracovávajícího snímky a rychlostí zápisu na

paměťovou kartu. Letová rychlost pak ovlivňuje především vzdálenost mezi pořízením jednotlivých fotografií, a tím překryv jednotlivých snímků. Právě překryv jednotlivých fotografií je důležitým parametrem pro možnost jejich dalšího zpracování a různé metody zpracování vyžadují předem známé procento překryvu sousedních fotografií. Požadovaný překryv fotografií je tedy hlavním limitujícím faktorem pro rychlost letu, v závislosti na možnostech rychlosti sekvenčního snímání použitého fotoaparátu.

Výpočet

Ohnisková vzdálenost objektivu spolu s rozměrem senzoru determinují zorný úhel (ZÚ) podle vzorce:

$$ZU = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{h}{2f} \right)$$

kde ZU je zorný úhel, h je rozměr senzoru a f je ohnisková vzdálenost.

Při známém zorném úhlu objektivu a vzdálenosti fotografovaného objektu od senzoru (v tomto případě konkrétně výšce letu) lze určit rozměr fotografovaného objektu (záběru senzoru):

$$l = 2 \cdot v \cdot \tan \frac{ZU}{2}$$

kde v je vzdálenost fotografovaného objektu od senzoru (výška letu) a l je skutečný rozměr fotografovaného objektu – délka záběru senzoru na povrchu země.

Pro dosažení požadovaného relativního překryvu dvou následujících snímků musí tedy vzdálenost mezi místy pořízení těchto snímků odpovídat:

$$d = l \cdot (1 - P_{rel})$$

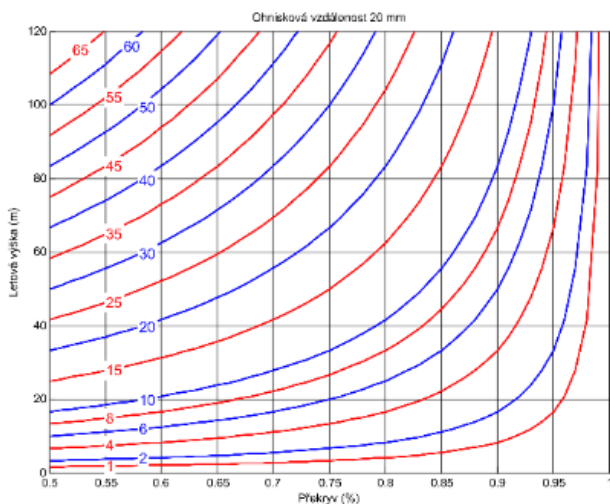
kde P_{rel} znamená relativní překryv dvou následujících snímků. Rychlost letu w je součinem vzdálenosti mezi snímky d a frekvence pořízení snímků $freq$.

$$w = d \cdot freq$$

Grafy

S využitím výše popsaných vztahů byla vytvořena série grafů pro určování rychlosti letu na základě požadovaného relativního překryvu následujících snímků a letové výšky. Jednotlivé grafy v sérii se liší ohniskovou vzdáleností (eq. 35 mm) použitého objektivu.

Grafy byly vytvořeny s předpokladem standardního poměru stran snímku 3:2 a s předpokladem pořizování snímků na šířku – delší strana snímku je kolmá na směr letu. Posledním předpokladem je dlouhodobá frekvence snímání fotografií 1 Hz neboli jeden snímek za sekundu. Vzhledem k možnostem současných fotoaparátů dlouhodobě snímat, zpracovávat snímky a ukládat na paměťovou kartu se jedná o rozumný předpoklad rychlosti snímání. Při použití fotoaparátu s možností rychlejšího záznamu snímků po celou dobu letu lze rychlost odečtenou z grafů vynásobit počtem snímků za sekundu, které je daný fotoaparát schopen dlouhodobě zaznamenávat.



Obrázek 2 Ukázka grafu pro odečtení rychlosti letu pro ohniskovou vzdálenost objektivu 20 mm

Vytvořená série grafů obsahuje grafy pro ohniskovou vzdálenost použitého fotoaparátu 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm a 50 mm.

Určení vzdálenosti mezi následujícími snímky a rychlosti letu pro fotogrammetrické zjišťování trojrozměrné struktury lesa

Důležitou součástí efektivního zjišťování trojrozměrné struktury lesních porostů je úspěšné zmapování povrchu terénu viditelného z UAV v mezerách v porostním zápoji. Aby mohl být povrch terénu zrekonstruován, identické spojovací body (tzv. tie points) musí být identifikovány nejméně na třech fotografiích pořízených z různých úhlů. Přitom, jak ukazuje publikace (Surový, Yoshimoto, & Panagiotidis, 2016), přesnost určení pozice spojovacích bodů signifikantně roste s počtem fotografií, v nichž je daný bod identifikován, a to až do počtu osmi fotografií pořízených z různých úhlů. Pro mapování struktury lesních porostů musí být při odvozování rychlosti letu vzata do úvahy i možnost detekovat charakteristické body terénu v předem definovaném počtu fotografií. Tato možnost je definována úhlem nezakryté oblohy nad body v mezerách korunového zápoje, a tím výškou korunového zápoje nad terénem a rozměrem mezer.

Výpočet

Pozorovací úhel PU , v němž je viditelný konkrétní bod na terénu, je dán výškou korunového zápoje nad terénem v_k a rozměrem mezery v zápoji g :

$$PU = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{g}{2v_k} \right)$$

kde v_k znamená výšku korunového zápoje nad terénem a g je velikost mezery v korunovém zápoji, umožňující vidět konkrétní bod na zemi.

Délka dráhy s , z níž je během letu bezpilotního prostředku pozorovatelný daný bod na zemi mezerou v korunovém zápoji, je určen pozorovacím úhlem PU a výškou letu v :

$$s = 2 \cdot v_k \cdot \tan \frac{PU}{2}$$

neboli

$$s = \frac{g \cdot v}{v_k}$$

Během letu po dráze délky s má být pořízeno celkem n fotografií, v nichž bude identifikovatelný konkrétní bod na povrchu terénu. Počet n fotografií je uživatelský parametr, jehož hodnota by měla být alespoň 3, což je nejmenší počet fotografií, z nichž lze vypočítat pozici bodu, a nikoliv větší než 8, neboť vyšší počet fotografií je již nadbytečný a nepřináší další zpřesňování vypočítané pozice bodu.

Vzdálenost mezi následujícími snímky je tedy určena jako

$$d = \frac{s}{n}$$

a rychlost letu w je součinem vzdálenosti mezi snímky d a frekvence pořízení snímků *freq*.

$$w = d \cdot freq$$

Grafy

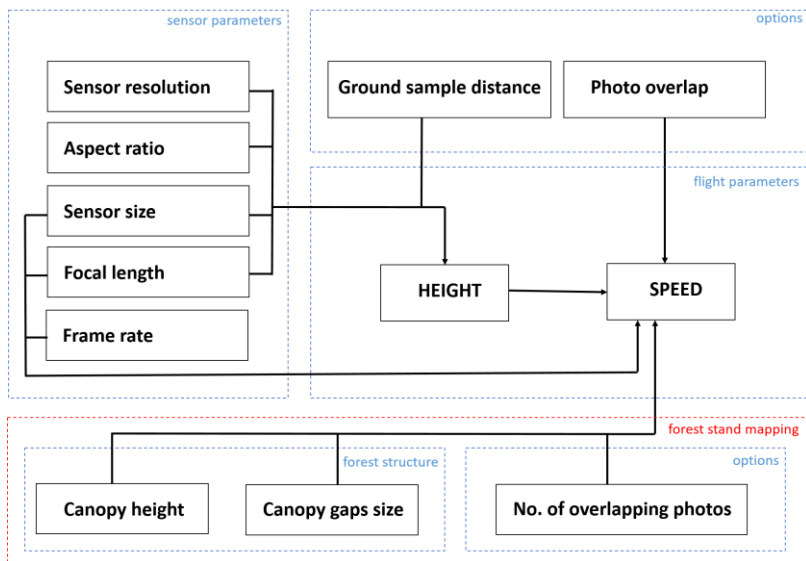
S využitím výše popsaných vztahů byly vytvořeny tři série grafů pro určování rychlosti letu pro mapování trojrozměrné struktury lesních porostů na základě parametrů korunového zápoje (velikost mezer v zápoji) a letové výšky. Série grafů jsou odlišeny požadovaným počtem fotografií zobrazujících identický bod; jednotlivé grafy v sérii se liší výškou korunového zápoje nad terénem.

Grafy byly vytvořeny s předpokladem dlouhodobé frekvence snímání fotografií 1 Hz neboli jeden snímek za sekundu. Vzhledem k možnostem současných fotoaparátů dlouhodobě snímat, zpracovávat snímky a ukládat na paměťovou kartu se jedná o rozumný předpoklad rychlosti snímání. Při použití fotoaparátu s možností rychlejšího záznamu snímků po celou dobu letu lze rychlost odečtenou z grafů vynásobit počtem snímků za sekundu, které je daný fotoaparát schopen dlouhodobě zaznamenávat.

Tři série grafů odpovídají požadovaným 3, 5 a 7 snímkům zobrazujícím identický bod. Každá série obsahuje celkem pět grafů definujících rychlost (resp. vzdálenost mezi středy následujících fotografií) pro výšku zápoje 10, 15, 20, 25 a 30 m.

Interaktivní nástroj pro výpočet parametrů letu

Pro interaktivní a uživatelsky snadné určení parametrů letu byl vytvořen webový nástroj FLIP COIN Tool (FLight Parameter Calculator – Online Interactive Tool).



Obrázek 3 Pracovní postup webového nástroje FLIP COIN Tool

Jedná se o interaktivní nástroj nahrazující použití vytvořených grafů. Na základě identických výpočtů je výška letu odvozena z vlastností použitého senzoru a optického vybavení vzhledem k požadované pozemní vzdálenosti vzorků (GSD). Pro výpočet rychlosti letu je využita předem určená letová výška, požadovaný podélný překryv snímků a parametry senzoru. V módu určení rychlosti letu pro fotogrammetrickou rekonstrukci 3D struktury lesních porostů vstupují do výpočtu také parametry porostu.

Výstupem webového nástroje je hodnota maximální letové výšky pro zajištění snímků s požadovanou pozemní vzdáleností prvků a hodnoty maximální vzdálenosti mezi následujícími fotografiemi a z ní odvozené maximální rychlosti letu. Tytéž výstupní parametry jsou zobrazeny v grafické formě v rámci vygenerovaných grafů.

FLIP COIN Tool

FLight Parameter Calculator - Online Interactive Tool

Sensor parameters

Resolution MPx

Aspect ratio

☒ 3 : 2

☐ 4 : 3

☐ 16 : 9

Focal length

☒ Full Frame Equivalent

☐ Real

Focal length mm

Focal length mm

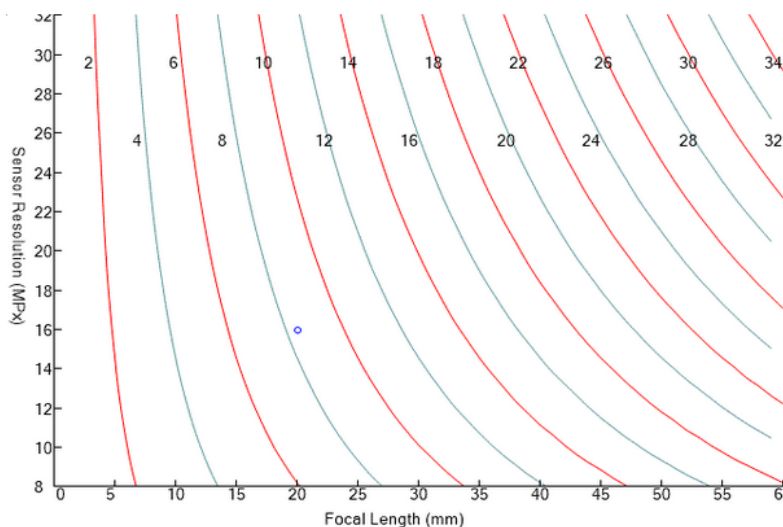
Sensor size:

x mm

Flight height calculation

Desired ground sampling distance mm

Maximum flight height for given resolution = 8.4 m



Obrázek 4 Grafické rozhraní nástroje FLIP COIN Tool

III.1.3 Nastavení parametrů snímkování

Cílem je získat správně exponovanou fotografii při zajištění dostatečné obrazové kvality a ostrosti snímků. Expozici můžeme ovlivnit nastavením třech parametrů – clony, expozičního času a citlivosti ISO. Změna každého z parametrů ale ovlivňuje nejen expozici, nýbrž také kvalitu výsledných fotografií.

ISO

Hodnota ISO vyjadřuje zdánlivou citlivost senzoru fotoaparátu na světlo. Fotony dopadající na světločivnou buňku senzoru generují elektrický náboj. Ten je následně převeden na pixelovou hodnotu fotografie pomocí funkce (tzv. převodní charakteristika) simulující logaritmickou odezvu lidského oka na jas. Při zvýšení hodnoty ISO je stejný elektrický náboj převeden na vyšší pixelovou hodnotu. Zvýšíme-li ISO dvojnásobně (např. z hodnoty 100 na 200), získáme stejně exponovanou fotografii, jako kdybychom vyfotili scénu s dvojnásobným jasem. Stejný efekt má také dvojnásobné prodloužení expozičního času nebo odclonění o jeden krok (snížení clonového čísla 1.4 krát, což odpovídá dvojnásobnému zvětšení plochy otvoru clony). Zvýšení ISO umožňuje získat správně exponovanou fotografii i při horších světelných podmínkách.

Zvýšením ISO tedy dochází k zesílení analogového signálu senzoru před převedením signálu na pixelové hodnoty fotografie. Každé zesílení signálu s sebou ale nese snížení kvality, zejména zvýraznění šumu. Dá se říci, že zesilování signálu pomocí zvýšení hodnoty ISO při horších světelných podmínkách má stejný efekt jako zesilování signálu při zaznamenání scény senzorem malých rozměrů. V obou případech na senzor dopadne malé množství fotonů a výsledný obraz je vytvořen zesílením slabého zachyceného signálu.

Pro zajištění kvalitních snímků je potřeba nastavit ISO na nízké hodnoty. Maximální ISO, při němž ve fotografii ještě není patrné snížení obrazové kvality, je závislé na kvalitě snímače. Obvykle lze ISO zvyšovat až do hodnoty 400, aniž by byl v obraze patrný zvýšený šum. Správně nastavené ISO je minimální

hodnota, která umožňuje při dané cloně a expozičním čase správně exponovat snímek. Teprve při zhoršených světelných podmínkách zvyšujeme ISO až do hodnoty 400. Při předpokladu měnících se světelných podmínek během letu je možné zvolit automatické nastavení ISO. V každé fotografii se tak ISO může mírně lišit tak, aby každý snímek při pevně nastavené cloně a expozičním čase byl správně exponován.

Clona

Clona je otvor, kterým vniká světlo do optické soustavy fotoaparátu. Nastavení clony ovlivňuje expozici a ostrost fotografie.

Množství světla dopadajícího na senzor je úměrné ploše otvoru clony. Při větším zaclonění dopadá na senzor méně světla. Velikost otvoru clony se vyjadřuje pomocí tzv. clonového čísla. Clonové číslo je poměr ohniskové vzdálenosti použitého objektivu a efektivního průměru clony (otvoru, kterým vniká světlo). Clonové číslo se obvykle mění v geometrické řadě, kdy každý následující člen má hodnotu 1.4 (tj. $\sqrt{2}$) násobně větší než předcházející (1; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22). Plocha otvoru clony je tak při zvětšení clonového čísla o jeden krok poloviční. Pro zachování stejné expozice při zvětšení clonového čísla o jeden krok je potřeba dvojnásobně prodloužit expoziční čas.

S rostoucí clonou se zvětšuje hloubka ostrosti fotografie, subjektivní zóna ostrosti před a za zaostřenou vzdáleností. Při minimální cloně bude ostrý pouze úzký pás kolem roviny zaostření, při zvyšování clony se zóna ostrosti rozšiřuje. Při velkých clonových číslech se může zóna ostrosti rozšířit na celý rozsah vzdáleností ve fotografii.

Clona ovlivňuje i kvalitu kresby objektivu. Při plně otevřené cloně se nejvíce projevují optické vady objektivu, při zaclonění se vliv optických vad snižuje. Vyšší clona ale nutně neznamená ostřejší obraz. Se stoupajícím clonovým číslem (menší otvor pro průchod světla) dochází k výraznějšímu vlivu difrakce a obraz ztrácí ostrost, zejména v zaostřené vzdálenosti. Nejostřejší fotografie tak dosáhneme při takovém zaclonění, kdy je minimalizováno souhrnné rozostření dané oběma vlivy. Tato hodnota zaclonění je označována termínem *sweet spot*

a je individuální pro každý objektiv. Obvykle ale objektiv nejlépe vykresluje v oblasti středního zaclonění, při clonových číslech mezi 5,6 až 8.

Clonové číslo 5,6 je obvykle vhodné nastavení clony pro snímkování lesních porostů. Tato clona je obvykle blízka sweet spot objektivu, což zaručuje optimální kresbu. Zároveň hloubka ostrosti při takovém zaclonění je dostatečná na to, aby při standardním snímkování lesních porostů zóna ostrosti pojmla jak špičky korun, tak povrch terénu. Větší zaclonění s sebou nese jak postupně rostoucí vliv difrakce, tak nepříjemný efekt nutnosti prodlužovat expoziční čas či zvyšovat ISO pro docílení správné expozice.

Expoziční čas

Expoziční čas ovlivňuje expozici fotografie jednoduchým způsobem: čím déle je senzor fotoaparátu exponován, tím více světla dopadne na snímač a tím je fotografie světlejší. Expoziční čas pro správnou expozici je nepřímo úměrný jasu scény – snížili-li se jas scény na polovinu, je nutné prodloužit expoziční čas na dvojnásobek. Rizikem při použití delších expozičních časů je vznik pohybové neostrosti. Pro eliminaci neostrosti musí být expoziční čas natolik krátký, aby pohyb objektů v záběru nebyl během expozice pozorovatelný.

Při snímkování z bezpilotních prostředků je možné odhadnout maximální expoziční čas, při kterém nedojde pohybem dronu k pohybové neostrosti, z rychlosti letu a pozemní vzdálenosti vzorků (GSD). Aby pohyb nebyl ve fotografii patrný, je potřeba, aby vzdálenost, kterou bezpilotní prostředek urazí během exponování snímku, byl menší než polovina GSD. Maximální expoziční čas lze tedy vyjádřit jako:

$$t_{max} = \frac{GSD}{2 \cdot v}$$

kde GSD je pozemní vzdálenost vzorků (představuje lineární vzdálenost mezi středy sousedních pixelů na zemi) a v je rychlost bezpilotního prostředku. Při pořizování snímků s GSD 0,02 m z bezpilotního prostředku letícího rychlostí 5 m/s, je maximální expoziční čas zabezpečující neznatelnou pohybovou neostrost roven 1/500 s. Je potřeba počítat také s tím, že dochází nejen k lineárnímu pohybu posunem bezpilotního prostředku, ale také ke kývání,

případně rotaci. Obecně platí, že při pohybu bezpilotního prostředku by neměl být expoziční čas nikdy delší než 1/400 s.

Obrazový formát

Výstupem procesu exponování senzoru a zpracování signálu počítačem fotoaparátu je obrazový soubor. Standardním výstupním formátem fotografií je formát JPEG, který využívá stejnojmennou ztrátovou kompresi pro zmenšení datové velikosti souboru. Pro fotogrammetrické mapování je důležité maximalizovat kvalitu snímků a míru detailu. Při nastavování velikosti a kvality snímku proto vždy volíme maximální rozlišení snímku a nejvyšší kvalitu (nejmenší kompresi) obrazu.

Lepší fotoaparáty umožňují ukládat snímky také ve formátu nezpracovaného signálu ze snímače převedeného do digitální podoby (tzv. raw formáty). Jedná se o bezztrátovou formu uložení dat, která vyžaduje postprocessing (následné zpracování) v počítači, aby byla převedena do obrazového souboru. Konverze raw souborů do výsledné fotografie poskytuje vysoký stupeň uživatelské kontroly a umožňuje provádění editací bez destruktivních změn v obraze. Počítače navíc obvykle disponují lepším výpočetním výkonem a delším časem na zpracování než fotoaparáty, při zpracování raw fotografií tak mohou být aplikovány složitější a náročnější algoritmy odstranění šumu či doostření, navíc s plnou uživatelskou kontrolou, pro dosažení kvalitnějších fotografií s lepším vykreslením detailů. Raw formáty jsou schopné uchovat vyšší dynamický rozsah v porovnání s JPEG formátem. Při vhodné úpravě umožňuje získat snímek s lepší kresbou detailů ve světlech a ve stínech, což je pro fotografování lesních porostů velkou výhodou. Nevýhodou raw formátů je výrazně větší datová velikost souborů a tím nároky na uchování jak v kartě fotoaparátu, tak následně v počítači.

Pokud je fotoaparát vybaven možností ukládat data v raw formátu, je vhodné tuto možnost využít. Při následném zpracování je možné dosáhnout kvalitnějších výsledků, obvykle i při využití dávkového zpracování fotografií s jednotným nastavením editace a konverze.

III.2 Postup snímkování pomocí UAV

III.2.1 Plánování leteckých prací

V rámci plánování snímkování zájmového území musí pilot UAV provést následující bezpečnostní opatření:

- Zkontrolovat předpověď počasí pro daný den a čas v oblasti operace. Není možné provádět lety, pokud prší, sněží nebo vane silný vítr (> 12 m/s). Předpověď počasí spolu s detailní předpovědí větru poskytuje webová služba a mobilní aplikace Windy nebo Windguru, podrobnou předpověď počasí nabízí také The Weather Channel.
- Prozkoumat předem oblast operace pomocí Google Earth, Google Maps nebo jakéhokoli jiného dostupného mapového zdroje, místních mapových dat, nebo pomocí plánovacího a řídicího letového softwaru.
- Vyhodnotit a naplánovat potenciální místa pro nouzová přistání pomocí plánovacího a řídicího letového softwaru. Dostupnost ploch vhodných pro nouzová přistání by měla být brána v potaz jako prioritní pro plánování letu. Pokud je to možné, místa vhodná pro nouzová přistání mohou být buď nahrána do systému. Pilot se s jejich umístěním má seznámit dopředu, aby se včasným vyhodnocením jejich vhodnosti předešlo problémům.
- Vzít v potaz potenciální hrozby a nebezpečné objekty (elektrické vedení, antény, stromy, budovy, chodci, doprava apod.). Všechny faktory jsou synchronizovány při plánování výchozí pozice a oblastí nouzového přistání.
- Ověřit, že operace není plánována v bezletové zóně nebo v zóně s omezením létání. Pro ověření lze využít webovou mapovou službu AisView, kterou provozuje Řízení leteckého provozu ČR, s.p.
- Ověřit, že operací nebudou narušeny lidské aktivity.
- Zkontrolovat, zda by jakákoli aktivita v oblasti mohla ovlivnit nebo zabránit operaci.
- Předem zvážit trvání a rozsah operace, a případně oznámit její konání oznámit příslušným úřadům minimálně 12 hodin před operací.
- Použít reflexní vestu, pokud bude operace probíhat na veřejném místě s pravděpodobným výskytem veřejnosti.

Výběr lokality pro pozemní stanici by se měl řídit pravidly vyplývající z doplňku X – Bezpilotní systémy předpisu L 2 – Pravidla létání vydaného Ministerstvem dopravy ČR, v platném znění.

- Při plánování lokality vzít do úvahy legislativní omezení provozování UAV (doplněk X, znění roku 2017):
 - Minimální vzdálenost od osob 50 m
 - Minimální vzdálenost od budov 100 m
 - Minimální vzdálenost od hustě zastavěného území 150 m
 - Neprovozovat let podél nadzemních dopravních staveb, inženýrských a telekomunikačních sítí
 - Výhled na UAV po celou dobu naplánovaného letu
- Pro analýzu nového operačního místa použít Google Earth nebo jiný dostupný mapový podklad oblasti. Za pomoci mapových informací vyhodnotit možnosti a alternativy (výchozí poloha, nouzové přistávací plochy) spolu s potenciálními hrozbami (elektrické vedení, antény, stromy, budovy, doprava, lidé, nemocnice, letiště apod.). Synchronizovat všechny faktory pro stanovení předběžného plánu zahrnujícího výchozí polohu (jednu nebo více alternativních) a nouzové přistávací plochy.
- Pro zvýšení efektivity leteckého mapování je možné před zahájením leteckých prací vytvořit mapu vzdušného prostoru zobrazující rozsah potenciálních operačních míst splňující podmínky pro umístění operačního místa pro mapovanou lokalitu, zejména přímý výhled na UAV během letu. Tato mapa je vypočítána na základě digitálního modelu povrchu.

Přímo na místě je nutné ověřit, zda bylo teoretické plánování operace provedeno dobře a zda nebyly narušeny podmínky provedení letu:

- Ověřit skutečné počasí v daný čas na místě letu. Pokud prší, sněží nebo vane silný vítr (> 12 m/s), ukončit naplánovaný let.
- Ověřit, že nedošlo ke změnám v charakteru místa. Změnit letový plán a umístění pozemní stanice a nouzových přistávacích ploch, pokud byla zjištěna nějaká změna (nové budovy, stavební práce, práce na silnici, společenské akce apod.).

III.2.2 Vykonání leteckého snímkování

Příprava a kontrola vybavení před odjezdem do terénu

Před odjezdem do terénu, nejlépe den před operací zkontrolovat veškeré vybavení, které bude použito:

- Zkontrolovat UAV – funkčnost motorů, vrtule bez poškození, ramena, správné připevnění a připojení všech součástí.
- Zajistit plné nabití baterií pro UAV a pro dálkové ovládání.
- Zkontrolovat aktuálnost firmwaru v UAV i vysílači a kompatibilitu verzí. Zkontrolovat funkčnost softwaru pro plánování letu.
- Zkontrolovat spojení mezi UAV a PC nebo mobilním zařízením.
- Zkontrolovat fotoaparát – plné nabití baterií, náhradní baterie podle rozsahu operace, paměťové karty s dostatečnou kapacitou, funkčnost zařízení pro spouštění snímkování.
- Zkontrolovat počítač – plně nabité baterie, dostatečná kapacita disku pro zálohování fotografií, spojení s UAV.

Pro usnadnění práce v terénu je vhodné dopředu naplánovat a uložit letovou trasu. Letová trasa má být editovatelná, aby mohla být na místě upravena, budou-li v terénu zjištěna fakta znemožňující let po původní naplánované trase.

Připravit a zkontrolovat další vybavení, bude-li potřeba – terče pro pozemní kontrolní body, GNSS přístroj pro zaměření pozic kontrolních bodů apod.

Předletová příprava v terénu

- Pilot posoudí svou kondici a zhodnotí, zda je schopen provést plánovaný úkol. V případě, že aktuální zdravotní stav a kondice pilota může ovlivnit bezpečnost letu, let by měl být odložen.
- Zkontrolovat, že je vše podle plánu, předpověď počasí souhlasí a nehrozí žádná nová rizika.
- Zaznamenat pozici GPS.
- Provést kalibraci kompasu UAV.
- Zkontrolovat, že veškeré vybavení, které má být použito, je na místě a povést jeho předletovou kontrolu:
 - Správně upevněná a zapojená baterie.
 - Správně upevněné motory, vrtule, kryty.
 - Správné uchycení ramen.

- Funkční radiové a datové spojení.
- Zkontrolovat upevnění fotoaparátu k UAV, přítomnost paměťové karty, zaostření, expoziční parametry.
- Vše probíhá podle letového plánu, ovládací software a UAV je připraven a spojení je navázáno.
- UAV má zafixovanou GPS pozici.
- Je vydán signál, že UAV je připraveno ke startu.

Provedení snímkovacího letu

- UAV je připraven ke vzletu na zemi ve výchozí pozici.
- Do UAV je nahrána letová trasa pro sběr dat.
- Zaznamenání výchozí pozice (Home point) a automatický nebo manuální start UAV. V případě komplikovanějších podmínek (blízkost překážek, vítr) je doporučeno provést vzlet UAV manuálně a automatický pohyb UAV zahájit v bezpečné vzdálenosti od překážek.
- UAV letí na počáteční bod trasy definovaný pozicí a výškou.
- Automatické nebo manuální řízení UAV nad oblastí letu během sběru dat.
- Po dokončení sběru dat automatický návrat do výchozí pozice (Home Point).
- Ověřit, že je na výchozí pozici, vše připraveno na přistání. Automatický nebo manuální přistávací postup.
- Odpojit baterii ihned po přistání.

Protokolování a stažení dat

- Po ukončení mise UAV náležitě uložit do přepravního/skladovacího boxu.
- Zaznamenání letu. Záznam o letu obsahuje všechny nezbytné informace (datum a čas, letový čas, poznámky, povětrnostní podmínky, odezvu UAV) a popis neobvyklých situací a nežádoucích incidentů. Některé modely UAV podrobně zaznamenávají celý průběh letu. Tyto záznamy slouží jako letová kniha a není potřeba vytvářet další letový protokol.
- Zpět v kanceláři všechna letová data stáhnout z UAV pomocí paměťové karty, Bluetooth nebo přes USB připojení, letovou zprávu zapsat a archivovat ve složce z dané mise.
- Všechny snímky uložit do PC pro editaci a zpracování.
- Provést technickou kontrolu UAV a ověřit, že je připraven pro další úkol.

Hlášení havárií, nesprávného chování letounu a různých typů selhání

- V případě nehody, kde je zraněn člověk, by měla být kontaktována zdravotnická služba a policie, a o nehodě by měl být okamžitě informován UCL nebo jiný orgán, od kterého má subjekt provádějící monitoring povolení k použití UAV.
- V případě nehody pouze s materiální škodou by měli být kontaktováni všichni zúčastnění (poškozený, vlastník pozemku, policie, hasiči atd.)

III.3 Zpracování snímků

Zálohování

Před zahájením zpracování fotografií je doporučeno zálohovat celou sadu pořízených snímků na externí disk, server nebo do cloudu pro případ, že by soubory byly během manipulace poškozeny nebo ztraceny.

Export z raw formátu

Pokud byly snímky zaznamenány v tzv. raw formátu, je potřeba před dalším zpracováním provést tzv. postprocessing a následně fotografie vyexportovat do běžně zpracovatelného formátu JPEG pomocí vhodného softwaru (Zoner Photo Studio, Adobe Photoshop, Adobe Phtoshop Lightroom, příslušný software dodávaný výrobcem fotoaparátu). Při exportu raw souborů je nutné dbát zejména na správné nastavení redukce šumu, která při snímání do formátu JPEG probíhá automaticky ve fotoaparátu. Nízká úroveň redukce šumu může mít za následek zhoršenou úspěšnost automatické detekce identických bodů ve snímcích v důsledku narušení charakteristických skupin pixelů šumem; naopak příliš silná filtrace šumu rozostřuje hrany a snižuje úroveň detailu ve snímku. Vhodné je před exportem provést vylepšení a vyrovnání jasů snímků, zejména pokud byly expoziční parametry nastaveny manuálně a v průběhu snímkování došlo ke změně světelných podmínek. Pro zpracování většího počtu snímků je vhodné využít automatické dávkové zpracování raw fotografií.

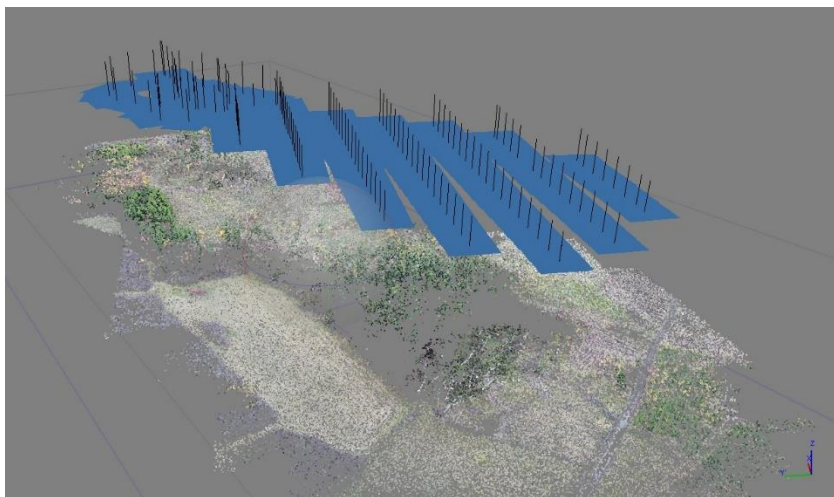
Odstranění nekvalitních fotografií

Přítomnost rozmazaných nebo nekonzistentních fotografií ve zpracovávaném souboru může negativně ovlivnit zarovnání celé sady fotografií před tvorbou trojrozměrného bodového mračna nebo ortomozaiky. Před samotným zahájením zpracování fotografií je doporučeno nekvalitní fotografie odstranit.

Pro identifikaci rozmazaných fotografií ve větších souborech mohou být využity funkce automatické detekce rozmazání umožňující identifikovat potenciálně problematické fotografie.

Zarovnání fotografií a tvorba produktů

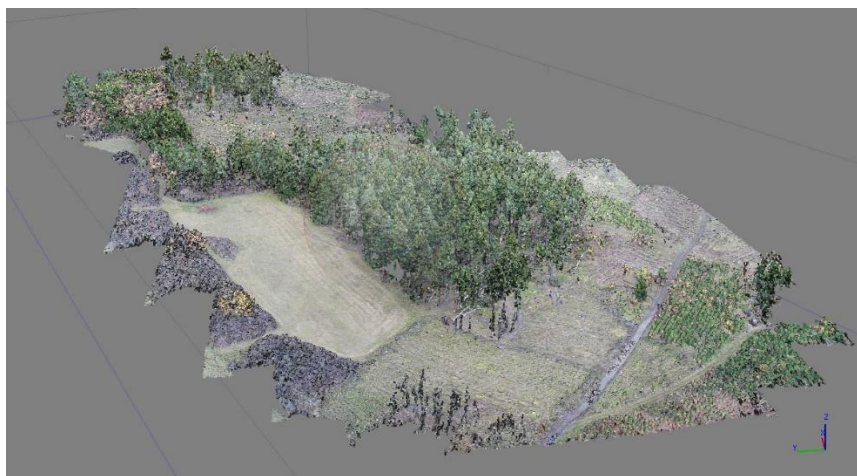
Zarovnání pořízených fotografií a vygenerování trojrozměrného bodového mračka nebo ortomozaiky je realizováno pomocí některého z komerčně nebo volně dostupných programů pro blízkou průsekovou fotogrammetrii. V roce 2017 jsou k dispozici komerční software Agisoft PhotoScan, RealityCapture nebo Pix4D nabízející desktopový software i cloudovou službu zpracování dat. Z nekomerčních produktů lze využít programy VisualSFM nebo MicMac. Samotný proces zpracování fotografií a vytvoření trojrozměrného bodového mračka nebo ortomozaiky je závislý na zvoleném softwaru. Podrobný postup a možnosti nastavení jsou popsány v manuálu konkrétního softwaru.



Obrázek 5 Pozice fotoaparátu během snímkování a mračno uzlových bodů (tie points)

Postup tvorby zmíněných produktů je prakticky totožný pro všechny programy. V první fázi je vytvořeno trojrozměrné mračno uzlových bodů (tzv. tie points) nalezených pomocí algoritmů SIFT, SURF apod., které slouží pro zarovnání

pořízených fotografií. Na základě vybraných bodů je možné optimalizovat zarovnání fotografií. Po zarovnání fotografií je vygenerováno husté bodové mračno podrobných bodů. Každý bod je definován souřadnicemi v 3D prostoru a souřadnicemi v barevném prostoru (obvykle RGB) definujícími barvu bodu. Body hustého bodového mračna reprezentují povrch objektů ve snímcích v trojrozměrném prostoru a mohou sloužit pro rekonstrukci trojrozměrné struktury lesních porostů nebo pro odvození digitálního modelu povrchu (DSM – digital surface model) a digitálního modelu terénu (DTM – digital terrain model). V dalším postupu je z trojrozměrného mračna bodů vygenerována polygonová síť (mesh) představující generalizovaný povrch snímaných objektů. Na polygonovou síť je namapována textura objektů získaná z fotografií a následně je vypočítán svislý průmět obarvené sítě do horizontální roviny, tedy ortomozaika. Ortomozaika představuje obrazovou mapu snímaného území po odstranění geometrického zkreslení způsobeného projekcí fotografovaných objektů na senzor a geometrickou distorzi objektivu.



Obrázek 6 Bodové pole popisující trojrozměrné pozice povrchu objektů

Georeferencování

V případě, že jsou pořízené snímky geotagované (je známa pozice jejich pořízení, nejčastěji ve formě GPS souřadnic zaznamenaných v EXIFu fotografie), probíhá georeferencování bodového mračna i ortomozaiky automaticky během

zpracování fotogrammetrickým softwarem. Výsledný produkt je pak lokalizován v rámci globálního souřadnicového systému.

Pro fotografie bez zaznamenané pozice je nutné provést georeferencování pomocí tzv. vlíčovacích bodů. Jedná se o značky jednoznačně identifikovatelné na snímcích, jejichž přesná pozice v polohovém a výškovém souřadnicovém systému může být určena pomocí pozemních metod měření. Jako vlíčovací body mohou být použity jednoduché kříže, které jsou identifikovatelné i při malém prostorovém rozlišení snímků (Mikita, Janata, & Surový, 2016; Puliti et al., 2015), nebo unikátní markery, které poskytuje např. software Agisoft PhotoScan. Tyto markery jsou ve snímcích manuálně nebo automaticky (ve druhém případě) identifikovány a jsou jim přiřazeny souřadnice požadovaného souřadnicového systému.



Obrázek 7 Část ortomozaiky zobrazující porost po větrné kalamitě

Pro dostatečné prostorové určení a ortorektifikaci produktů je potřeba, aby vlíčovací body byly rozmístěny rovnoměrně po celém rozsahu snímaného území; především je potřeba zajistit přítomnost vlíčovacích bodů na okrajích snímkaného území, neboť extrapolace transformačních funkcí mimo rozsah daný měření může způsobit chyby vysokých hodnot v kalibraci a ortorektifikaci. Teoreticky je minimální konfigurací trojice vlíčovacích bodů

netvořících přímků. V praxi jsou používány minimálně čtyři vlíčovací body v rozích snímkaného území s preferencí dalších podpůrných vlíčovacích bodů uvnitř plochy pro malá území (do 0,5 ha); v případě větších ploch roste i počet vlíčovacích bodů.

Vlíčovací body jsou automaticky nebo manuálně identifikovány ve fotografiích během jejich zpracování fotogrammetrickým softwarem. Změřené 3D pozice vlíčovacích bodů jsou vloženy do softwaru a slouží k provedení korekcí automatického zarovnání snímků a k referencování výsledného bodového mračka a ortomozaiky.

Georeferencovaná ortomozaika může být zobrazena pomocí GIS programů nebo webových mapových služeb přímo na základní nebo letecké podkladové mapě, což poskytuje možnost prohlížení a vyhodnocení ortomozaiky v prostorovém kontextu a provedení dalších analýz.

IV. Srovnání novosti postupů

Stav lesních porostů po hospodářských zásazích nebo po kalamitách je obvykle hodnocen pomocí kvalifikovaného odhadu během pochůzky po porostu. Odhad rozsahu poškození porostu po kalamitě nebo změn v porostu po hospodářském zásahu a úspěšnost hospodářského zásahu je obvykle založen na pozorování limitovaného vzorku, který nezaručuje reprezentativnost pro celý porost. Zvláště patrné je toto omezení při hodnocení rozsahu škod po kalamitě, kdy je nebezpečné a často i technicky nemožné provést pochůzku po porostu. V takových případech je rozsah škod odhadován pouze pohledem z vně porostu a odhad může být značně zavádějící.

Letecké snímky, ať už pořízené z bezpilotního letadla nebo klasického letadla s posádkou na palubě, poskytují ucelený přehled aktuální situace v lesním porostu a umožňují vyhodnotit úspěšnost hospodářských zásahů a výši škod po kalamitě v celém rozsahu porostu nebo většího zájmového území.

Oproti klasickému pilotovanému letadlu nabízí UAV velmi vysokou flexibilitu nasazení. UAV je připraveno k letu ihned po nabití baterií a naplánování tras a

operačních míst, a může tak být nasazeno v řádu hodin po kalamitě, přičemž na místo operace je dovezeno osobním automobilem. Možnost startu UAV je omezena aktuálními povětrnostními podmínkami, zejména srážkami, mlhou a silným větrem. Na druhou stranu, vzhledem k tomu, že snímkování je prováděno v malé výšce, obvykle do 100 m nad terénem, oblačnost není překážkou snímkování.

Další výraznou výhodou nasazení UAV je vysoké prostorové rozlišení snímků, nepřekonatelné běžným leteckým snímkováním. Prostorové rozlišení, závislé na konkrétním snímači a letové výšce, dosahuje obvykle centimetrových až subcentimetrových hodnot a umožňuje tak podrobné hodnocení hospodářských zásahů a škod po kalamitách.

Omezením využití UAV je doba letu limitovaná kapacitou baterií a maximální vzdálenost UAV od operátora limitovaná legislativou nedovolující let UAV mimo vizuální kontakt operátora. Avšak i při uvažování těchto omezení, efektivní letové doby 25 minut a maximální vzdálenosti od operátora 500 m je možné během jednoho letu získat obrazová data pro tvorbu ortomozaiky na území o rozloze až 40 ha.

Komerčně dostupná a snadno ovladatelná bezpilotní letadla jsou technologií několika posledních let, která pozvolna nachází široké uplatnění v ekologických i průmyslových aplikacích. Pro operativní letecké snímkování za účelem doplňování ortofotografií po hospodářských zásazích nebo po kalamitách v současnosti neexistuje alternativní technologie, která by umožnila provést snímkování se srovnatelným prostorovým rozlišením a časovou flexibilitou. Tato metodika popisuje postup operativního snímkování s využitím techniky dostupné v roce 2017. Zároveň jsme svědky překotného vývoje v oblasti bezpilotních letadel, obrazových senzorů, algoritmů zpracování obrazu i komerčního softwarového vybavení. Je proto potřeba sledovat vývoj a v souladu s technologickým pokrokem inovovat i popsané postupy.

V. Popis uplatnění certifikované metodiky

Detailní informace o změnách v lesních porostech způsobených hospodářskými zásahy nebo kalamitami jsou podmínkou pro správné a efektivní rozhodování o dalším zásahu do lesních porostů. Kontrola efektivity provedeného zásahu je podkladem pro rozhodnutí o opakování zásahu (např. vylepšení zalesněné holiny při výrazných ztrátách), správnost informací o rozsahu a rozložení škod v lesních porostech po kalamitách je podmínkou efektivního nasazení přiměřené techniky a optimalizace procesu likvidace následků kalamit. V obou případech může být neefektivní nasazení prostředků příčinou značných ekonomických ztrát. Zatímco detailní pochůzka po porostu je často buď časově neefektivní, nebo v případě rozsáhlejších kalamit dokonce nerealizovatelná, zatímco předložené postupy vedou k pohodlnému a rychlému získání podrobných údajů o rozsahu a umístění změn v porostech.

Popsané postupy jsou uplatnitelné pro mapování lesních porostů v libovolném měřítku, časově a finančně efektivní jsou ale při uplatnění v lokálním měřítku předem vytipovaných porostů lesního majetku. Časová i finanční efektivita je dána maximálním možným rozsahem území zmapovaného popsányými postupy. Maximální rozsah území zmapovaného během jednoho dne činí 200 až 300 ha, v závislosti na rozmístění mapovaných porostů a komplikovanosti přesunů.

Metodika operativního leteckého snímkování pro doplňování ortofotografií po hospodářských zásazích nebo po kalamitách může být uplatněna vlastníky lesů a lesními hospodáři za účelem získání podkladů pro optimalizaci nasazení prostředků pro provedení hospodářských zásahů a nahodilých těžeb nebo pro doložení škod při podávání žádosti o dotaci na obnovu lesních porostů po kalamitách. Zároveň může sloužit státní správě jako zdroj aktuálních údajů pro kontrolu vykazovaných hospodářských zásahů a škod. Široké uplatnění nalezne tato metodika v oblasti vědy a výzkumu, kde popsané postupy mohou být zdrojem cenných dat popisujících strukturu a stav lesních porostů.

VI. Ekonomické aspekty

Postupy popsané v této metodice umožňují významně snížit náklady na provedení podrobného mapování lesních porostů, které může být alternativně provedeno pomocí pozemního pozorování nebo klasického leteckého snímkování. Ekonomická výhodnost operativního snímkování pomocí bezpilotního letadla ve srovnání s pozemním průzkumem spočívá především ve výrazné redukci spotřeby pracovního času. Území o rozloze 10 ha může být zmapováno během jednoho letu UAV v čase nepřesahujícím 15 minut, zatímco kvantifikace rozsahu škod po kalamitě nebo zhodnocení hospodářského zásahu se stejnou přesností by představovalo spotřebu minimálně jedné hodiny pracovního času, v závislosti na průchodnosti terénu i násobně více. Popsané postupy představují výrazné snížení nákladů oproti klasickému pilotovanému leteckému snímkování, kde náklady běžně dosahují řádu tisíců až desetitisíců za hodinu snímkování, zejména pro aplikaci v malém měřítku. Pro operativní snímkování území o rozloze řádově stovek až tisíců hektarů je klasické letecké snímkování neefektivní, rentabilní je až při plošném nasazení pro rozlohy v řádu desítek čtverečních kilometrů.

Ekonomickou efektivnost popsaných postupů zvyšuje i operativnost použitých metod, která vede k urychlenému získání informací pro rozhodování a tím k zamezení ušlých zisků nebo navyšování škod způsobených prodlením v realizaci příslušných zásahů.

Základem pro určení ekonomické náročnosti postupů je pořizovací cena samotného bezpilotního letadla a další fixní náklady na jeho provozování. Kompletní bezpilotní systém vybavený kamerou a přenosem obrazu na zem je v současnosti možné pořídit už v cenové hladině kolem 30 tis. Kč. Náklady na evidenci UAV a získání povolení k létání od UCL činí přibližně 5 tis Kč, roční náklady na pojištění odpovědnosti z provozu UAV dosahují přibližně 10 tis. Kč. Výrazným počátečním nákladem je pořízení software na zpracování snímků umožňující tvorbu bodových mračen a ortomozaiky, který je v řádu desítek tisíc korun. Náklady na samotné snímkování už jsou tvořeny téměř výhradně personálními náklady na operátora UAV. Vzhledem k možnému rozsahu zmapované oblasti pak tyto náklady nepřesahují řád desítek korun na hektar zmapovaného území.

Vzhledem k současnému trendu vývoje technických prostředků použitých v metodice lze očekávat možnost rychlejšího a podrobnějšího zmapování lesních porostů během letu i navýšení délky letu bezpilotních prostředků, v důsledku legislativních omezení ale nelze do budoucna počítat s výrazným zvýšením rozlohy území zmapovaného během jednoho letu, a tím ani s výrazným zvyšováním efektivity mapování. I v blízké budoucnosti tak budou popsány metody určeny především pro operativní snímkování lesních porostů v malém a středním měřítku.

VII. Seznam použité literatury

Franklin, S. E. (2001). *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. CRC Press. Retrieved from <https://books.google.cz/books?id=OTwTdAi2OIQC>

Getzin, S., Nuske, R. S., & Wiegand, K. (2014). Using unmanned aerial vehicles (UAV) to quantify spatial gap patterns in forests. *Remote Sensing*, 6(8), 6988–7004. <https://doi.org/10.3390/rs6086988>

Goodbody, T. R. H., Coops, N. C., Marshall, P., Tompalski, P., & Crawford, P. (2017). Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes a review and case study. *Forestry Chronicle*, 93, 71–81. <https://doi.org/10.5558/tfc2017-012>

Grenzdörffer, G., Engel, a, & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 1207–1213. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.41.4.287>

Herwitz, S. R., Johnson, L. F., Dunagan, S. E., Higgins, R. G., Sullivan, D. V., Zheng, J., ... Brass, J. A. (2004). Imaging from an unmanned aerial vehicle: Agricultural surveillance and decision support. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.02.006>

Chianucci, F., Disperati, L., Guzzi, D., Bianchini, D., Nardino, V., Lastri, C., ... Corona, P. (2016). Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.005>

- López-Granados, F., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., de Castro, A. I., Mesas-Carrascosa, F. J., & Peña, J. M. (2016). Early season weed mapping in sunflower using UAV technology: variability of herbicide treatment maps against weed thresholds. *Precision Agriculture*, 17(2), 183–199. <https://doi.org/10.1007/s11119-015-9415-8>
- Mikita, T., Janata, P., & Surový, P. (2016). Forest stand inventory based on combined aerial and terrestrial close-range photogrammetry. *Forests*, 7(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/f7080165>
- Nikolic, J., Burri, M., Rehder, J., Leutenegger, S., Huerzeler, C., & Siegwart, R. (2013). A UAV system for inspection of industrial facilities. In *2013 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1–8). <https://doi.org/10.1109/AERO.2013.6496959>
- Puliti, S., Ørka, H., Gobakken, T., & Næsset, E. (2015). Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System. *Remote Sensing*, 7(8), 9632–9654. <https://doi.org/10.3390/rs70809632>
- Rosnell, T., & Honkavaara, E. (2012). Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. *Sensors*, 12(1), 453–480. <https://doi.org/10.3390/s120100453>
- Surový, P., Yoshimoto, A., & Panagiotidis, D. (2016). Accuracy of reconstruction of the tree stem surface using terrestrial close-range photogrammetry. *Remote Sensing*, 8(2), 1–13. <https://doi.org/10.3390/rs8020123>
- Thiel, C., & Schmallius, C. (2016). Comparison of UAV photograph-based and airborne lidar-based point clouds over forest from a forestry application perspective. *International Journal of Remote Sensing*, 0(0), 1–16. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1225181>
- Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., de Castro, A. I., & López-Granados, F. (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.009>
- Wallace, L., Lucieer, A., Malenovský, Z., Turner, D., & Vopěnka, P. (2016). Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. *Forests*, 7(3), 1–16. <https://doi.org/10.3390/f7030062>

VIII. Seznam publikací, které předcházely metodice

Surový, P., Yoshimoto, A., & Panagiotidis, D. (2016). Accuracy of reconstruction of the tree stem surface using terrestrial close-range photogrammetry. *Remote Sensing*, 8(2), 1–13.

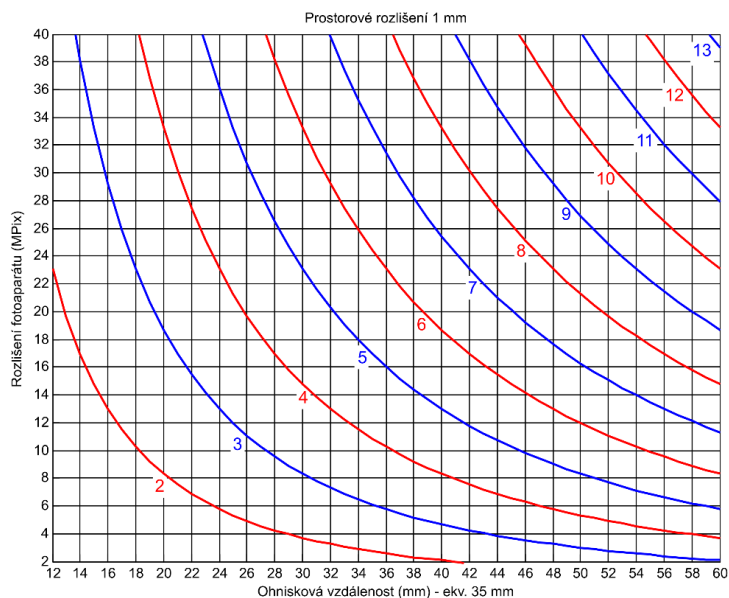
<https://doi.org/10.3390/rs8020123>

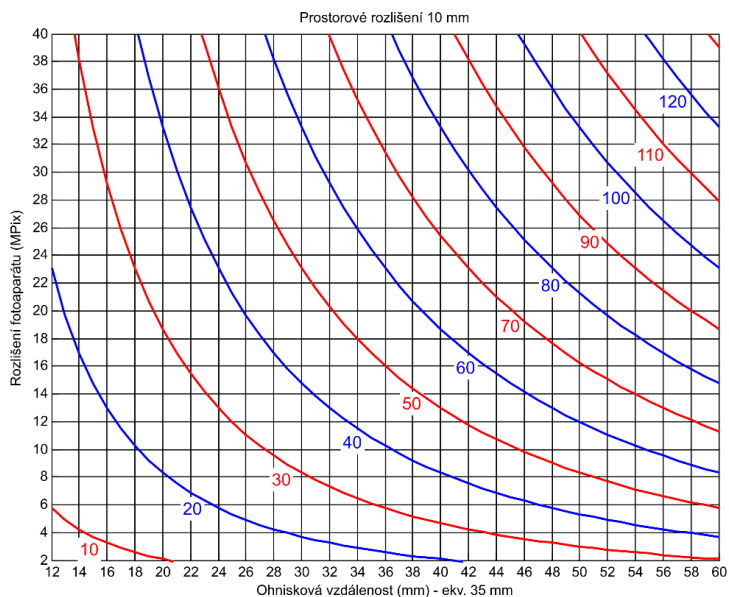
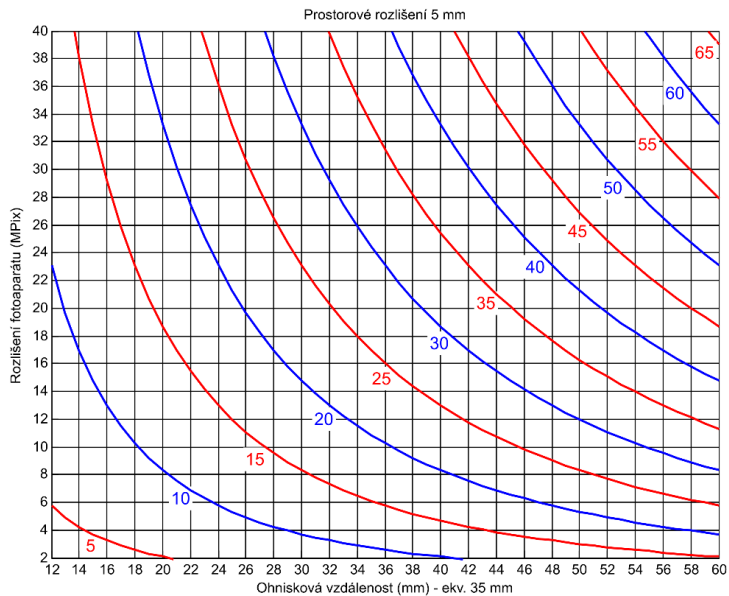
Panagiotidis D, Abdollahnejad A, Surový P, Chiteculo V (2017) Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38 (8-10): 2392-2410

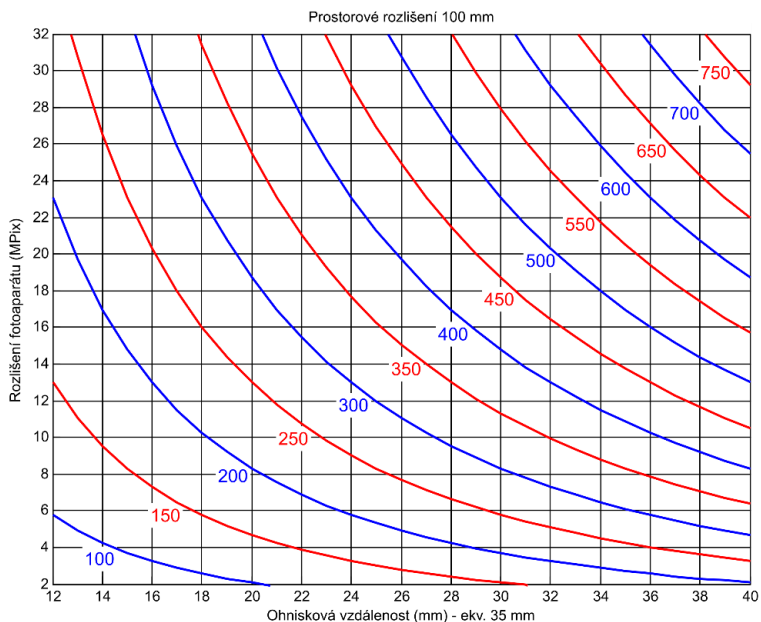
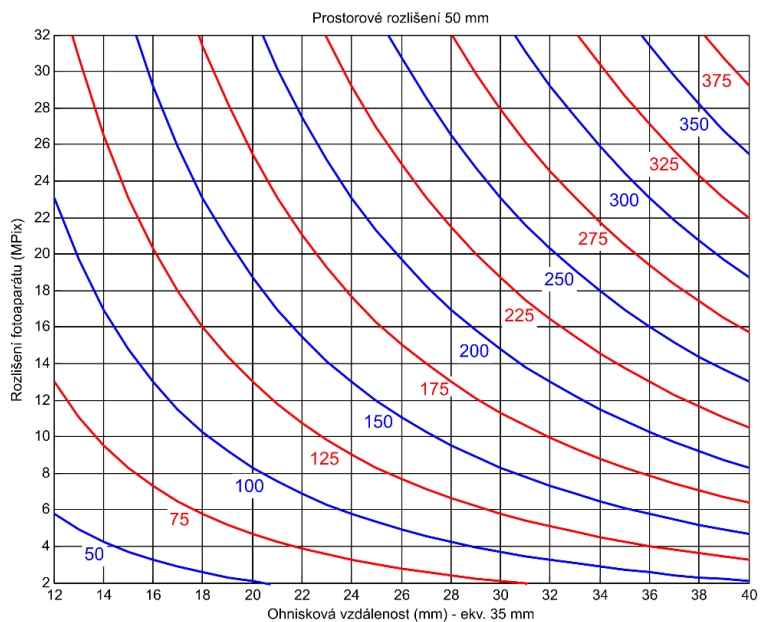
Mikita T, Janata P, Surový P (2016) Forest Stand Inventory Based on Combined Aerial and Terrestrial Close-Range Photogrammetry. *Forests* 2016, 7, 165

IX. Přílohy

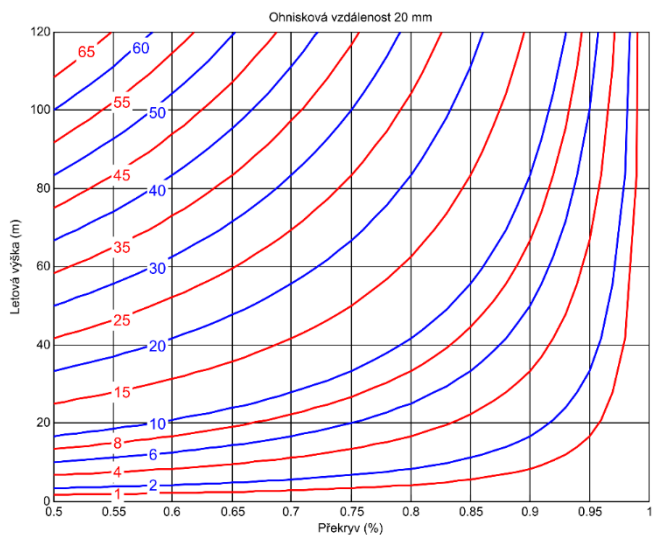
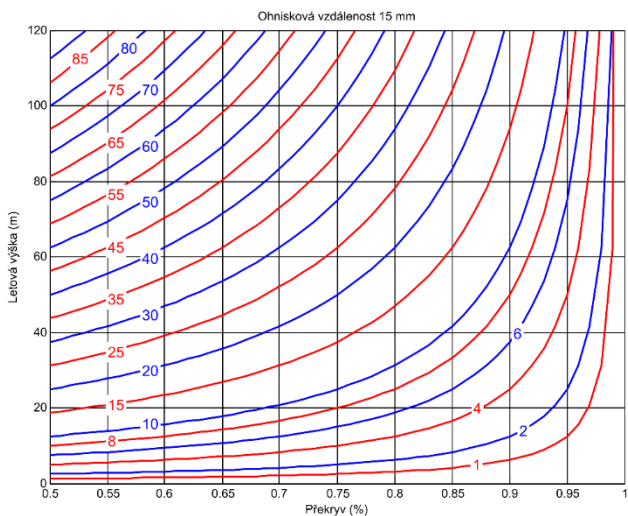
IX.1 Grafy pro určení výšky letu na základě známých parametrů fotoaparátu pro požadovanou pozemní vzdálenost vzorků (prostorové rozlišení)

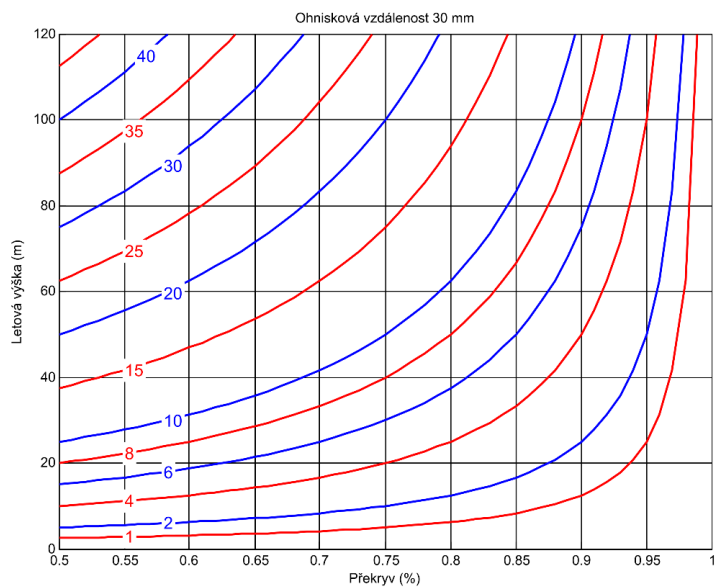
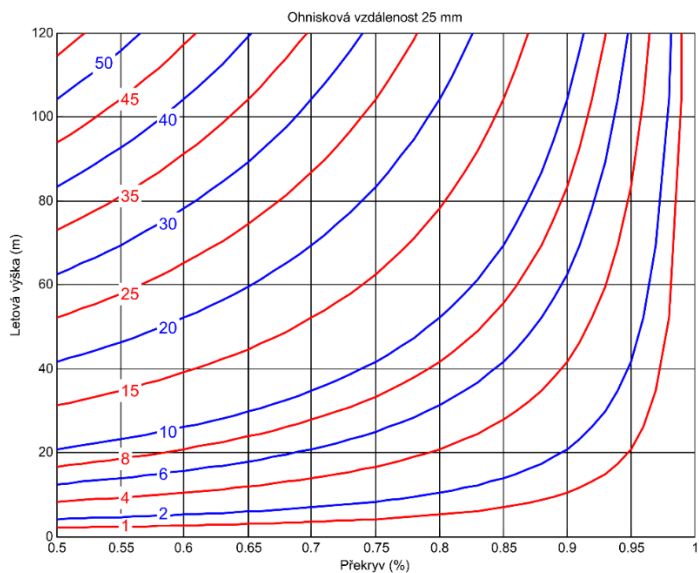


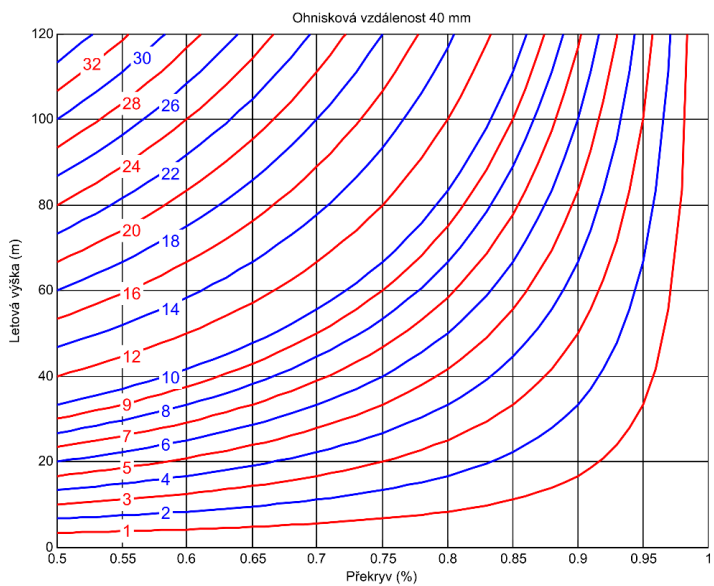
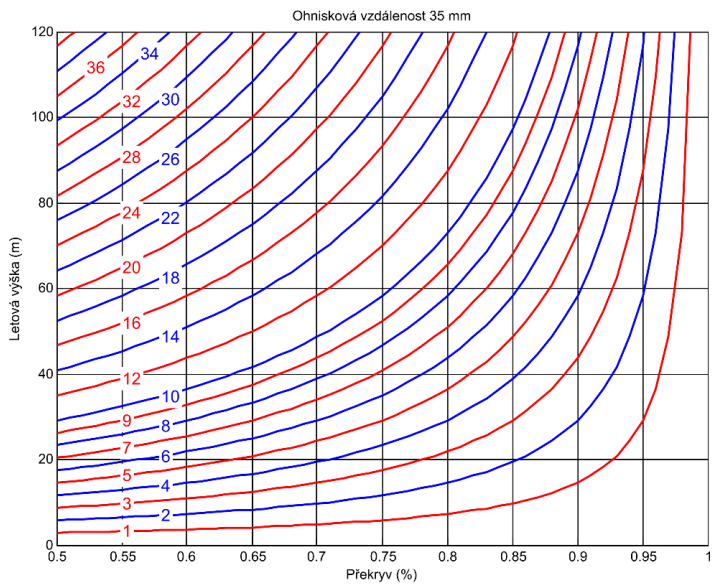


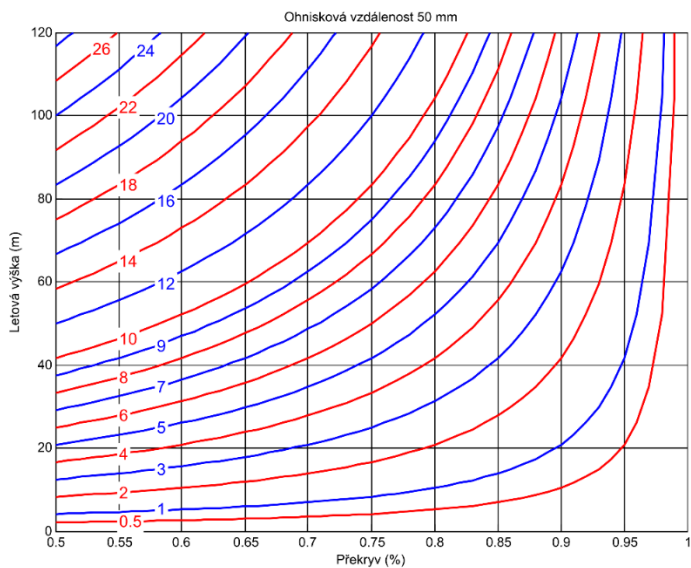
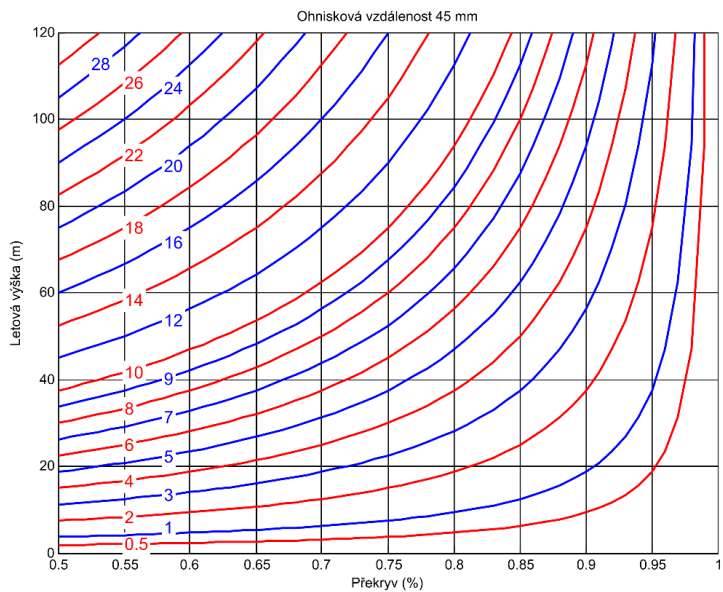


IX.2 Grafy pro určení rychlosti letu na základě známých parametrů fotoaparátu pro požadovaný překryv snímků









IX.3 Grafy pro určení rychlosti letu pro fotogrammetrické zjišťování trojrozměrné struktury lesa

