

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE
Přírodovědecká fakulta
Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie



**MODELOVÁNÍ VYBRANÝCH GEOMETRICKÝCH
PARAMETRŮ LESNÍCH POROSTŮ Z DAT LETECKÉHO
LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ**

**MODELLING OF SELECTED FOREST GEOMETRIC PARAMETERS FROM
AIRBORNE LASER SCANNING DATA**

Diplomová práce

Bc. Oldřiška Sedláčková

srpen 2014

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Prohlášení kvalifikační práce

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citovala.

Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 21. srpna 2014

.....
Bc. Oldřiška Sedláčková

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucí diplomové práce Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady, připomínky a odborné konzultace. Dále bych chtěla poděkovat Správě KRNAP za poskytnutí datových podkladů a RNDr. Jakubu Lysákovi za konzultace v oblasti datového předzpracování. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu v průběhu celého studia.

Modelování vybraných geometrických parametrů lesních porostů z dat leteckého laserového skenování

Abstrakt

Cílem této práce je aproximovat tvar koruny stromu matematicky popsatelným tělesem na základě dat leteckého laserového skenování. Následně z tohoto modelu získat geometrické parametry popisující korunu stromu. V rámci práce je navržen vlastní výsekový algoritmus, který je konfrontován s algoritmem založeným na RANSAC a s terénním měřením. Práce ve své první části popisuje letecké laserové skenování, jeho využití k získávání charakteristik lesních porostů a jednotlivých stromů a teorii modelování korun stromů. Následuje popis obou algoritmů a prezentace výsledků i terénního měření. V závěru práce shrnuje a hodnotí výstupy výsekového algoritmu a věnuje se jeho možným modifikacím.

Klíčová slova: letecké laserové skenování, výška stromu, šířka koruny, délka koruny, plocha projekce koruny, objem koruny, tvar koruny, RANSAC

Modelling of selected forest geometric parameters from airborne laser scanning data

Abstract

The main aim of this work is to approximate the shape of a tree crown with mathematically describable 3D shape based on airborne laser scanning (ALS) data. And consequently derive geometrical parameters describing the tree from this model. Included in the work is a custom designed algorithm based on angular segmentation. Measured results of this algorithm are then compared to an algorithm based on RANSAC and field measurement. The first part of this work describes airborne laser scanning, its use to derive characteristics of forest stands and individual trees and the theory of tree crown modelling. The next part contains a description of both algorithms and presentation of results and field measurements. The conclusion summarizes and evaluates the outputs of the custom angular segmentation algorithm and discusses its possible modifications.

Keywords: airborne laser scanning, tree height, crown width, crown height, crown cover, crown volume, crown shape, RANSAC

OBSAH

Přehled použitých zkratk	7
Seznam obrázků a tabulek	8
1. Úvod	9
2. Úvod do problematiky	10
2.1 Princip leteckého laserového skenování	10
2.2 Vývoj od diskrétních záznamů k záznamům spojitým	11
2.3 Zpracování dat	12
2.3.1 Práce s rastry	12
2.3.2 Práce s mračnem bodů	15
2.4 Charakteristiky stromů a lesních porostů	16
2.4.1 Charakteristiky na úrovni jednotlivého stromu	16
2.4.2 Charakteristiky na úrovni porostu	20
2.5 Modelování korun stromů	21
3. Data a metodika zpracování	26
3.1 Data	26
3.2 Terénní měření	27
3.2.1 Metodika stanovení výšky stromu pomocí výškoměru	28
3.2.2 Měření s výškoměrem Blume-Leiss	29
3.3 Algoritmus dle Tittmanna založený na RANSAC	29
3.3.1 Popis implementace algoritmu	29
3.3.2 Limity algoritmu	31
3.4 Návrh vlastního algoritmu	31
3.4.1 Předpoklady algoritmu	31
3.4.2 Nalezení osy souměrnosti	32
3.4.3 Výpočet s využitím lineární funkce	34
3.4.4 Výpočet s využitím kvadratické funkce	36
3.4.5 Výběr reprezentativních bodů	37
4. Výsledky	40
4.1 Výpočet geometrických parametrů jednotlivých stromů	40

Modelování vybraných geometrických parametrů lesních porostů z dat leteckého laserového skenování	6
4.2 Výsledky terénního šetření	42
4.3 Vlastní výsledky	43
4.4 Statistické zhodnocení.....	49
5. Diskuze.....	51
5.1 Diskuze nad výsekovým algoritmem navrženým v rámci práce	51
5.1.1 Limity algoritmu	51
5.1.2 Možné modifikace výsekového algoritmu	53
5.1.3 Časová efektivnost algoritmu	56
5.2 Diskuze nad způsobem terénního měření.....	56
5.2.1 Odhad parametrů z fotografií	56
5.3 Odvození parametrů lesních porostů.....	57
6. Závěr	58
Seznam zdrojů a informací.....	59
Seznam příloh.....	63

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

ALS	A irborne L aser S canning (letecké laserové skenování)
Bpv	B alt po vyrovnání
CHM	C anopy H eight M odel (výškový model korun)
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
dbh	D iameter at B reast H eight (výčetní tloušťka kmene)
DMP	D igitální m odel p ovrchu
DMR	D igitální m odel r eliéfu
FAO	F ood and A gricultural O rganization (Organizace pro výživu a zemědělství)
GPS	G lobal P ositioning S ystem
INS	I nerciální n avigační s ystém
KRNAP	K rkonošský n árodní p ark
LiDAR	L ight D etection A nd R anging (přístroj nebo technologie k detekci objektů měřením vzdáleností)
LLS	L etecké l aserové s kenování
nDMP	N ormalizovaný d igitální m odel p ovrchu
NIL	N árodní i ntentarizace l esů
TIN	T riangulated I rregular N etwork (nepravidelná trojúhelníková síť)
ÚHÚL	Ústav pro h ospodářskou ú pravu l esů
UTM	U niversal T ransverse M ercator (souřadnicový systém)

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1 Kroky při zpracování dat	13
Obr. 2 Poloha stromu.....	17
Obr. 3 Tvar koruny stromu dle NIL	19
Obr. 4 Typ utváření koruny dle NIL	19
Obr. 5 Výška stromu	19
Obr. 6 Modelace korun implicitní interpolací	23
Obr. 7 Modelace korun Bayesiánským rozpoznáváním.....	23
Obr. 8 Vymezení korun	24
Obr. 9 Vybavení použité při terénním měření	27
Obr. 10 Souřadnice osy souměrnosti.....	33
Obr. 11 Aproximace bodů koruny jehličnatého stromu	35
Obr. 12 Aproximace bodů koruny listnatého stromu	35
Obr. 13 Proložení bodů kvadratickou resp. lineární funkcí.....	37
Obr. 14 Výsledek výsekového algoritmu aplikovaného na reprezentativní body	39
Obr. 15 Zerav obrovský.....	45
Obr. 16 Smrk ztepilý	47
Obr. 17 Modelování kulatých stromů.....	52
Obr. 18 Zjednodušení do podoby kužele či elipsoidu	54
Tab. 1 Výstupy terénního měření.....	43
Tab. 2 Zerav obrovský a jeho parametry	44
Tab. 3 Smrk ztepilý a jeho parametry	46
Tab. 4 Dub zimní a jeho parametry.....	48
Tab. 5 Bříza bělokorá a její parametry	48
Tab. 6 Průměrná odchylka měření	49
Tab. 7 Odmocnina ze střední kvadratické chyby měření	49

1. ÚVOD

Letecké laserové skenování je jednou z nejnovějších metod dálkového průzkumu Země. Oproti leteckému nebo družicovému snímkování je charakteristické tím, že se skenovaným povrchem přímo interaguje, vysílá laserový puls, který prochází prostředím a co je jeho hlavní předností, dokáže pronikat vegetací a lesními porosty. Je tak díky tomu možné získat informace o vertikální struktuře lesa, odvodit parametry lesních porostů nebo jednotlivých stromů a v neposlední řadě modelovat reliéf pod korunami stromů. V lesnictví je tedy letecké laserové skenování velkým přínosem. Už desítky let vznikají stále nové studie, které se snaží zjistit co možná nejvíce parametrů lesních porostů a usnadnit získávání dat či dokonce zpřesnit výstupy při národních inventarizacích lesů. Jak z těchto studií vyplývá, dosahuje letecké laserové skenování velice dobrých výsledků.

Z dat leteckého laserového skenování je také možné modelovat tvar koruny stromu a získat tak informace až z úrovně jednotlivých stromů. Znalost geometrie korun je vedle využití pro inventarizaci lesních porostů důležitým vstupem například pro aplikaci modelů radiačního přenosu. Proto se modelováním tvaru koruny stromu a jeho zjednodušením do podoby matematicky popsatelného tělesa zabývá i tato práce.

Rešeršní část popisuje letecké laserové skenování a jeho využití k získávání charakteristik lesních porostů a jednotlivých stromů. Zabývá se také teorií modelování korun stromů, představuje několik přístupů různých autorů. V metodické části práce je pak představena zájmová oblast a jsou popsána data. V této části práce je také představen a popsán vlastní navržený algoritmus pro aproximaci tvaru koruny rotačním tělesem. Ten je pak konfrontován s algoritmem založeným na RANSAC, který vychází ze studie Tittmanna et al. (2011) a s terénním měřením. V části výsledků jsou sepsány a okomentovány dosažené výsledky obou algoritmů a jejich výstupy jsou porovnány s referenčními daty z terénního měření. V diskuzi je zhodnocena vhodnost použití algoritmu, jsou popsány jeho limity, silné a slabé stránky. Také jsou navrženy další možné modifikace algoritmu. Závěr nastiňuje, jak by bylo možné na výstupy této práce navázat.

2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Letecké laserové skenování (LLS) je v posledních letech hojně využívanou metodou dálkového průzkumu Země především díky faktu, že vyslaný laserový paprsek je schopen pronikat skrze vegetaci. To je výhodou zvláště v lesních oblastech, kde je tak možné mapovat nejen koruny stromů, ale i terén pod vegetací.

2.1 Princip leteckého laserového skenování

Laserový paprsek je ze skeneru vyslán v krátkých pulsech s vysokou frekvencí opakování. Systém laserového skenování funguje na principu určování prostorových polárních souřadnic bodů. U každého vyslaného paprsku je měřen směr (v podobě úhlu) a čas nazpět navraceného signálu. Z nich je pak určena vzdálenost d (délka průvodiče) k měřenému odrazu, a to dle vztahu:

$$d = \frac{v \cdot t}{2},$$

kde v je rychlost šíření laserového paprsku a t je tranzitní čas. Dále jsou zaznamenávány i další parametry, např. intenzita navraceného záření – viz níže.

Nutným předpokladem pro přesné určení prostorové souřadnice měřeného bodu je znalost polohy skeneru v prostoru. Toho je dosaženo pomocí GPS a inerciálního navigačního systému INS, což je soustava gyroskopů a akcelerometru pro měření náklonů, orientací a zrychlení letadla. Vosselman a Maas (2010) popisují, jak probíhá následné georeferencování naměřených dat. Základem je výpočet dle následujícího vztahu, odkud je získán výstup v podobě mračna bodů v referenčním souřadnicovém systému.

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}^m = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}^m + R_b^m \cdot \left[R_s^b \cdot d \cdot \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ 0 \\ \cos \alpha \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}^b \right],$$

kde $[X, Y, Z]^{mT}$ jsou souřadnice INS v referenčním souřadnicovém systému,

R_b^m	je matice rotace z INS souřadnicového systému do referenčního souřadnicového systému,
R_s^b	je matice rotace mezi systémem INS a skenerem,
$[a_x, a_y, a_z]^{bT}$	je posun mezi INS a skenerem,
d	je měřená vzdálenost,
α	je úhel skenování.

Paprsek má kuželový tvar a díky své rozbíhavosti (divergenci) se jeho šířka s narůstající vzdáleností od skeneru zvětšuje. Höfle et al. (2012) uvádějí příklad, že při rozbíhavosti paprsku 0,5 mrad a při výšce skenování 1000 m bude mít stopa paprsku (vyslaného v nadiru) na reliéfu průměr 50 cm. Laserový paprsek se odráží na nehomogenitách. Na nehomogenitě, která má menší rozměr, než je průměr stopy paprsku, dojde k odrazu části tohoto paprsku a zbytek prochází prostředím dál.

Letecké laserové skenování je aktivní metodou sběru dat, což znamená, že výsledek není ovlivněn stíny nebo rozdílnými podmínkami osvětlení skenovaného území (jako je tomu např. na ortofotech), a skenování může být prováděno bez ohledu na denní dobu.

Podrobněji k obecným principům LLS v bakalářské práci Sedláčkové (2010), kde jsou detailně popsány vlastnosti laserového paprsku, jeho odrazivost v závislosti na typu povrchu. Dále je popsáno spektrální chování vegetace a interakce laserového paprsku s vegetací.

2.2 Vývoj od diskretních záznamů k záznamům spojitým

Pokud by měl být představen stručný vývoj zaznamenávání odrazů, je třeba začít v 80. letech 20. století u skenovacích systémů, které dokázaly zachytit jeden nejvýraznější odraz. Později byly vyvinuty skenery s možností záznamu více odrazů. Bylo tak možné získat prostorovou souřadnici dvou z nich, a to konkrétně prvního a posledního odrazu. Skenery další vývojové fáze zaznamenávaly až čtyři odrazy náležící jednomu vyslanému paprsku. Ve všech popisovaných případech se jedná o diskretní záznamy. Postupem času však nabýval na důležitosti požadavek znát více informací, obzvlášť o intenzitě navraceného záření.

Současné skenery, tzv. full-waveform skenery, se podle Malleta a Bretara (2009) objevily poprvé roku 2004. Kromě toho, že velice přesně měří vzdálenosti, zaznamenávají také intenzitu navraceného záření $M \left[\frac{W}{m^2} \right]$, která vychází ze vztahu

$$M = \vec{E} \cdot \vec{H},$$

kde \vec{E} popisuje velikost intenzity elektrického pole a \vec{H} velikost intenzity magnetického pole.

Takto je zaznamenána navracená (zpětně odražená) intenzita každého odrazu, ta je pak přiřazena konkrétnímu vyslanému laserovému pulsu. Přijímače signálu jsou velice výkonné, jsou schopny pořídit záznam každou nanosekundu. Ve výsledku pak generují pro konkrétní

vyslaný puls spojitou křivku, která znázorňuje průběh postupně se navracející intenzity odrazu. V konečném výstupu je intenzita vyjádřena v decibelech [dB].

Výhodou full-waveform záznamů je např. to, že v lesních oblastech je tak možné získat více bodů z výškového profilu lesa, body jak z vrchu korun, tak z nižších výškových pater, díky nimž je pak možné získat přehled o nižší vegetaci pod korunami stromů, tak body na reliéfu. Jak popisuje Chauve et al. (2007), skener Riegl LMS-Q680i, kterým byla pořízena i data zpracovávaná v této diplomové práci, je schopen zjistit vertikální rozložení cílů (nehomogenit, na kterých dochází k odrazu části paprsku) na trase paprsku, je-li jejich časový odstup min 1 ns.

Díky tomu, že laserový paprsek prostupuje vegetací, je možné docílit odrazů až přímo od reliéfu, které jsou pak použity k tvorbě digitálního modelu terénu (Shan a Toth, 2009). To je oproti fotogrammetrii posun vpřed v možnosti modelovat reliéf ukrytý pod korunami stromů.

2.3 Zpracování dat

Mračno bodů je při zpracovatelském procesu jednak georeferencováno (viz vzorec v kap. 2.1) a jednak kalibrováno. Při následném zpracovávání a analyzování dat leteckého laserového skenování je možné vydat se třemi směry:

- mračno bodů převést na rastr, popř. několik rastrů – analýzy provádět nad rastry,
- pracovat přímo s 3D mračnem bodů,
- zkombinovat oba přístupy.

2.3.1 Práce s rastry

Každý bod mračna je popsán prostorovou souřadnicí (x , y , z), hodnotou zpětně navracené intenzity a dále údajem o pořadí odrazu v rámci navraceného signálu (EN z angl. echo number) a údajem o celkovém počtu odrazů daného signálu (TN z angl. total number of echos). Jak dále rozvádějí Höfle a Hollaus (2010), lze ze základních vztahů mezi EN a TN odvodit tyto pojmy:

- pokud $EN = TN = 1$, jedná se o jediný odraz,
- pokud $EN = 1$ a zároveň $TN > 1$, jedná se o první odraz,
- pokud $EN > 1$ a zároveň $EN \neq TN$, jedná se o prostřední odrazy,
- pokud $(EN = TN) > 1$, jedná se o poslední odraz.

Při práci s rastry je zaveden pojem tzv. normalizovaného digitálního modelu povrchu (nDMP). Jedná se o digitální model povrchu vyjádřený v relativních výškách. Ten je možné vytvořit následujícím způsobem.

V prvním kroku je generován digitální model povrchu (DMP) z mračna bodů. Ten může být vytvořen jako rastr $0,5 \times 0,5$ m, kde hodnota pixelu odpovídá největší nalezené výškové hodnotě – takto tvoří DMP např. Höfle a Hollaus (2010) nebo Höfle et al. (2012). Jiný přístup, který navrhli Hollaus et al. (2010), vychází z odvození DMP na základě land cover. Tento

přístup přináší zajímavé výsledky obzvláště v oblasti listnatých lesů, kde se jednotlivě vytvořené DMP liší až o několik metrů.

V dalším kroku je třeba získat digitální model reliéfu (DMR). Pro území České republiky je v současné době k dispozici DMR 5G vytvořený z dat leteckého laserového skenování; správu a poskytování má na starosti ČÚZK. Jak je psáno v dokumentaci k produktu, DMR 5G je k dispozici „ve formě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) bodů o souřadnicích X, Y, H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu.“ (ČÚZK, 2010). Pokud by DMR nebyl k dispozici, je zapotřebí ho z mračna bodů vytvořit. O tvorbě DMR z dat laserového skenování píší např. Kraus a Pfeifer (1998) nebo Axelsson (2000).

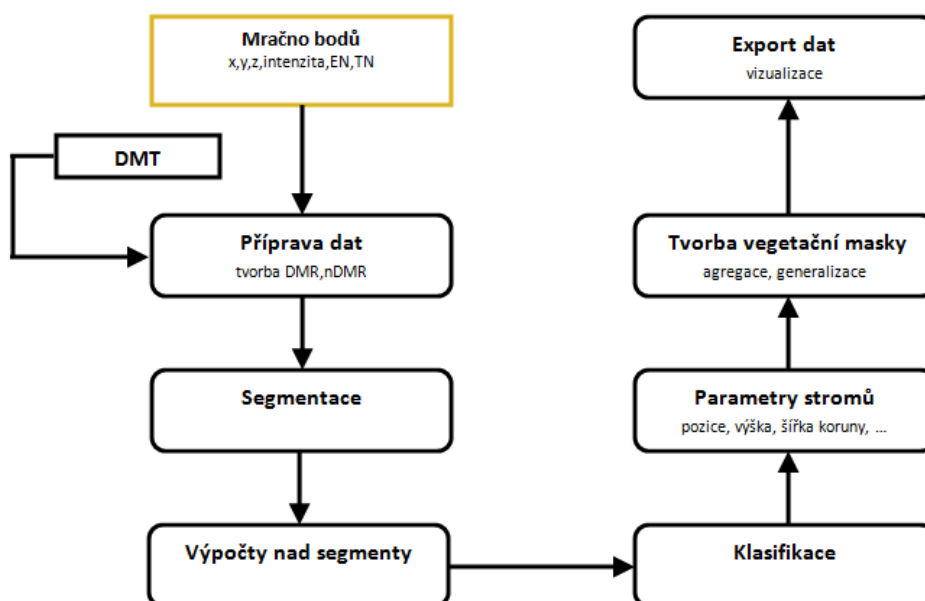
Ve třetím kroku je pak třeba provést normalizaci, rastry od sebe odečíst a získat tak relativní výšky bodů nad terénem.

$$nDMP = DMP - DMR$$

V případě, že by v nDMP vznikly prázdné pixely, doporučují Höfle a Hollaus (2010) doplnit jejich normalizovanou výšku na 0 m.

Vzniklý nDMP je velice často tvořen neklasifikovanými daty. V takovém případě by měly následovat tyto kroky (znázorněné i na Obr.1):

- segmentace
- výpočty nad segmenty
- klasifikace
- agregace a generalizace



Obr. 1 Kroky při zpracování dat (zdroj: autor)

Segmentace

Jedním z možných segmentačních přístupů je objektová analýza rastru aplikovaná na nDMP. Detailněji popsána je např. ve studiích Höfleho a Hollause (2010), pak také Höfle et al. (2012). Cílem objektově orientované segmentace zaměřené na vymezení korun stromů je nalézt a vymežit konvexní objekty v nDMP. Nejprve je použita hranová segmentace, na základě níž jsou nalezeny konkávní hrany mezi objekty. Vstupní data jsou ošetřena podmínkou, že do segmentace vstupují pixely s relativní výškou větší než 1 m. Všechny pixely s nižší relativní výškou nejsou považovány za vegetační. Počty odrazů v pixelu jsou následně parametrizovány podle následujícího vztahu:

$$ER (\%) = \frac{N \text{ prvních} + N \text{ prostředních}}{(N \text{ posledních} + N \text{ jediných})} \cdot 100'$$

kde ER je poměr odrazů (z angl. echo ratio) a N je počet odrazů. Pokud v pixelu není žádný odraz, pak je ER nastaveno na 0 %. Platí tedy tím pádem, že pokud se v pixelu nevyskytuje žádný poslední odraz ani žádný jediný odraz, pak je ER = 100 % a značí to velký vertikální rozsah v rámci pixelu a velkou průchodnost paprsku prostředím. S velkou pravděpodobností se bude jednat o vegetaci. Jak dodávají Höfle et al. (2012), vysoká hodnota ER indikuje vegetaci, jelikož ta je charakteristická velkým počtem prvních a prostředních odrazů. Dále pokračují ve výčtu a zmiňují, že pro vegetační segmenty jsou typické i vysoké hodnoty šířky odrazu a nízká amplituda.

Dalšími metodami segmentace může být např. watershed segmentace, neboli algoritmus primárně používaný pro hydrologické účely a schopný nalézt v datech DMR povodí a vymežit rozvodnice. Využit je možné i multiresolution segmentaci, která postupuje od dílčích pixelů (semínek) a ty shlukuje do větších segmentů na základě definovaného měřítkového parametru, který řídí velikost vznikajících segmentů, a dále na základě spektrálních a tvarových vlastností. Alternativou je také edge-based segmentace, která v datech dokáže vyhledat výrazné hrany, které jsou základem pro vznik segmentů.

Alternativně lze použít k nalezení a vymezení korun stromů v datech i region growing segmentaci aplikovanou na nDMP, kterou podrobněji popisují Tóvári a Vögtle (2004). Obecně je vhodná při detekci budov a vegetace. Segmentace pracuje s prvky jako např. s gradienty na hranicích segmentu, výškovou texturou, rozdíly mezi prvním a posledním pulsem, rozměry a tvarem segmentu, intenzitou signálu. Vegetace je ve výsledku vyklasifikována s 86-96% přesností.

Výpočty nad segmenty

V rámci tohoto kroku jsou vypočítávány atributy nově vzniklých segmentů. Vzniká tak nová rozsáhlá databáze, která zahrnuje atributy vypočtené, získané z mračna a vztažené k segmentu. Nejprve jsou nalezeny všechny body náležící do segmentu a z nich pak zjištěny charakteristiky jako např. normalizovaná výška, normalizovaná amplituda, šířka odrazu atp.

Klasifikace

V tomto kroku jsou segmenty klasifikovány do tříd. Třídy jsou určeny podle účelu, pro který jsou data zpracovávána. Může to být jednoduše vegetace a nevegetace. V případě klasifikace pro účely určení land cover by tříd bylo víc, les, louka, vodní plocha atp. Klasifikačních přístupů může být opět více. Höefle et al. (2012) například popisují klasifikaci, kde 3D segmenty slouží jako vstup pro 2D klasifikaci polygonů. Ve studii byly zhodnoceny dvě techniky klasifikace, a to klasifikace na základě rozhodovacích stromů oproti klasifikaci pomocí neuronových sítí. Obecně z jejich závěrů vyplývá, že rozhodovací stromy jsou jednodušší na porozumění a interpretaci, ale neobsahují žádné vztahy a interakce. Neuronové sítě napodobují model mozku, který je představován provázaným systémem neuronů. Algoritmy neuronových sítí fungují na podobném principu, dokáží odhalit vzorce a učit se složité vztahy uvnitř dat. V rámci neuronové sítě jsou často budovány tak složité vztahy, že je těžké získat hlubší vhled do toho, jak byly vytvořeny. Jak Höefle et al. (2012) uzavírají, v případě neuronových sítí jde o tzv. black box model, jehož systému složitých vztahů je náročné porozumět.

Agregace a generalizace

Je-li to pro výsledný výstup účelné, následuje agregace, kdy jsou sousední segmenty stejné třídy slučovány dohromady. A generalizace objektů s ohledem na výsledné měřítko výstupu.

2.3.2 Práce s mračnem bodů

Rutzinger et al. (2008) ve své studii pracují s mračnem bodů a pro tyto účely sepsali i metodiku pro klasifikaci mračna bodů. Zjednodušeně se postup skládá ze tří kroků, segmentace, výpočtů nad segmenty a klasifikace. Při segmentaci doporučují použít region growing segmentaci s využitím známých hodnot o šířce odrazu. V tomto kroku vznikají homogenní 3D segmenty v mračnu bodů. V druhém kroku jsou pro tyto segmenty generovány atributy. Tyto atributy jsou spočteny na základě hodnot za jednotlivé body v segmentu. Ve třetím kroku je testováno několik rozhodovacích stromů a z nich pak odvozen finální binární klasifikátor. Ve výsledku Rutzinger et al. (2008) klasifikují dvě třídy, vegetaci a nevegetaci, s přesností nad 90%.

Pro klasifikaci mračna bodů z oblasti zastavěného území se rozhodli i Mallet et al. (2008). Jejich cílem bylo rozlišit v datech tři třídy, a to vegetaci, budovy a ostatní povrch. Na data aplikovali řízenou klasifikaci pomocí metody tzv. super vector machines. Ve výsledku vyklasifikovali zadané tři třídy s přesností 92 %, jak píší v závěrech své studie.

Zkušenosti se zpracováním mračna bodů, resp. rastrů v oblasti lesních porostů

Lindberg a Hollaus (2012) se ve své práci zabývali odhadem porostních charakteristik, jmenovitě objemem dřevní hmoty, počty kmenů v porostu a stanovením výčetní plochy porostu. Tyto charakteristiky není možné vypočítat přímo z dat LLS, ale je třeba je modelovat pomocí

regresních modelů kalibrovaných referenčními daty z terénu. V rámci práce porovnávali, jakých výsledků dosáhnou, když modelování budou provádět na rastrových datech oproti výsledkům z modelování na 3D mračnu bodů. Ze závěrů studie vyplývá, že regresní modely založené na výpočtech z rastrových dat jsou pro tyto účely vhodnější a dosáhne se tak přesnějších výsledků, než když se modely aplikují na mračno bodů. Jinými slovy, modelování objemů dřevní hmoty, výčetní plochy porostu a stanovení počtu kmenů v porostu je vhodnější provádět na rastrových datech. Jako nesporné výhody rastrové podoby dat uvádějí, že výpočty jsou zde méně datově náročné, tedy rychlejší a je tím pádem možné zpracovávat větší objemy dat a dělat robustnější analýzy. Jako další výhodu ve prospěch rastru zmiňují, že rastr lépe kompenzuje rozdílnost v hustotě dat. V mračnu bodů totiž při koregistraci dat, vlivem překryvu datových pásů, vznikají nerovnoměrnosti v hustotě dat, kdy v místě překryvu může být hustota bodů až dvojnásobná.

Höfle et al. (2012) se zabývali klasifikací prováděnou jednak přímo na mračnu bodů a jednak na rastrové podobě dat. Z jejich závěrů vyplývá, že segmentový klasifikační přístup na rastrových datech vede ke stabilnějším výstupům než klasifikace přímo samotných pixelů nebo laserových bodů.

Tittmann et al. (2011), kteří se zabývají detekcí stromů v datech LLS a vymezením jejich koruny, své analýzy provádějí přímo nad bodovým mračnem. Argumentují tím, že při převodu mračna bodů na rastr dochází k jisté ztrátě přesnosti dat.

Lze tedy říci, že rozhodnutí, zda analýzy provádět nad rastrovými daty nebo nad mračnem bodů, je závislé na tom, o jaké analýzy se jedná a jaké informace z dat mají být získány, a dále na tom, s jak velkým územím je třeba pracovat.

2.4 Charakteristiky stromů a lesních porostů

Mezinárodní definice lesa dle FAO (z angl. Food and Agricultural Organization), což je organizace pro výživu a zemědělství, říká, že lesem je rozuměna „plocha o rozloze alespoň 0,5 ha, na níž stromy dosahují výšky v dospělosti nejméně 5 m a kde koruny stromů v souvislém zápoji pokrývají alespoň 10 % této plochy“ (FAO, 2000). Stejnou definicí se řídí i národní inventarizace lesů v metodice ÚHÚL Brandýs nad Labem.

V následujících odstavcích jsou popsány významné charakteristiky jednotlivých stromů v porostu a také charakteristiky vztažené k celému porostu. Blíže jsou popsány ty z nich, které je možné stanovit z dat LLS.

2.4.1 Charakteristiky na úrovni jednotlivého stromu

Jde o veličiny, které popisují jednotlivý strom, a je možné rozlišit polohu stromu, výšku stromu, výčetní tloušťku stromu, výčetní základnu stromu, obvod příčného průřezu, objem. U objemu je možné zjišťovat objem stromový, objem kmenový, objem větví, objem hroubí, objem nehroubí, objem biomasy, u výšky pak nasazení živé koruny, délku a šířku koruny, tvar koruny stromu.

Dalšími charakteristikami jsou druh dřeviny, věk, zdravotní stav, přírůstky na výšce, tloušťka a objemu. Zde uvedené jsou pouze základní lesnické a dendrologické charakteristiky. V následujících odstavcích jsou pak detailněji popsány ty z parametrů, které lze odvodit z dat LLS.

Výčetní tloušťka stromu a výčetní základna stromu

Výčetní tloušťka stromu (z angl. literatury dbh = diameter at breast height) je definována jako průměr kmene ve výšce 1,3 m nad zemí (ÚHÚL, 2003). Jedná se tedy o jednorozměrnou veličinu, průměr.

Výčetní základna stromu (z angl. literatury basal area) udává plochu průřezu (kruhu) danou výčetní tloušťkou kmene, tj. ve výšce 1,3 m nad zemí. Jedná se tedy o dvojrozměrnou veličinu, plochu, a je možné ji vypočítat, pokud je známa výčetní tloušťka stromu a to pomocí následujícího vztahu:

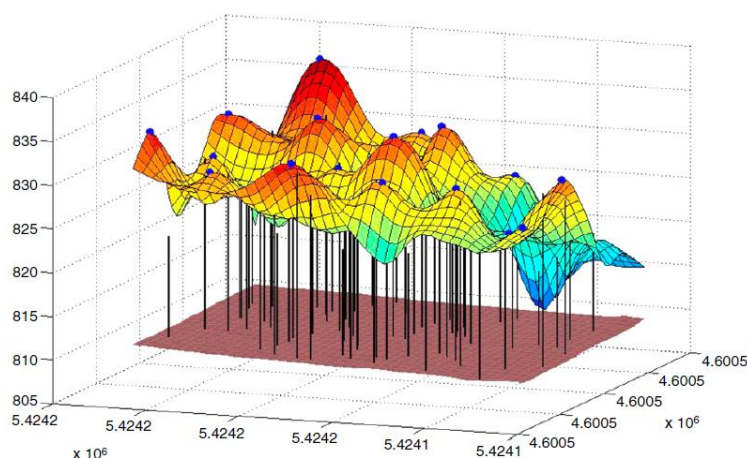
$$ba = \pi \cdot \left(\frac{dbh}{2}\right)^2$$

(předpokládá se, že výčetní základna stromu má kruhový tvar)

Získat hodnotu výčetní tloušťky stromu z dat LLS není triviální záležitostí. Je k tomu zapotřebí využít statistického modelování a model kalibrovat referenčními daty z terénního měření. Tomuto tématu se ve své práci věnuje např. Heurich (2008).

Poloha stromu

Eysn et al. (2011) se ve své práci hlavně zabývají výpočty korunového zápoje, ale pro své výpočty potřebují znát i přesné polohy stromů. Pozice stromů z dat LLS určují jako souřadnici bodu lokálního maxima v koruně stromu (pomocí filtru lokálních maxim). V rámci jednotlivých stromů je vždy nalezeno lokální maximum a za pozici stromu se považuje souřadnice tohoto lokálního maxima. Stejným způsobem postupují například i Reitberger et al. (2009) nebo Höfle a Hollaus (2010).



Obr. 2 Poloha stromu (zdroj: Reitberger et al. 2009)

Ti dále navíc uvádějí i alternativy, jakými je také možné zjistit polohy jednotlivých stromů. Za adekvátní je možné považovat postup, kdy za pozici stromu je prohlášen bod definovaný jako střed kružnice opsané mračnu bodů (popř. pokud je analýza prováděna nad rastrem, pak by se jednalo o kružnici opsanou segmentu, který odpovídá koruně stromu). Cílem je nalézt co nejmenší kružnici opsanou. Dalším alternativním postupem, ze kterého může vzejít poloha stromu, je nalézt centrum gravitace (těžiště) mračna bodů, resp. segmentu. Toto těžiště, jak píše Höfle a Hollaus (2010), by mělo být v případě práce s mračnem bodů počítáno z hraničních bodů koruny stromu.

Snáze je poloha stromu zjištěna u jehličnatých stromů kuželového tvaru, které jsou charakteristické zřetelnou špičkou, píše Shan a Toth (2009). Pravděpodobnost, že bude naskenován vrchol stromu, je u jehličnatých stromů kuželového tvaru koruny a tedy zřetelné špičky větší, než u jakýchkoli jiných druhů stromů. Naproti tomu určení polohy stromu (pokud se bude vycházet z předpokladu, že poloha stromu odpovídá poloze lokálního maxima nalezeného v koruně stromu) u listnatých dřevin nemusí být jednoznačné a ve výsledku ani příliš přesné uváží-li se, že koruny listnatých stromů jsou často rozsáhlé, členité a mohou se skládat z několika vedlejších korun.

Zjišťování přesné pozice stromu v hustém lesním porostu je stále ještě nedokonalé a zůstává velkou výzvou, jak popisuje například v závěrech své studie Hollaus et al. (2012).

Objem dřevní hmoty

Objem stromu (objem dřevní hmoty) se v praxi určuje modelováním z výčetní tloušťky kmene, vrchního průměru kmene a výšky stromu (Shan a Toth, 2009). Odhad objemu dřevní hmoty z dat LLS na úrovni porostu je závislý na přesnosti a správnosti nalezení a vykreslení jednotlivých korun. Čím více korun je sloučeno a vyhodnoceno jako jediný strom, tím podhodnocenější jsou odhady objemu dřevní hmoty (Hyypä et al., 2001).

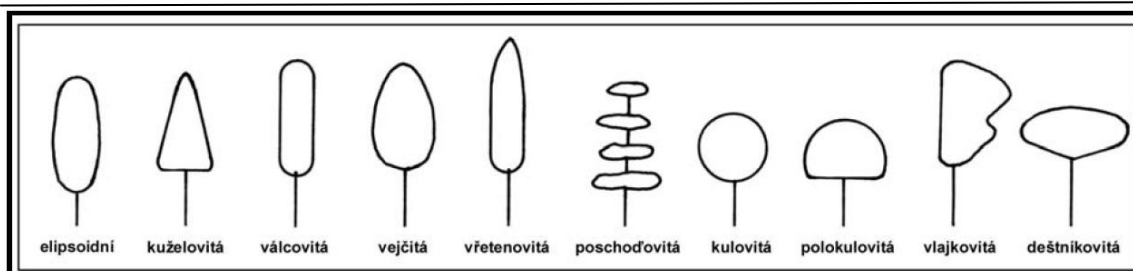
Krof et al. (1972) počítají objem dřevní hmoty jednoho stromu jako:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot d_{(1,3)}^2 \cdot h \cdot f_{(1,3)}$$

kde $d_{(1,3)}$ je výčetní tloušťka kmene ve výšce 1,3 m nad zemí, h je výška stromu a $f_{(1,3)}$ je tzv. nepravá výtvarnice s kruhovou základnou ve výčetní výšce 1,3 m. Výtvarnice obecně charakterizuje plnodřevnost kmene stromu a je definována jako poměr skutečného objemu kmene k objemu ideálního válce, který má s kmenem společnou kruhovou základnu (zde se jedná o základnu ve výšce 1,3 m) a stejnou výšku.

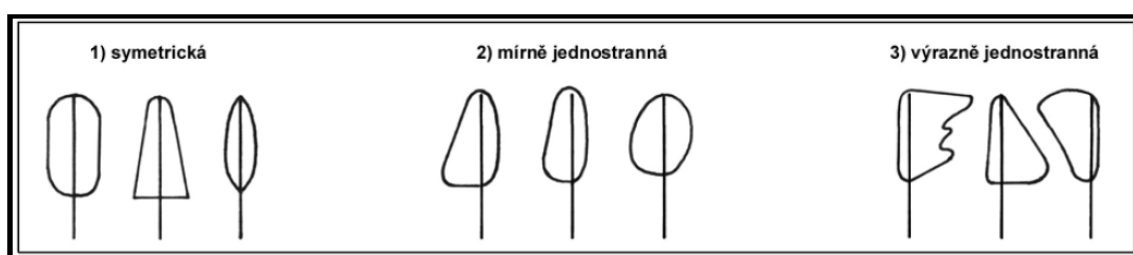
Tvar a průměr koruny stromu

Tvarem koruny se rozumí podobnost určitému geometrickému tvaru. V metodice k národní inventarizaci lesů (NIL) v České republice, kterou zpracovává Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, je při venkovním sběru dat rozlišováno deset tvarů korun stromů, které ukazuje Obr. 3.



Obr. 3 Tvar koruny stromu dle NIL (zdroj: ÚHÚL, 2003)

Co se symetričnosti koruny týče, je v metodice NIL zaveden pojem typ utváření koruny, kterým se rozumí míra pravidelnosti koruny stromu. A jak je patrné z Obr. 4, rozlišovány jsou tři typy utváření korun, a to symetrická, mírně jednostranná a výrazně jednostranná (ÚHÚL, 2003).



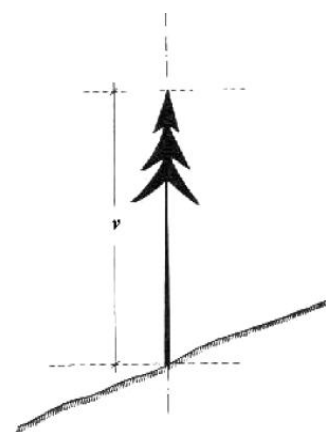
Obr. 4 Typ utváření koruny dle NIL (zdroj: ÚHÚL, 2003)

Šířku koruny je možné z dat LLS získat jako průměr segmentu odpovídajícího vyklasifikované koruně stromu. Je jí však také možné odhadnout ze známé hodnoty výšky stromu. Eysn et al. (2011) odhadují průměr koruny pomocí empirických funkcí, na základě toho, že existuje vztah (korelace) mezi výškou stromu a průměrem jeho koruny. Tyto funkce poté kalibrují pomocí referenčních dat zjištěných z terénu při inventarizaci lesů.

Výška stromu

V metodice k národní inventarizaci lesů (ÚHÚL, 2003) je výška stromu definována jako „svislá vzdálenost mezi horizontální rovinou protínající nejvyšší vegetační orgán stromu a horizontální rovinou protínající patu kmene“.

Výška stromu získaná z dat LLS je obecně podhodnocována oproti skutečné výšce stromu (Shan a Toth, 2009). Často je to způsobeno tím, že koruna stromu není dostatečně hustě pokryta bodovým mračnem. Pravděpodobnost, že vrchol stromu bude naskenován do dat, je tak nízká. Možné vlivy na podhodnocování výšky stromu jsou sepsány v práci Sedláčkové (2010).



Obr. 5 Výška stromu (zdroj: ÚHÚL, 2003)

Ve studii Hollause et al. (2012) je uvedeno, že informace o výšce stromů získané z dat LLS jsou stejně přesné ne-li přesnější než tyto informace získané z fotogrammetrických měření nebo

dalších metod dálkového průzkumu, které využívají radarová nebo optická data jako vstupní data.

K zjišťování výšky stromu z dat LLS je možné přistupovat tak, že za vrchol stromu je považován nejvyšší bod v datech. Je ale pak třeba zajistit podmínku, aby koruna stromu byla naskenována dostatečným množstvím bodů. Alternativou je výšku stromu z dat modelovat a její hodnotu odvodit na základě hodnot okolních dat.

Studie Thomase et al. (2006) se zabývala tím, jaký vliv má hustota, s jakou jsou data leteckého laserového skenování pořízena, na odvozování parametrů jednotlivých stromů. Z výsledků stojí za zmínku, že pro určování výšky stromu a určování výčetní základny stromu (též zaveden pojem výčetní plocha kmene) nemusí být vhodné použít příliš podrobná data, naopak je vhodnější použít data s menší hustotou skenování. Větší hustota bodů je však zásadní pro výpočty zápoje korun.

2.4.2 Charakteristiky na úrovni porostu

Jedná se o veličiny, které charakterizují porost jako celek (týkají se většího počtu stromů) a je možné je vztáhnout:

- k celé výměře porostu
- k plošné jednotce (např. ha, m²)
- k průměrnému stromu v porostu – sem patří veličiny typu střední výška stromu apod.

Sledovat je možné počet stromů, výčetní základnu porostu, objem dřevní hmoty, objem biomasy, střední výšku stromu, střední výčetní tloušťku, objem středního kmene. Dále věk porostu, přírůstky na zásobě, bonitu porostu, zakmenění, korunový zápoj, zastoupení dřevin, zdravotní stav a poškození porostu, výškovou strukturu porostu (etážovitost) a spoustu dalších, tento výčet jistě není konečný. Z pohledu LLS má smysl přiblížit dvě charakteristiky, a to střední výšku porostu a korunový zápoj.

Střední výška porostu

Střední výška porostu charakterizuje výškovou vyspělost porostu. Jedná se o výšku průměrného stromu, tedy takového stromu, který má průměrnou výčetní tloušťku kmene, průměrnou výčetní základnu nebo průměrný objem.

Její stanovení z dat LLS není triviální, střední výšku porostu je nutné vhodně modelovat. Jak popisuje Næsset (1997), její hodnotu lze získat například jako vážený průměr všech výškových bodů výškového modelu korun, kde vahami jsou výčetní základny jednotlivých stromů. Další alternativou může být aritmetický průměr nejvyšších výškových hodnot. Porovnáním a zhodnocením metod používaných ke stanovení střední výšky porostu se podrobněji zabývá práce Sedláčkové (2010).

Korunový zápoj

Zápoj je možné definovat jako „vzájemný dotyk a prolínání větví stromů“, jak uvádí slovník lesnicko-dřevařského vzdělávacího portálu (Mezi stromy, 2007). V lesnictví se jedná o důležitý údaj, který má vliv při hodnocení pěstebního stavu porostu. Prolínání korun souvisí s tím, jak je prostor pod korunami cloněn, a tedy jaké množství světla na reliéf proniká, což má vliv jednak na světelný režim, jednak obecně na energetický režim ekosystému.

Korunovým zápojem (z angl. literatury crown coverage nebo též canopy coverage) a jeho výpočtem z dat LLS se ve své práci zabývají Eysn et al. (2011). Korunový zápoj je definován jako poměr plochy zacloněné korunami stromu (plocha korunových projekcí) k výměře porostní skupiny:

$$CC = \frac{P_{korun}}{P_{porostu}}$$

Vyjádřen je v procentech. A je možné ho zjistit několika způsoby:

- terestricky – odhadem při terénním šetření
- z družicových snímků – jako podíl vegetačních pixelů vůči všem pixelům zájmového území. Nebo segmentací snímku a zjištění poměru ploch vegetačních segmentů k ploše zájmové.
- výpočty z dat LLS – obecně vymezením korun stromů v datech (z angl. literatury crown delineation) a vypočtením ploch těchto korun. Následně opět zjištění poměru ploch korun vůči ploše porostu.

Již zmiňovaní Eysn et al. (2011) vytvořili vlastní výpočet založený na metodě trojice stromů (z angl. tree triples). Základem výpočtu korunového zápoje je trojice sousedících korun stromů, ze které počítají poměr mezi sumou ploch korun těchto tří stromů a plochou jejich konvexní obálky. V závěrech své práce shrnují, že data LLS jsou pro odhady korunového zápoje a s tím související následnou tvorbu lesních (vegetačních) masek velmi vhodná.

Tématem korunového zápoje se zabývají i Jennings et al. (1999). Ti nejenže počítají hodnoty zápoje, ale dále se také důrazně věnují tomu, jaký je rozdíl mezi korunovým zápojem (z angl. literatury canopy cover) a korunovou zavřeností (z angl. canopy closure). Korunovou zavřenost definují jako poměrnou plochu oblohy, která není zakrytá vegetací při pozorování z jednoho konkrétního bodu (vyjádřena v procentech).

2.5 Modelování korun stromů

Modelování korun stromů a z nich následné získávání informací o parametrech koruny jsou důležitými vstupními údaji v mnoha disciplínách. Radiační přenos (např. model DART), monitoring zdravotního stavu lesa, požáry lesních porostů, analýzy habitatů. Tvar a rozměry koruny úzce souvisí s fotosyntézou, koloběhem živin, přenosem energie (evapotranspirací a

dýcháním), propustností světla do nižších vrstev lesa apod. Získat však co možná nejpřesnější informace o tvaru a rozměrech koruny stromu je nelehkým úkolem. Potíž v tomto směru mají i terénní metody měření (obzvlášť v lesních porostech s velkým zápojem korun).

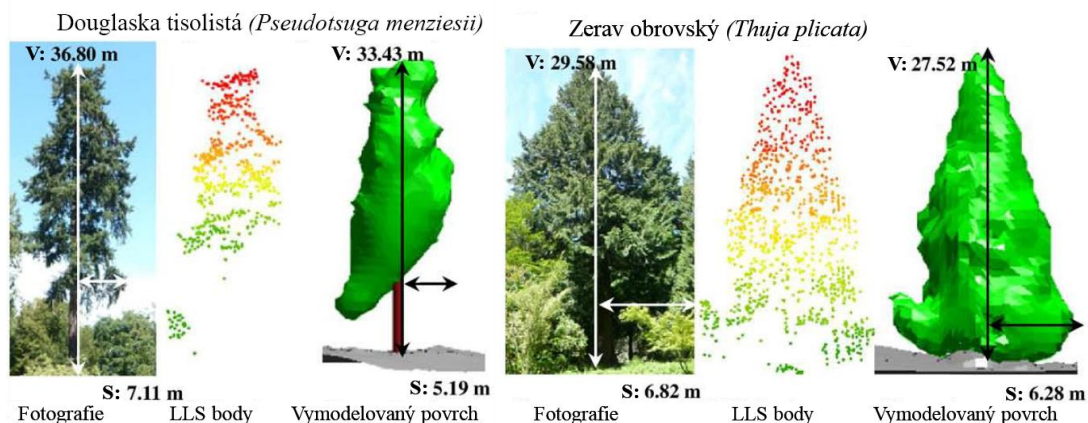
Metod a přístupů, jak korunu stromu vymodelovat, je celá řada. Je možné nelézt metody, které pracují s rozsáhlejším územím na úrovni porostu nebo dílce, nicméně existují ale i přístupy zaměřující se přímo na jednotlivé stromy a analýzy tak probíhají na konkrétní koruně stromu. Obecně platí, že při práci s mračnem bodů představujícím rozsáhlejší oblast a čítajícím desítky či stovky stromů, je v prvním kroku třeba vytvořit výškový model korun (z angl. literatury CHM = canopy height model), v druhém pak nalézt a vymezit jednotlivé koruny stromů v datech a ve třetím pak tyto koruny proložit vhodným modelem.

V přístupu autorů se dají vysledovat tři obecné směry, kterými je možné se při snaze modelovat tvar koruny stromu vydat, jak popisují Kato et al. (2009):

1. implicitní – metody, které se řídí přesným tvarem stromu a snaží se ho co nejvěrněji modelovat, využívají se převážně v počítačové grafice k sestavování 3D modelů těles, např. metoda tzv. marching cubes anebo metoda implicitní interpolace použitá ve studii Kato et al. (2009),
2. explicitní – modelace pomocí matematických funkcí, kuželové, elipsoidní, parabolické a kombinace všech zmíněných,
3. parametrický – regresní statistické analýzy, stochastické modelování, tvar koruny stromu je možné modelovat i za využití predikce časové řady.

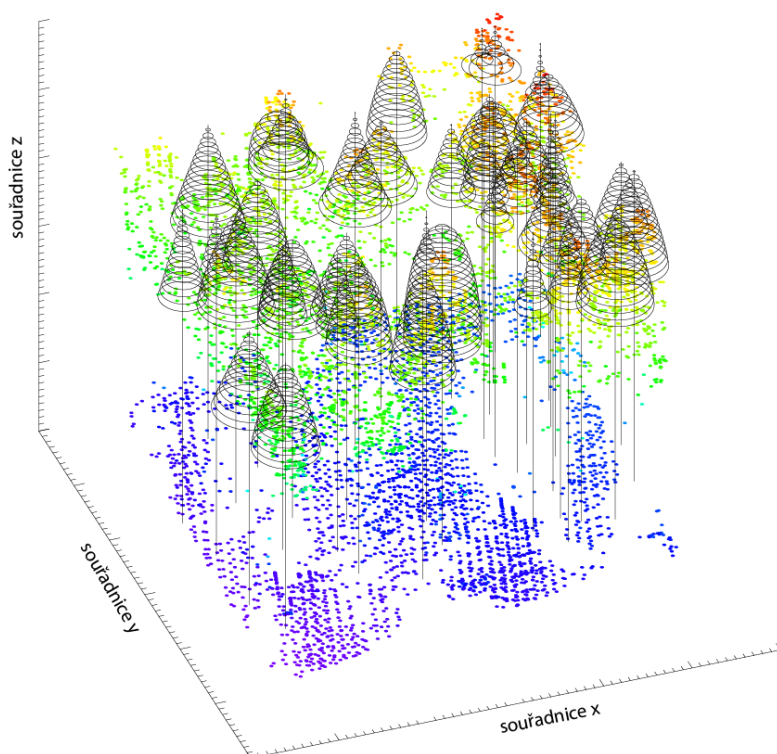
Z literatury vyplývá (Kato et al., 2009), že regresní modely jsou obecně lepší pro modelování území, na kterém roste homogenní porost. Naopak se nehodí pro území, kde je velká variabilita stromů a porosty heterogenní.

Již zmiňovaní Kato et al. (2009) se ve své práci zabývají modelováním korun stromů. Ale nesnaží se ji zjednodušit do matematického tělesa, ale naopak modelují korunu v celé její komplexnosti, co nejvěrněji podobnou realitě. Jejich výsledky vypadají např. tak, jak ukazuje Obr. 6. Vlevo je fotografie stromu doplněná o údaje z terénního měření totální stanicí, uprostřed mračno bodů a vpravo jejich výsledný model koruny doplněný o vypočtené údaje.



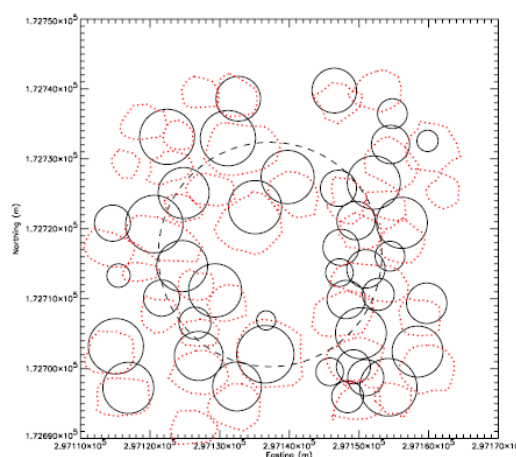
Obr. 6 Modelace korun implicitní interpolací (zdroj: Kato et al., 2009)

O tom, jak proložit korunu stromu geometrickým tělesem a odtud získat parametry koruny, píší také Andersen et al. (2002). Využívají k tomu Bayesiánské rozpoznávání objektů, které aplikují na data LLS pořizená s vysokou hustotou skenování. Do výpočtu modelů vstupují jako parametry například prostupnost paprsku vegetací, pravděpodobnost odrazu signálu v právě zkoumaném pixelu apod. Dokáže do jisté míry řešit i případy, kdy jsou koruny v zápoji a překrývají se.



Obr. 7 Modelace korun Bayesiánským rozpoznáváním (zdroj: Andersen et al. 2002)

Z výsledků Andersena et al. (2002) vyplynulo, že Bayesiánský algoritmus je vhodný k identifikaci jednotlivých stromů v rámci lesního porostu. Dokáže nalézt i menší stromy, co se rozměrů koruny týče. Výsledky se vyrovnají výsledkům fotogrammetrického měření, viz Obr. 8, kde černě jsou Andersenovy výsledky a červeně výsledky fotogrammetrických měření. V porovnání s terénním šetřením stojí za zmínku to, že počet stromů zjištěný v testovaném území (i těch z nižšího patra lesa), souhlasil s počtem, kterého dosáhli Andersen et al. (2002) při svém modelování.



Obr. 8 Vymezení korun
(zdroj: Andersen et al. 2002)

Jako limity zmiňuje fakt, že modelování tvarů korun do zjednodušených elipsoidických těles způsobuje nepřesnosti u členitých asymetrických stromů. Řešením by bylo neomezovat se na elipsoid a modelovat i komplexnější a složitější tvary. Dalším limitem je fakt, že modelování bylo prováděno na malém území, otázkou je, jak by se vypořádalo s robustnějším modelováním na větším zájmovém území.

Tittmann et al. (2011) se zmiňují o limitech modelování tvarů korun stromů na rastrových datech a popisují, jak je možné modelování provádět přímo na mračnu bodů. Piší, že ve valné většině dosavadních studií probíhá nalezení koruny a následné určování tvaru tak, že je mračno bodů převedeno na rastr a na něj jsou aplikovány algoritmy, které jsou dost často primárně určeny pro analýzy terénu (např. watershed, valley-following). A v obou z těchto datových úprav (převod na rastr, následný algoritmus) dochází ke ztrátám na přesnosti. Jednak je při interpolaci mračna bodů, která není triviální záležitostí, nutné zvolit vhodnou interpolační metodu v závislosti na charakteru dat a s tím související výslednou velikost pixelu. Už v tomto kroku dojde v jisté míře ke ztrátě na přesnosti, která je umocněna následným modelováním na takto nepřesných výstupech.

Tittmann et al. (2011) se ve své práci zabývají nalezením jednotlivých korun stromů v datech LLS a následně modelováním tvaru korun stromů. Analýzy provádějí přímo nad mračnem bodů. Poté, co jsou vymezeny jednotlivé koruny, snaží se mračnem bodů proložit matematicky definovaná tělesa, konkrétně kužely a paraboloidy. Jako vhodnou navrhuje modelovací metodu založenou na RANSAC (z angl. Random Sample Consensus). RANSAC funguje tak, že vybere náhodně z dat tři body (minimum nutné pro uskutečnění modelování; jedním z nich je vždy vrchol stromu) a těmi proloží modelované těleso (kužel, paraboloid). Spočte odchylky všech bodů od modelu a na základě prahové hodnoty stanoví, které z bodů

modelu vyhovují. Takto v iteracích pokračuje znovu dokola, dokud nenalezne nejvhodnější řešení.

RANSAC algoritmus zapsaný po jednotlivých krocích:

Vstupy algoritmu: mračno bodů \mathbf{X} , maximální počet iterací **max**, minimální počet bodů pro výpočet modelu **minM** a prahovou vzdálenost **threshold**; dále pak dvě funkce: funkce **fitting**, která pro podmnožinu bodů $\mathbf{S} \subseteq \mathbf{X}$ nalezne optimální reprezentaci modelu a konečně funkce **distance**, která určí vzdálenost libovolného bodu od modelu nalezeného funkcí **fitting**.

Kroky algoritmu:

1. **maxInliers** nastav na 0
2. Zvol náhodně **minM** bodů z množiny \mathbf{X}
3. Pro tyto body spočítej pomocí funkce **fitting** model
4. Pomocí funkce **distance** zjisti vzdálenost všech bodů z \mathbf{X} od tohoto modelu
5. Body, které jsou blíže než **threshold** označ jako **inliers**, body dále než **threshold** označ jako **outliers**
6. Spočítej počet bodů v **inliers**
7. Je-li tento počet větší než **maxInliers**, pak si zapamatuj zvolený model jako dosavadní nejlepší a **maxInliers** nastav na počet bodů v **inliers**
8. (nepovinný krok) Uprav model pomocí funkce **fitting** podle bodů v **inliers**
9. Spočti, kolik iterací budeš muset provést, abys našel s pravděpodobností 0,99 body náležící jenom do inliers – tento počet označ jako **k**

- a. Počet iterací **k** spočten ze vzorce dle Fischlera a Bollese (1981):

$$k = \frac{\log(1 - 0,99)}{\log(1 - b)}$$

Kde **b** je pravděpodobnost, že bude vybrána sada bodů náležících jen do inliers – čili $b = \left(\frac{inl}{n}\right)^{minM}$

Kde **inl** je dosud největší počet nalezených **inliers** a **n** je počet bodů v \mathbf{X}

10. Pokud jsi dosud neprovedl alespoň **k** iterací a zároveň jsi nevyčerpal počet iterací **max**, pokračuj znovu krokem 2

Z jejich závěrů vyplývá, že metoda RANSAC je pro modelování vhodná a do budoucna širěji použitelná. Tento algoritmus je použit i v této práci pro srovnání s výsledky vlastního algoritmu.

3. DATA A METODIKA ZPRACOVÁNÍ

Cílem praktické části této práce je navrhnout alternativní algoritmus pro zjišťování tvaru koruny, který by pak byl následně vhodný i pro aplikaci na celé porosty. Je tedy důležité, aby byl časově efektivní a zvládl zpracovat větší množství dat bez přílišného zjednodušení modelovaného tvaru koruny.

Aby mohly být porovnány výsledky i průběh navrhovaného algoritmu, byl k tomuto srovnání vybrán algoritmus založený na RANSAC a popsáný v práci Tittmanna et al. (2011). Výsledky jsou zároveň porovnány s údaji zjištěnými při terénním měření.

3.1 Data

Data pocházejí z projektu Snímkování a skenování území KRNAP a jeho ochranného pásma a byla pořízena firmou Geodis Brno, spol. s.r.o. a pro účely této diplomové práce poskytnuta Správou KRNAP. Skenování probíhalo v červenci a srpnu roku 2012, tedy ve vegetačním období, kdy všechny stromy byly ve vegetační fázi (s jehličím, olistěné). V rámci letecké kampaně byla naskenována oblast o rozloze 550 km², letová výška byla 700 m, skenovací úhel $\pm 30^\circ$ a překryt skenovacích pásů 20 %. Hustota skenování byla 5 bodů/m², ale v místě překrytů je hustota bodů na m² vyšší.

Data byla pořízena skenerem Riegl LMS-Q680i. Skenování bylo prováděno v rovnoběžných liniích, kolmých na směr letu. Vychylování paprsku v rámci příčného směru zajišťuje rotující zrcadlo. Přesnost skeneru při měření vzdáleností je 20 mm, jak je psáno v produktovém listu (Riegl, 2012). Metoda sběru dat je full-waveform.

Data byla dodána ve formátu las a v souřadnicovém systému UTM-33. Hodnoty souřadnic Z jsou elipsoidickou výškou (Besselův elipsoid). Nejprve byl pomocí nástroje Lastools převeden formát las do formátu txt. Při převodu byly z dat extrahovány atributy x, y, z (tedy prostorové souřadnice bodu mračna), dále intenzita, EN (z angl. echo number – tedy pořadí odrazu) a TN (z angl. total number of echos – tedy celkový počet odrazů zaznamenaný pro jeden vyslaný puls). Následně byly txt soubory zpracovány v software ArcGIS verze 10.2 (ArcMap, ArcScene), kde z nich byly manuálně vybrány body náležící konkrétním korunám

stromů. Taktéž výšky terénu pro konkrétní stromy byly z dat manuálně odečteny. Mračno bodů reprezentující jednu korunu stromu bylo dále upraveno tak, že z něj byly vybrány pouze body, kde $EN = 1$, tedy body prvních odrazů.

Oba algoritmy představené v práci, tedy algoritmus založený na RANSAC a vlastní výsekový algoritmus, byly naprogramovány v software Matlab verze R2013. Vstupem do obou algoritmů je txt soubor představující body prvních odrazů jedné koruny stromu. V souboru jsou tři sloupce oddělené tabulátorem a představující x, y, z souřadnice bodů mračna.

3.2 Terénní měření

V okolí Jablonce nad Jizerou bylo v rámci terénního průzkumu změřeno a nafoceno osm samostatně stojících stromů, a to čtyři listnaté a čtyři jehličnaté. U stromů byla jednak měřena výška, a to výškoměrem Blume-Leiss. Ke stanovení vzdálenosti pozorovatele od stromu byl použit laserový dálkoměr Leica Disto D3 a v případech, kdy nemohla být vzdálenost takto změřena (překážky na trase měření), pak dálkoměrná lat' Silva v kombinaci s dálkoměrem Silva. Veškeré vybavení viz Obr. 9. A dále byl strom nafocen ze všech čtyř světových stran, pokud to bylo možné. Pokud nebyl dostupný ze všech čtyř světových stran, byly pořízeny fotografie s co nejširším úhlem záběru. Fotografie jsou podkladem pro přibližné určení tvaru koruny.



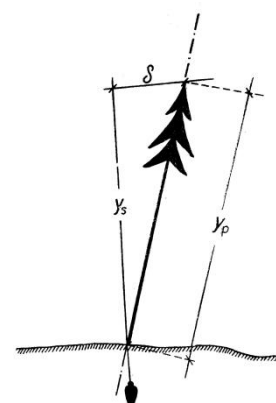
Obr. 9 Vybavení použité při terénním měření (zdroj: autor)

Měřené stromy je možné rozdělit do dvou kategorií podle toho, kolika body byly při skenování zachyceny:

1. Body s vysokou hustotou skenování – více než 90 bodů prvních odrazů na korunu stromu
 - zerav obrovský (*Thuja plicata*) – 99 bodů
 - dub zimní (*Quercus petraea*) – 282 bodů
 - líska obecná (*Corylus avellana*) – 195 bodů
 - smrk ztepilý u školy (*Picea abies*) – 111 bodů
 - smrk ztepilý u hájovny (*Picea abies*) – 212 bodů
2. Body s nízkou hustotou skenování – méně než 35 bodů prvních odrazů na korunu stromu
 - bříza bělokorá (*Betula pendula*) – 13 bodů
 - lípa malolistá (*Tilia cordata*) – 34 bodů
 - borovice lesní (*Pinus sylvestris*) – 25 bodů

3.2.1 Metodika stanovení výšky stromu pomocí výškoměru

Při zjišťování výšky stromu lze rozlišit výšku pravou a výšku svislou, viz Obr. 10. Výška svislá je definovaná jako vzdálenost dvou vodorovných rovin, přičemž vrchní rovina prochází nejvyšším vegetačním orgánem stromu a spodní rovina prochází patou kmene. Výška pravá pak je definována jako vzdálenost dvou rovnoběžných rovin, kdy tyto roviny jsou kolmé na osu kmene, a vrchní z nich opět prochází nejvyšším vegetačním orgánem a spodní patou kmene. Jedná se tedy o výšku měřenou po kmeni stromu. V rámci vlastního terénního šetření byla měřena svislá výška stromu.



Obr. 10 Práva a svislá výška stromu
(zdroj: Krof et al., 1972)

Obecně platí zásada, že výška stromu je měřena z takové vzdálenosti, která se rovná přibližně výšce stromu. Není doporučeno zjišťování provádět z menší vzdálenosti, jelikož pak dochází k chybám díky špatnému určení pozice vrcholu stromu (který je pozorován pod velkým úhlem).

Při měření výšky nakloněného stromu doporučují Krof et al. (1972) provádět dvojité měření z dvou protilehlých míst, obou stejně vzdálených od stromu, a z hodnot pak získat jejich průměr, tím je chyba vzniklá nakloněním stromu odstraněna anebo alespoň zmenšena na přijatelnou míru.

Při zjišťování výšky stromu rostoucího ve svahu je vhodné měření provádět po vrstevnici nebo po svahu dolů. Nevhodné je měřit proti svahu směrem nahoru.

3.2.2 Měření s výškoměrem Blume-Leiss

V první řadě je třeba stanovit odstupovou vzdálenost od měřeného stromu, typicky se jedná o vzdálenosti 15 m, 20 m, 30 m nebo 40 m. Odstupovou vzdálenost je třeba volit s ohledem na přibližnou výšku stromu a dále dbát na to, aby z vybraného místa bylo dobře vidět jak na patu, tak na vrchol stromu. Vzdálenost je možné určit buď pomocí dálkoměru, nebo za využití dálkoměrné latě a dálkoměru Silva, skrze jehož průzor se snažíme zacílit na lať a sesouhlasit skutečnou lať s jejím obrazem. Zjištění výšky stromu pak probíhá tak, že je nejprve zacíleno výškoměrem na vrchol stromu. Z příslušné stupnice je třeba odečíst hodnotu, údaj je možné si i zaaretovat (pokud člověk měření provádí sám) a hodnotu ze stupnice opsat. Stejným způsobem je pak zacíleno na patu kmene a je odečten údaj ze stupnice. Zjištěním vzdáleností obou měření je pak přímo získána výška stromu.

Výhodou tohoto výškoměru je značná přesnost měření, a to 1-2 %, jak uvádějí Krof et al. (1972). Nevýhodou pak nutnost nalezení vhodného stanoviště pro měření, odkud musí být vidět vrchol i pata stromu. Taková měření jsou pak odkázána především na otevřený terén a samostatně stojící stromy.

3.3 Algoritmus dle Tittmanna založený na RANSAC

Pro účely porovnání s vlastním algoritmem popsaným v bodě 3.4 je uvedena implementace algoritmu popsaného v práci Tittmanna et al. (2011). Nejedná se o přesnou implementaci, protože algoritmus především pracuje se segmentací jednotlivých stromů z lesního porostu, což není předmětem této práce. Předmětem práce je však následující krok, který Tittmann et al. (2011) provádějí, a to modelování tvaru koruny do podoby rotačního paraboloidu pomocí algoritmu RANSAC.

3.3.1 Popis implementace algoritmu

Vstupy algoritmu:

Mračno bodů \mathbf{X} náležící jedné koruně stromu, prahová vzdálenost **threshold**; dále pak dvě funkce: funkce **fitting**, která pro podmnožinu bodů $\mathbf{S} \subseteq \mathbf{X}$ nalezne optimální reprezentaci bodů paraboloidem a konečně funkce **distance**, která určí vzdálenost libovolného bodu od modelu nalezeného funkcí **fitting** – implementace těchto funkcí je popsána dále.

Kroky algoritmu:

1. Nalezni bod s nejvyšší souřadnicí Z – tento bod prohlas za vrchol hledaného tvaru a označ ho jako \mathbf{v} ,
2. **maxInliers** nastav na 0.
3. Zvol náhodně 2 body z množiny \mathbf{X} a přidej k nim ještě bod \mathbf{v} .
4. Pro tyto body spočítej pomocí funkce **fitting** model paraboloidu.

5. Pomocí funkce **distance** zjistí vzdálenost všech bodů z \mathbf{X} od modelu.
6. Body, které jsou blíže než **threshold**, označ jako **inliers**, body vzdálenější než **threshold** označ jako **outliers**.
7. Spočítej počet bodů v **inliers**.
8. Je-li tento počet větší než **maxInliers**, pak si zapamatuj zvolený model jako dosavadní nejlepší a **maxInliers** nastav na počet bodů v **inliers**.
9. Pokud již neproběhl zadaný maximální počet iterací **max** (implicitně 100), pokračuj znovu krokem 3.

Popis funkce **fitting** (ad 4, ad 5):

Rotační paraboloid je v práci Tittmanna et al. (2011) definován touto rovnicí:

$$f(x, y) = \alpha((x - x_c)^2 + (y - y_c)^2) + z_c,$$

kde vrchol $\mathbf{v} = [x_c, y_c, z_c]$ a α určuje míru zakřivení paraboloidu. Pokud je α záporné, pak je paraboloid konvexní, pokud je nulové, jedná se o rovinu a pokud je kladné, je paraboloid konkávní. V případě modelování korun stromů tedy budou vycházet záporné hodnoty α .

Protože bod \mathbf{v} je zadaný (jedná se o bod s nejvyšší souřadnicí z), pak zbývá dopočítat parametr α .

Ten lze určit za využití metody nejmenších čtverců, která minimalizuje reziduální chybu. Ta je definována:

$$e = \sum_{i=0}^n (f(x_i, y_i) - z_i)^2,$$

kde $[x_i, y_i, z_i]$ jsou body z množiny \mathbf{X} , tedy koruny stromu.

Po rozepsání:

$$e = \sum_{i=0}^n (\alpha((x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2) + z_c - z_i)^2$$

Při minimalizaci reziduální chyby je hledáno lokální minimum funkce e (tedy bod, kde se první derivace funkce e rovná 0):

$$e' = \sum_{i=0}^n 2(\alpha((x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2) + z_c - z_i) \cdot ((x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2) = 0$$

Po úpravě tedy:

$$\alpha = -\frac{\sum_{i=0}^n ((x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2) \cdot (z_c - z_i)}{\sum_{i=0}^n ((x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2)^2}$$

Toto je tedy výsledná funkce **fitting**, která vstupuje do algoritmu RANSAC.

Hodnota prahu **threshold** byla empiricky stanovena na 0,5 m.

3.3.2 Limity algoritmu

- Algoritmus jako vrchol stromu označí nejvyšší nalezený bod v datech spadajících do jedné koruny stromu (přesněji lokální maximum v konvexním tvaru). Takový vrchol bude s velkou pravděpodobností zkraslený, protože nelze předpokládat, že byl přímo zaměřen.
- Algoritmus používá metodu RANSAC na určení bodů náležících povrchu koruny stromu (tzv. inliers) a body do povrchu koruny stromu nenáležících (tzv. outliers). To na základě blízkosti k hypotetickému modelu (zjednodušenému matematicky popsateľnému tělesu). Jako nejvhodnější je pak vybrán model, který s určitou vzdálenostní tolerancí prochází co nejvíce naměřenými body. Není ale zaručeno, že model prochází opravdu po povrchu koruny.

3.4 Návrh vlastního algoritmu

V této části práce je popsán vlastní algoritmus, který je dále nazýván jako „výsekový algoritmus“. Tento algoritmus reaguje na limity uvedené v bodě 3.3.2. Snaží se nepředpokládat, že vrchol stromu se nachází v naměřených datech, dále se snaží hledat model takový, aby procházel po povrchu koruny, a konečně používá k aproximaci model alternativního rotačního tělesa.

Algoritmus se skládá ze tří významnějších částí:

1. Nalezení osy souměrnosti modelovaného rotačního tělesa (kap. 3.4.2),
2. Modelování tvaru koruny rotačním geometrickým tělesem. Pro jednoduchost je nejprve popsáno modelování do tvaru kužele, a to v části 3.4.3. Na příkladu kužele je vysvětlen základ algoritmu, na který je následně navázáno.
3. Tvar kužele je následně nahrazen modelováním do komplexnějšího tělesa, v tomto případě paraboloidu, které rozšiřuje možnou škálu tvarů (kap. 3.4.4).
4. Aby byl zajištěn požadavek, že model má procházet po povrchu koruny (po plášti), je přidáno vylepšení pomocí výseků a výběru reprezentativních bodů (kap. 3.4.5).

3.4.1 Předpoklady algoritmu

Před popisem vlastního algoritmu je třeba položit některé předpoklady:

[P1] Stromy rostou ve směru gravitace, a tedy jejich osa je totožná se svislicí ve zvoleném bodě.

[P2] Tvary korun stromů se dají vhodně aproximovat rotačními tělesy, kde osa souměrnosti představuje svislici vedenou zvoleným bodem (vychází z [P1]).

[P3] Optimální algoritmus lze rozdělit na dva kroky: a) nalezení osy souměrnosti a b) výpočet parametrů rotačního tělesa s touto osou souměrnosti.

3.4.2 Nalezení osy souměrnosti

Nejjednodušším algoritmem pro nalezení souřadnic x a y osy souměrnosti by byl prostý aritmetický průměr souřadnic x a y jednotlivých bodů koruny modelovaného stromu. K tomu by ale bylo třeba předpokládat, že body v datech jsou rovnoměrně rozmístěny v rámci celého stromu a navíc je strom rotačně symetrický podle středové osy (tj. v žádném směru není více rozšířený než v jiném). Ani jeden z těchto předpokladů není bohužel obecně platný. Proto musí být použitý algoritmus modifikován.

Před vlastním popisem algoritmu je třeba zmínit ještě důležitý fakt, který vyplývá z [P2]:

Vrchol hledaného rotačního tělesa leží na ose souměrnosti a tedy odhadem souřadnic x a y vrcholu jsou získány i x a y souřadnice osy. Konkrétně pokud jsou odhadnuty souřadnice vrcholu jako x_v a y_v , je osa $[x_o, y_o]$ definována rovnicemi $x_o = x_v$ a $y_o = y_v$.

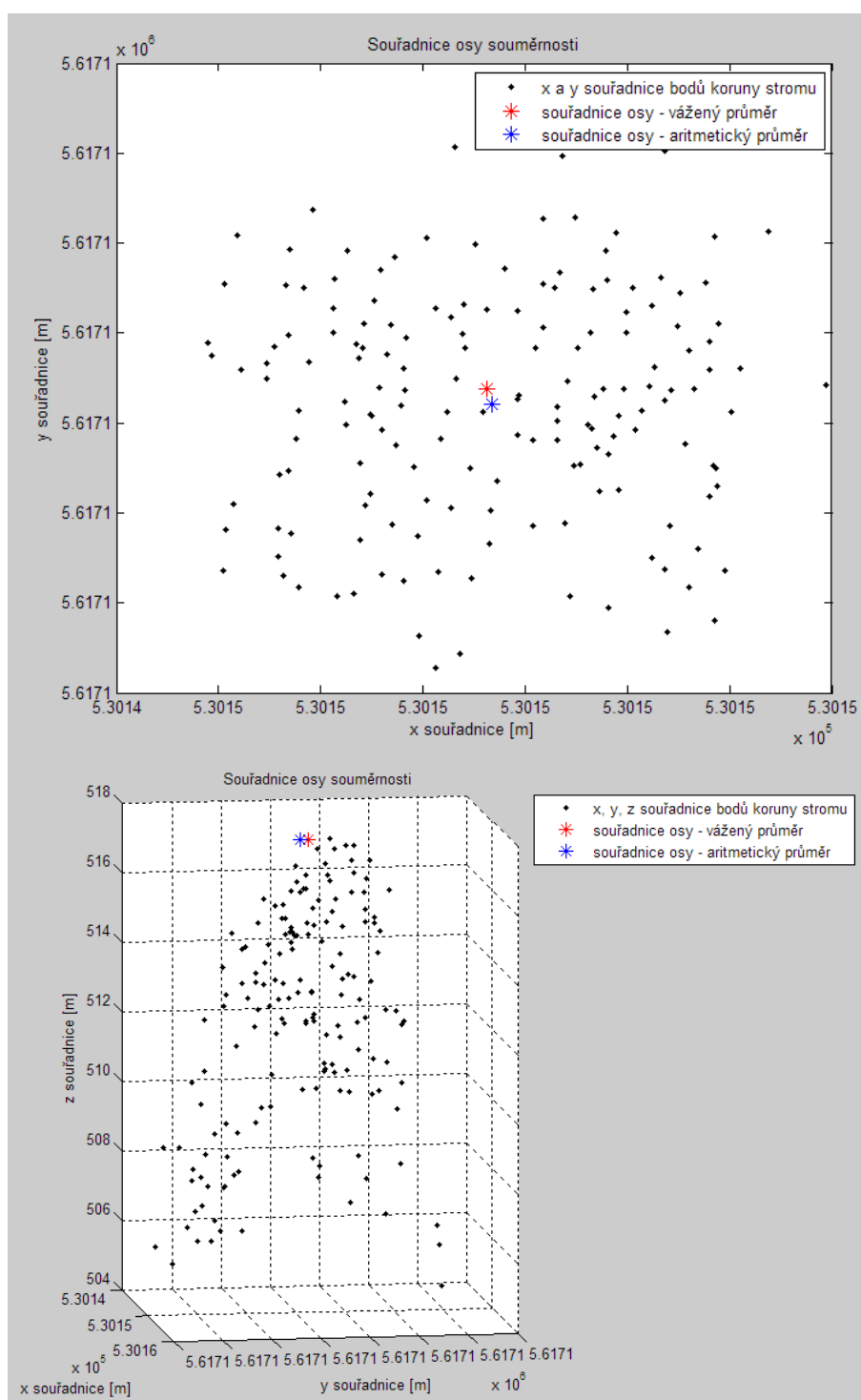
Pokud by platilo, že vrchol je jedním z bodů ve vstupních datech, stačilo by za tyto souřadnice prohlásit x a y bodu s nejvyšší souřadnicí z . Bohužel, tento předpoklad není vždy splněn. Lze ale předpokládat, že byly zaměřeny body, které jsou vrcholu dostatečně blízko. Pro zohlednění těchto bodů lze určit souřadnice x_v a y_v vrcholu jako vážený průměr souřadnic x a y jednotlivých bodů. Váha se stanoví tak, že vyšší body budou mít větší váhu vzhledem k předpokladu, že jsou blíže hledané ose souměrnosti.

Nechť x_o a y_o jsou hledané souřadnice osy souměrnosti a x_i , y_i a z_i souřadnice i -tého bodu. Dále definujme z_{min} jako nejmenší hodnotu souřadnice z ve vstupních datech a z_{max} jako největší hodnotu z ve vstupních datech. Hodnotu x_o a y_o pak lze vypočítat ze vzorce:

$$x_o = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}}{\sum_{i=1}^n \frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}} \quad y_o = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}}{\sum_{i=1}^n \frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}}$$

Tedy souřadnice osy souměrnosti (potažmo vrcholu rotačního tělesa) jsou nalezeny jako průměr x a y hodnot vstupních souřadnic vážených podle vzdálenosti z souřadnice bodu od nejmenší z souřadnice. Vše z důvodu, aby body ležící v koruně blízko jejímu vrcholu měly větší váhu.

Polohu osy souměrnosti vůči x a y souřadnicím jednotlivých bodů je možné vidět na Obr. 11. Pro srovnání byla vypočtena poloha osy souměrnosti jak váženým průměrem, tak prostým aritmetickým průměrem.



Obr. 11 Souřadnice osy souměrnosti (zdroj: autor)

Červeně jsou souřadnice vypočtené váženým průměrem, kde větší váhu mají body s větší výškou. Modře jsou souřadnice získané aritmetickým průměrem všech X a Y souřadnic bodů koruny. Jedná se o korunu zeravu obrovského.

3.4.3 Výpočet s využitím lineární funkce

V této části bude nejprve popsána jednodušší verze algoritmu pracující s kuželem. Nyní jsou tedy známy x_0 a y_0 souřadnice osy souměrnosti a odtud tím pádem rovnice osy kuželu v prostoru. Z předpokladu [P2] plyne, že směrový vektor osy je $(0,0,1)$, rovnice osy má pak parametrické vyjádření:

$$x = x_0$$

$$y = y_0$$

$$z = t; t \in \mathbb{R}$$

Zatím není známa Z souřadnice vrcholu, ani úhel, který svírá plášť kužele s osou kužele.

Pokusme se nyní celou úlohu převést z prostorových souřadnic do rovinných s využitím osové souměrnosti kužele.

Je-li veden vertikální řez kuželem tak, že prochází osou souměrnosti kužele, pak průnik tohoto řezu a pláště kužele tvoří dvě úsečky, které se protínají ve vrcholu. Bez ohledu na to, jaký konkrétní řez je proveden, budou vždy obě tyto úsečky, nacházející se v rovině řezu, vyjádřeny stále stejnými dvěma rovnicemi ve 2D prostoru v rámci řezu. Pokud se omezíme na jednu z těchto úseček (jsou osově souměrné) a najdeme její rovnici v rámci rovinného řezu, budeme schopni spočítat souřadnice vrcholu kužele (jde o průsečík úsečky a osy souměrnosti) i úhel, který svírá plášť kužele s osou kužele.

Plášť kužele má mít minimální vzdálenost od všech bodů mračna. Vzdálenost bodu od pláště kužele odpovídá vzdálenosti bodu od přímky, která vznikne průnikem vertikálního řezu, na kterém leží daný bod a osa souměrnosti, a pláště kužele. Tedy pokud jsou převedeny 3D souřadnice bodu mračna na 2D souřadnice v rámci takového řezu (a toto je provedeno se všemi body mračna), je snahou ve výsledku těmito 2D souřadnicemi proložit přímkou. Úloha je tak z 3D převedena do 2D. Body jsou prokládány přímkou. A to tak, aby součet čtverců vzdáleností od jednotlivých bodů byl co nejmenší.

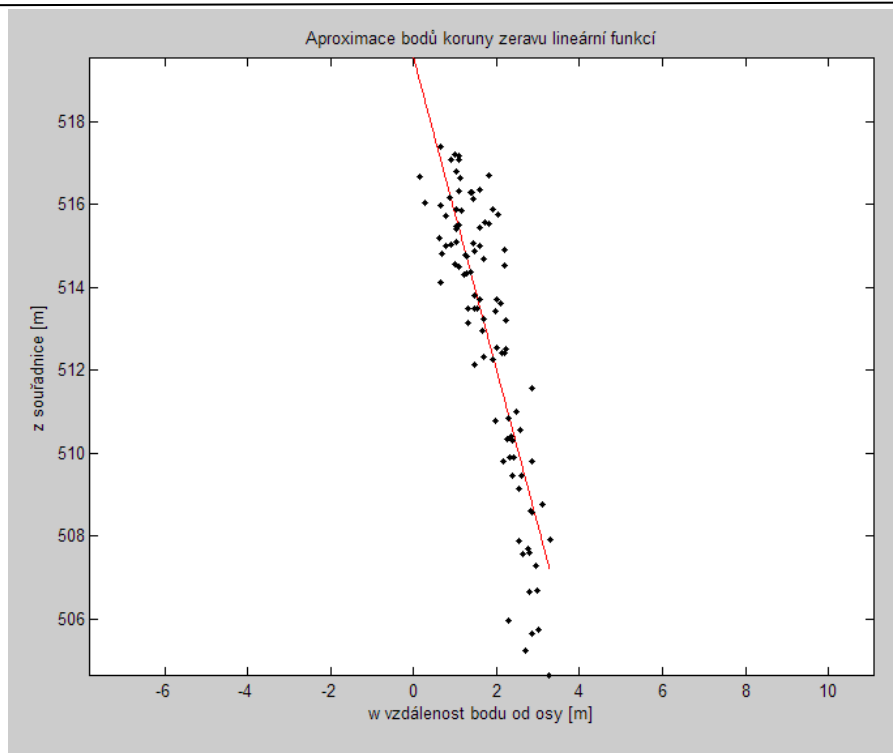
Prostorové souřadnice x_i , y_i a z_i tedy lze převést na dvojice vzdálenosti bodu od osy souměrnosti (definujme je jako w_i) a původní souřadnice z_i :

$$w_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$$

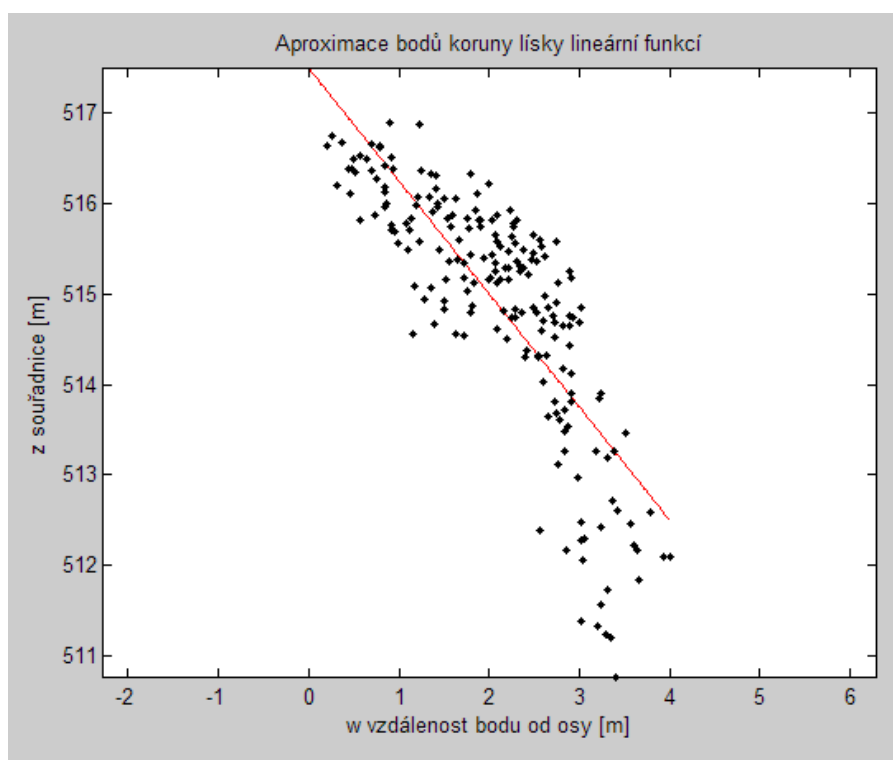
Tyto výsledné dvojice (w_i, z_i) je pak možné dle metody nejmenších čtverců aproximovat lineární funkcí:

$$z \cong aw + b$$

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n w_i z_i - \sum_{i=1}^n w_i \sum_{i=1}^n z_i}{n \sum_{i=1}^n w_i^2 - (\sum_{i=1}^n w_i)^2} \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n w_i^2 \sum_{i=1}^n z_i - \sum_{i=1}^n w_i \sum_{i=1}^n w_i z_i}{n \sum_{i=1}^n w_i^2 - (\sum_{i=1}^n w_i)^2}$$



Obr. 12 Aproximace bodů koruny jehličnatého stromu (zdroj: autor)



Obr. 13 Aproximace bodů koruny listnatého stromu (zdroj: autor)

Je vizuálně patrné, že lineární proložení není úplně dostačující. Tato koruna stromu by výstižněji byla proložena kvadratickou funkcí.

Výsledkem aproximace je přímka, která se nachází uvnitř dat, ale zatím v tomto kroku nekopíruje „povrch“ dat (tedy povrch koruny stromu). A jak je vidět na Obr. 13, ani v některých případech dostatečně nevystihuje tvar dat. Tomu bude pozornost věnována dále, algoritmus bude v následujících podkapitolách postupně zlepšován a zpřesňován, aby výsledné rotační těleso aproximovalo co nejlépe povrch koruny stromu.

3.4.4 Výpočet s využitím kvadratické funkce

V závěru podkapitoly 3.4.3 bylo řečeno, že aproximace přímkou není dostatečně výstižná. Většina korun listnatých stromů by lépe než rotující přímkou, byla vyjádřena spíše rotující křivkou. Na místě v předchozím popsaném algoritmu, kde byly body prokládány přímkou, je třeba provést aproximaci pomocí křivky. Dále je tedy představen algoritmus aproximace koruny stromu pomocí kvadratické funkce, kde je aproximační křivka popsána rovnicí:

$$f(x) = a_2x^2 + a_1x + a_0$$

Pro výpočet konstant a_2 , a_1 , a_0 pomocí metody nejmenších čtverců je třeba vyřešit následující soustavu rovnic:

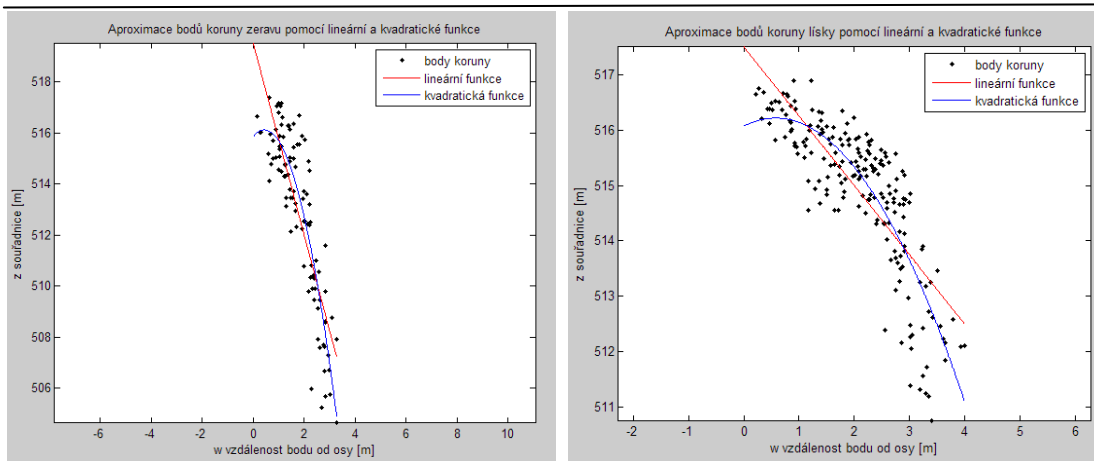
$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i &= a_0n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i &= a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 &= a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{aligned}$$

Základem výpočtu je tedy soustava tří rovnic o třech neznámých, z nichž je zapotřebí získat hodnoty konstant a_2 , a_1 , a_0 . Výpočet je možné provést pomocí Gaussovy eliminace, v SW Matlab se jedná o dělení matic zleva, kdy první matice (A) je čtvercová matice pravých stran (ze vzorce výše) a druhá je sloupcovým vektorem (b) levých stran (ze vzorce výše). Zápis pak vypadá následovně:

$$x = A \setminus b,$$

kde x je sloupcovým vektorem řešení. Rozepsaný vzorec pak bude mít následující podobu:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 \end{bmatrix}$$



Obr. 14 Proložení bodů kvadratickou resp. lineární funkcí (zdroj: autor)

Je patrné, že tvar v rozložení bodů je lépe vystižen kvadratickou funkcí. Dále lze pozorovat, že průběh je ovlivňován body z vnitřku koruny (jsou to body blízké počátku grafu). Cílem je však modelovat tvar povrchu koruny, a tedy křivku vést po pravém okraji mračna bodů.

Jak je z Obr. 14 patrné, křivka bude pro modelování vhodnější nežli přímka. Dokáže totiž lépe vystihnout tvar dat. Navíc při prokládání bodů pomocí kvadratické funkce (viz vzorec kvadratické funkce) je možné v mezním případě, kdy parametr $a_2 = 0$ vymodelovat i přímku. Dále bude uvažováno už jen modelování pomocí kvadratické funkce.

U dosud zmíněných metod lze dále pozorovat, že kvadratická funkce resp. lineární funkce, jsou ovlivňovány odlehlými body z vnitřku koruny stromu, které mají výrazný vliv na průběh křivky, resp. přímky. Laserový paprsek dopadající na korunu stromu prochází prostředím koruny, dokud se neodrazí na výrazné nehomogenitě. Ve zpracovávaném mračnu bodů lze tedy nalézt jednak body, které se nacházejí v blízkosti „pláště“ (povrchu) koruny, ale jednak i body z vnitřku. A právě tyto vnitřní body pak ovlivňují průběh křivky. Vzhledem k tomu, že cílem je modelovat tvar „pláště“ (povrchu) koruny, je třeba vliv těchto bodů z vnitřku koruny odstranit.

3.4.5 Výběr reprezentativních bodů

Jak je vidět na Obr. 14, výsledná funkce je dosti ovlivněna body z vnitřku koruny. Před aplikací samotného proložení bodů kvadratickou funkcí (dále už bude uvažována pouze kvadratická funkce) by tím pádem bylo vhodné provést výběr reprezentativních bodů, kterými křivka bude prokládána. Pro tuto podmnožinu bodů budou kladena následující kritéria.

K1: počet bodů nesmí být omezen na příliš malé číslo, protože tím by se výrazně zkrusila výsledná kvadratická funkce – obecně platí, že čím více bodů, tím bude přesnější (ale se zachováním následujících dalších podmínek),

K2: vybrané body jsou co nejbližší povrchu koruny – toto kritérium je nesnadné exaktně definovat, protože přesný popis povrchu koruny není znám, je možné jej ale vhodně aproximovat,

K3: vybrané body jsou pokud možno rovnoměrně rozmístěny po celém povrchu (plášti) koruny – tedy především jsou rovnoměrně rozvrstveny v rámci osy z (je důležité do podmnožiny zahrnout jak body blízké vrcholu stromu, tak body blízké spodní části koruny).

Následující algoritmus vyhovuje těmto třem kritériím:

PŘÍPRAVA: Algoritmus vychází ze stavu před aplikací kvadratické funkce (tedy po výpočtu souřadnic osy souměrnosti a převodu bodů x_i, y_i a z_i na w_i a z_i)

KROK 1: z_{min} definujeme jako minimální hodnotu z_i ze všech bodů

KROK 2: Pro každý bod (w_i, z_i) definujeme t_i jako vzdálenost (w_i, z_i) od bodu $(0, z_{min})$, tedy $t_i = \sqrt{w_i^2 + (z_i - z_{min})^2}$

KROK 3: Pro každý bod (w_i, z_i) definujeme u_i jako úhel, který svírá průvodič vedoucí z bodu $(0, z_{min})$ do bodu (w_i, z_i) s osou w , tedy $u_i = \sin^{-1} \frac{w_i}{t_i}$

KROK 4: Definujeme U jako množinu všech bodů (w_i, z_i) . Tuto množinu rozdělíme do m navzájem disjunktních podmnožin U_j , kde $j \in \{1; 2; \dots; m\}$ a $U_j = \{(w_k, z_k) | u_k \geq j \cdot s \ \& \ u_k < (j + 1) \cdot s\}$ a kde s je konstanta kroku úhlu.

KROK 5: Z každé množiny U_j vybereme bod, jehož t_j je z dané množiny největší. Je-li daná množina U_j prázdná, žádný bod vybrán není. Tyto body jsou výstupem algoritmu.

KROK 6: Na výstupní body algoritmu je pak aplikována metoda nejmenších čtverců a jsou spočteny parametry kvadratické funkce (viz 3.4.4).

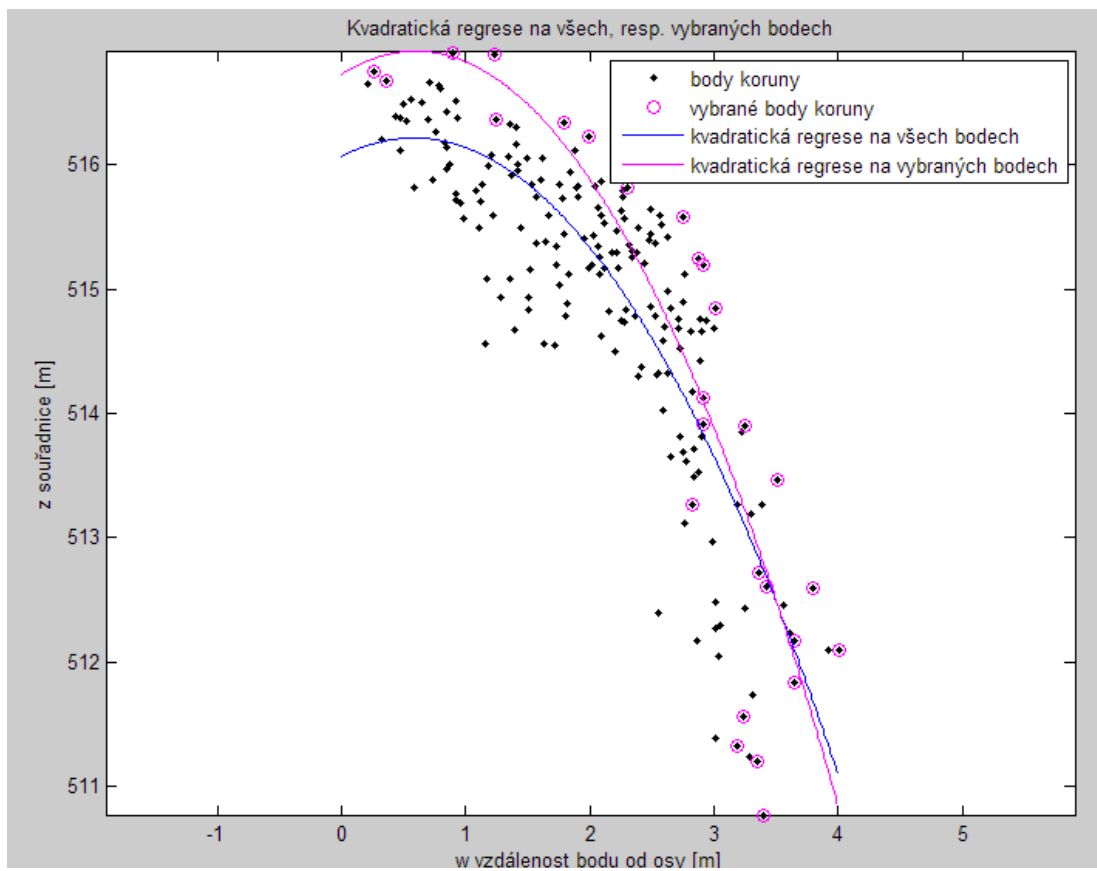
Tento algoritmus splňuje kritéria K1, K2 a K3 z těchto důvodů:

K1: počet bodů ovlivňuje zvolená konstanta kroku úhlu s (zadán ve stupních) – bodů je vždy maximálně $\frac{90}{s}$ a tedy v případě malého počtu výsledných bodů stačí konstantu s snížit.

K2: algoritmus vyřadí body, u nichž platí, že jejich vzdálenost od definovaného počátku $(0, z_{min})$ je nízká a tedy lze u nich předpokládat, že leží uvnitř koruny.

K3: algoritmus vybírá body rovnoměrně díky kroku 4, který rovnoměrně zohledňuje všechny části povrchu koruny.

Popsaný algoritmus tedy povede k přiblížení výsledné kvadratické funkce k povrchu koruny, jak je zdokumentováno na Obr. 15. A toto je tedy výsledný algoritmus, který je aplikován na zpracovávaná data.



Obr. 15 Výsledek výsekového algoritmu aplikovaného na reprezentativní body (zdroj: autor)

4. VÝSLEDKY

Hlavním cílem práce je zjednodušit tvar koruny stromu do matematicky popsatelného tělesa a z něj odvodit geometrické charakteristiky koruny stromu. A dále se pokusit stanovit minimální počet bodů, kterými je třeba korunu stromu zachytit v datech LLS, aby modelování proběhlo korektně.

V rámci práce je navržen vlastní výsekový algoritmus, jehož výstupy jsou porovnávány s algoritmem založeným na RANSAC, představeným ve studii Tittmanna et al. (2011), a s výsledky získanými v rámci terénního měření.

4.1 Výpočet geometrických parametrů jednotlivých stromů

Na základě aproximace tvarů koruny stromu do podoby matematicky popsatelných rotačních těles je možné následně určit některé základní geometrické charakteristiky korun stromů. Pro vlastní výsekový algoritmus popsaný v této práci a pro algoritmus dle Tittmanna et al. (2011) založený na RANSAC lze určit základní charakteristiky takto:

Výška stromu (v)

Vlastní výsekový algoritmus: lze určit jako rozdíl souřadnice z vrcholu tělesa T , které je popsáno následující rovnicí, a výšky paty stromu¹:

$$T = \left\{ (x, y, z) \left| \begin{array}{l} z = a_2((x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2) + \\ a_1\sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2} + a_0 \quad z > z_{min} \end{array} \right. \right\}$$

Výška paty stromu je získána přímým odečtením z dat LLS. Souřadnice z vrcholu tělesa T je ekvivalentní průsečíku kvadratické funkce s osou z . Kvadratická funkce má rovnici

$$f(x) = a_2x^2 + a_1x + a_0$$

¹ Výška paty stromu byla pro každý strom zjištěna z dat LLS, a to přímým odečtením z dat. Lze přibližně odhadnout, že přesnost určení v rovinných terénech je cca 10 cm a v případě svažitého terénu cca 20 cm.

Po dosazení $x = 0$ vychází

$$v = a_0 - z_p$$

kde z_p je výška paty stromu.

Algoritmus založený na RANSAC: vrchol tělesa daného algoritmem je ekvivalentní souřadnici z nejvyššího bodu z dat LLS. Tedy výšku stromu lze určit jako

$$v = z_{max} - z_p$$

Délka koruny (l)

Vlastní výškový algoritmus: lze určit jako rozdíl souřadnice z vrcholu tělesa T (viz určení výšky stromu) od spodního okraje koruny stromu. Spodní okraj koruny stromu lze určit jako ekvivalentní souřadnici z nejnižšího bodu zkoumaných dat koruny z LLS (z_{min}). Obdobně jako u výšky stromu pak vyjde

$$l = a_0 - z_{min}$$

Algoritmus založený na RANSAC: obdobně jako výšku stromu lze určit jako

$$l = z_{max} - z_{min}$$

Šířka koruny (s)

Vlastní výškový algoritmus: lze určit jako dvojnásobek vzdálenosti nejvzdálenějšího bodu od středové osy tělesa T . A tedy

$$s = 2 \cdot w_{max}$$

Algoritmus založený na RANSAC: lze určit jako průměr kruhu, který vznikne průnikem rotačního paraboloidu modelovaného algoritmem a roviny $z = z_{min}$. Po dosazení do rovnice rotačního paraboloidu vyjde:

$$z_{min} = \alpha((x - x_c)^2 + (y - y_c)^2) + z_c$$

Vzdálenost libovolného bodu z obvodu kruhu od středu tohoto kruhu (neboli poloměr kruhu) lze vypočítat jako:

$$r = \sqrt{((x - x_c)^2 + (y - y_c)^2)}$$

Po dosazení do předchozí rovnice pak:

$$z_{min} = \alpha(r^2) + z_c$$

A protože šířka koruny (průměr kruhu) je rovna dvojnásobku poloměru kruhu, pak:

$$s = 2 \cdot \sqrt{\frac{z_{min} - z_c}{\alpha}}$$

Plocha projekce koruny (P)

V případě obou algoritmů lze určit jako obsah kruhu o průměru šířky koruny. Tedy

$$P = \pi \left(\frac{s}{2}\right)^2$$

Objem koruny (V)

V případě obou algoritmů lze určit jako objem rotačního tělesa příslušného modelu. Obecně lze objem rotačního tělesa rotujícího podle svislé osy určit z tohoto vzorce:

$$V = 2\pi \int_0^r x \cdot f(x) dx$$

Kde $f(x)$ je funkce, která rotuje kolem svislé osy a $\langle 0, r \rangle$ je definiční obor funkce $f(x)$. V případě obou algoritmů je třeba r určit tak, aby funkce $f(x)$ nabývala hodnot spadajících do intervalu $\langle z_{min}, \infty \rangle$ ve svém definičním oboru. Proto je nutné r určit tak, aby

$$f(r) = z_{min}$$

Vlastní výsekový algoritmus: do vzorce výše je třeba dosadit za funkci $f(x)$ kvadratickou funkci s rovnicí

$$f(x) = a_2x^2 + a_1x + a_0$$

A tedy

$$V = 2\pi \int_0^r x \cdot (a_2x^2 + a_1x + a_0 - z_{min}) dx$$

Kde s lze spočítat ze vztahu

$$z_{min} = a_2r^2 + a_1r + a_0$$

Algoritmus založený na RANSAC: do vzorce výše je třeba dosadit za funkci $f(x)$ parabolickou funkci s rovnicí

$$f(x) = ax^2 + z_c$$

A tedy

$$V = 2\pi \int_0^r x \cdot (ax^2 + z_c - z_{min}) dx$$

Kde r lze spočítat ze vztahu

$$z_{min} = ar^2 + z_c$$

4.2 Výsledky terénního šetření

U každého zájmového stromu byla změřena výška, určen druh a pořízeny fotografie z několika světových stran. Výška stromu byla vždy měřena dvakrát, a to z dvou různých směrů. V případě, že byl strom hůře přístupný a nebylo možné měření provést z různých směrů, bylo měření provedeno ze dvou různých vzdáleností. Naměřené výšky jsou zaznamenány v Tab. 1. V závorce je vždy uvedeno, z jaké světové strany a z jaké vzdálenosti od stromu bylo měření prováděno. Ve třetím sloupci je pak údaj o délce koruny, který byl odečten z fotografie, a to ze známé výšky stromu a známé délky bílé měřicí latě (120 cm).

Tab. 1 Výstupy terénního měření (zdroj: autor)

Druh dřeviny	1. měření výšky	2. měření výšky	Délka koruny
Zerav obrovský	16,3 m (J 20 m)	16,0 m (V 20 m)	14,7 m
Dub zimní	15,4 m (S 20 m)	15,9 m (V 20 m)	15,4 m
Smrk ztepilý (u školy)	14,3 m (J 15 m)	15,3 m (V 20 m)	14,1 m
Líska obecná	8,2 m (J 20 m)	7,8 m (JV 15 m)	8,2 m
Smrk ztepilý (u hájovny)	24,1 (S 20 m)	24,5 (S 30 m)	23,8 m
Bříza bělokorá	19,5 (Z 20 m)	20,6 (S 20 m)	18,4 m
Lípa malolistá	10,3 m (V 20 m)	10,5 m (Z 20 m)	9,0 m
Borovice lesní	9,4 m (V 20 m)	10,0 m (S 15 m)	8,3 m

4.3 Vlastní výsledky

Parametry spočtené pomocí obou algoritmů a parametry zjištěné z terénního měření jsou zpracované v následujících tabulkách doplněných o vizualizace. Čtyři tabulky jsou vloženy přímo do této kapitoly, zbývající jsou k nalezení v přílohách. Dvě vizualizace jsou vloženy přímo do této kapitoly, ostatní vizualizace jsou pak k nalezení v přílohách. Do výsledného obrázku jsou zakresleny jednak kontury stromů, jednak výstup z algoritmu založeného na RANSAC a jednak výstup z vlastního výsekového algoritmu.

Kontury korun získané z fotografií jsou ve většině případů čtyři a jsou barevně odlišeny takto:

- modrá plná – kontura ze severní strany,
- modrá čárkovaná - kontura z jižní strany,
- červená plná - kontura z východní strany,
- červená čárkovaná - kontura ze západní strany.

V obrázku jsou zároveň zobrazeny aproximační křivky obou algoritmů. Křivky jsou umístěny do pozice dle výšky, která byla modelem spočtena.

Zerav obrovský (*Thuja plicata*)

Níže jsou uvedeny parametry pro zerav západní získané z obou modelů a porovnané s měřením z terénního šetření.

Tab. 2 Zerav obrovský a jeho parametry (zdroj: autor)

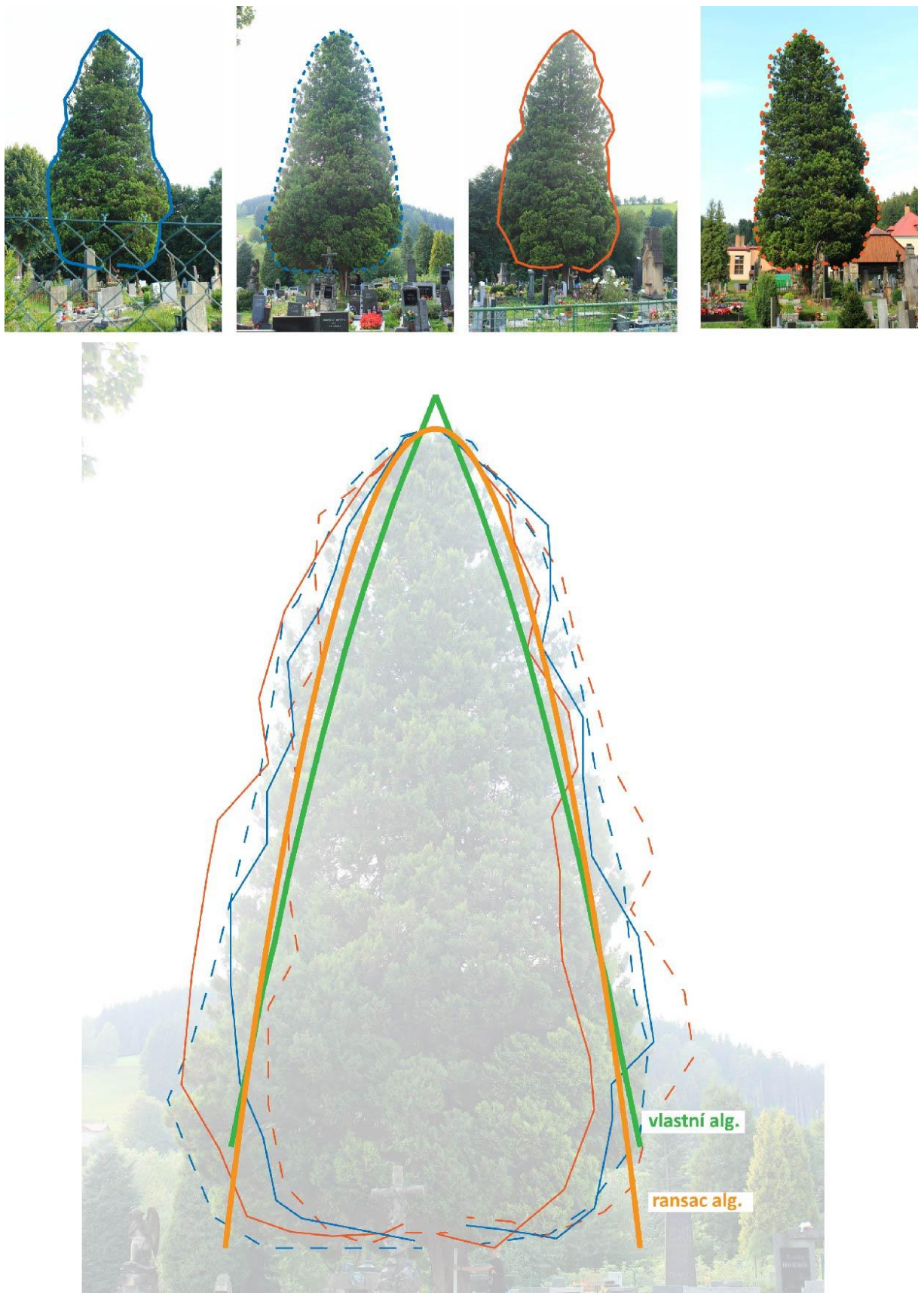
ZERAV OBROVSKÝ (99 LLS bodů)	Vlastní výsekový algoritmus	RANSAC algoritmus	Terénní měření
Výška stromu	16,78 m (+3,6 %)	16,3 m (+0,6 %)	16,2 m { 16,3 m 16,0 m
Délka koruny	13,24 m (-10 %)	12,76 m (-13 %)	14,7 m
Šířka koruny	6,57 m	6,94 m	
Plocha projekce koruny	33,93 m ²	37,82 m ²	
Objem koruny	214,78 m ³	241,28 m ³	
Rovnice	$z = -0,44w^2 - 2,14w + 517,88$	$z = -1,06 \cdot ((x-530147,41)^2 + (y-5617145,84)^2) + 517,4$	

Zerav obrovský (*Thuja plicata*) je exemplářem z rovinatého území hřbitova. Jedná se o jehličnatý neopadavý strom s pravidelným tvarem koruny, jeho tvar se blíží kuželu. Významnou charakteristikou je, že se jedná o strom s neprostupnou korunou, větve jsou velice blízko sebe a koruna se dá označit za kompaktní. Pro modelování tvaru koruny je ideálním příkladem a v datech leteckého laserového skenování jsou díky jeho neprostupnosti zachyceny jak partie v oblasti vrcholu, tak místa z nižších částí koruny a je tak možné zachytit průběh koruny po celé její délce. V datech byl zaznamenán 99 body prvních odrazů.

Při stanovení výšky stromu má v tomto případě skutečnosti blíže RANSAC algoritmus, který za vrchol stromu považuje nejvyšší bod nalezený v datech. V tomto případě je pravděpodobnost, že bude v datech zachycen vrchol nebo místa jemu hodně blízka, velká. To tedy RANSACu nahrává při stanovení výšky stromu. Výsekový algoritmus zde modeluje tvar do tělesa blížícího se kuželu a tím pádem tvoří výraznou špičku, díky níž je výška stromu nadhodnocena, jak vyplývá z Tab. 2.

Délku koruny výsekový algoritmus vypočítává vyšší, opět díky výrazné špičce, kterou vytvoří. Oba algoritmy ale reálnou délku koruny podhodnocují, výsekový algoritmus o 10 %, RANSAC algoritmus o 13 %. Je to díky faktu, že při skenování nebyly zachyceny body ze spodní části koruny zeravu. S tímto faktem se obecně potýkají všechny měřené stromy. Ve spodních partiích stromu se totiž tvar koruny stáčí směrem ke kmeni, a tak je při pohledu shora pro skener skryt.

Z vizuálního porovnání dle Obr. 16 lze říci, že šířku koruny oba algoritmy vypočítávají adekvátně. Je důležité, aby šířka koruny byla určena co možná nejpřesněji, jelikož je pak vstupem do výpočtů plochy projekce koruny a objemu koruny a případná chyba se v těchto výpočtech projeví exponenciálně.



Obr. 16 Zrav obrovský (zdroj: autor)

Smrk ztepilý (*Picea abies*)

Dalším z modelovaných stromů je smrk ztepilý z východní části obce Jablonec nad Jizerou. Nachází se ve svažitém terénu a je zachycen 111 body.

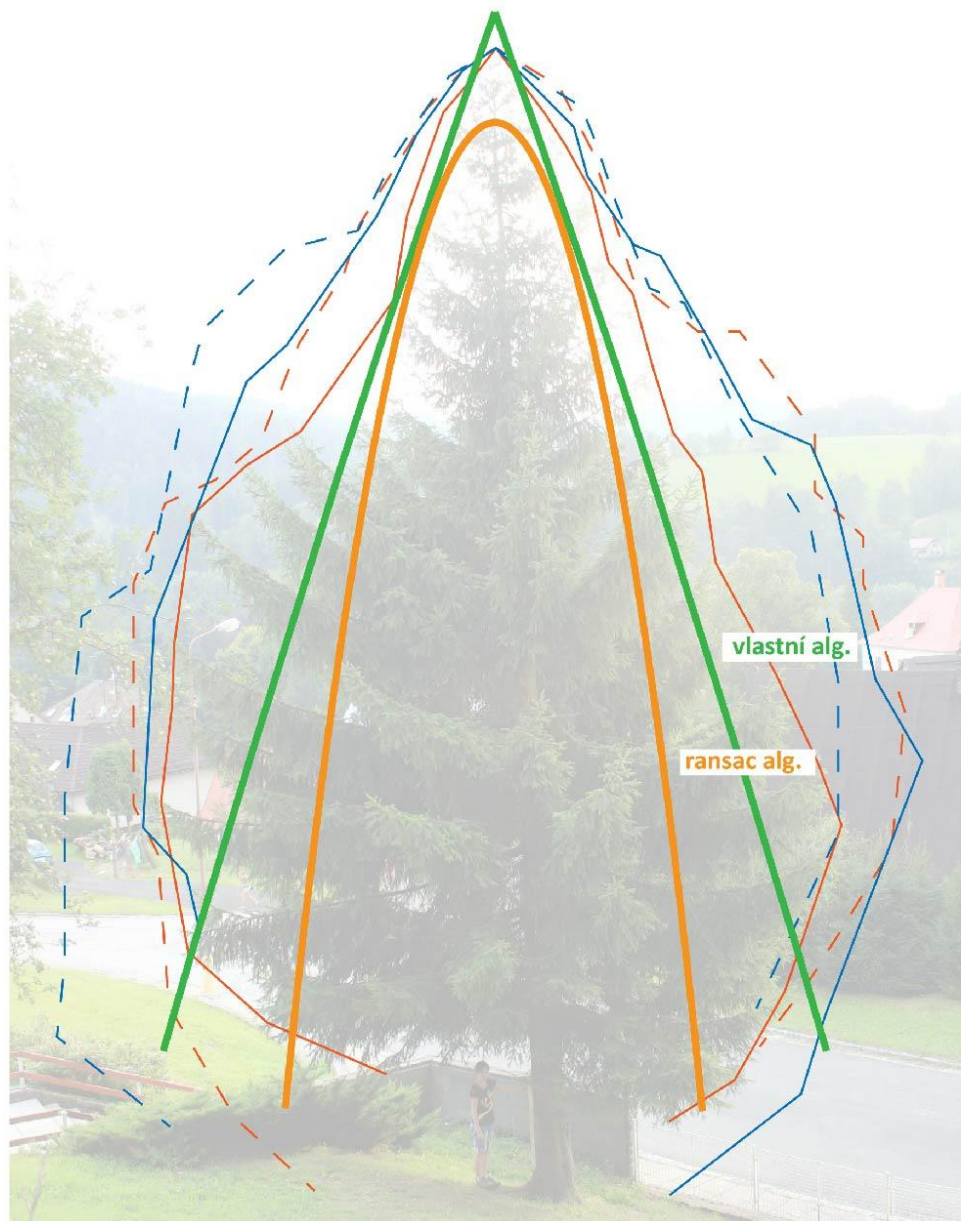
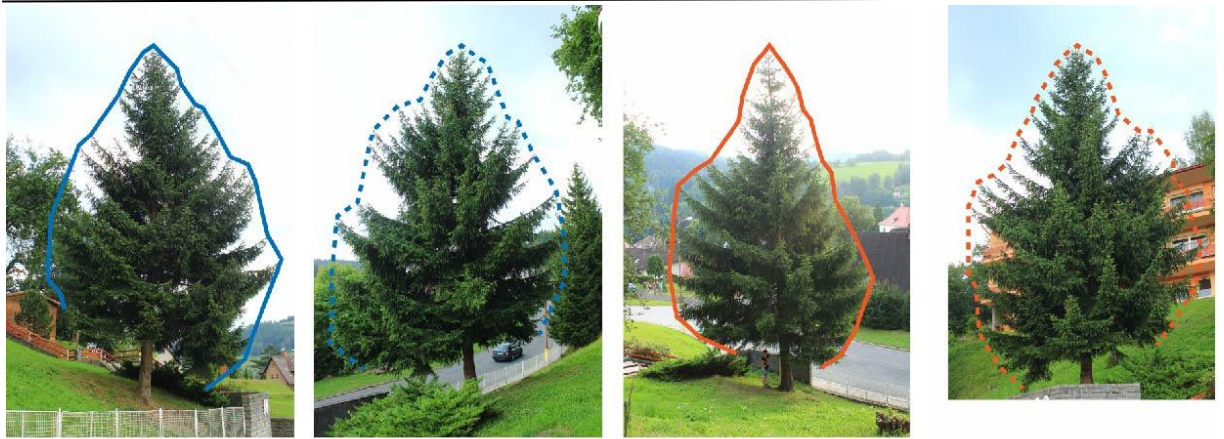
Tab. 3 Smrk ztepilý a jeho parametry (zdroj: autor)

SMRK ZTEPILÝ (u školy) (111 LLS bodů)	Vlastní výsekový algoritmus	RANSAC algoritmus	Terénní měření
Výška stromu	15,3 m (+3,4 %)	13,66 m (-8 %)	14,8 m $\begin{cases} 14,3 \text{ m} \\ 15,3 \text{ m} \end{cases}$
Délka koruny	13,57 m (-3,7 %)	11,93 m (-15 %)	14,1 m
Šířka koruny	7,79 m	5,17 m	
Plocha projekce koruny	47,64 m ²	21,0 m ²	
Objem koruny	278,42 m ³	125,29 m ³	
Rovnice	$z = -0,07w^2 - 2,84w + 532,65$	$z = -1,85 \cdot ((x-530334,53)^2 + (y-5617194,2)^2) + 531,01$	

Modelovaný smrk je charakteristický velkou rozložitostí větví a jeho koruna je, v porovnání se zeravem obrovským, nekompaktní a otevřená. Je tedy již poměrně těžké vyslanými laserovými paprsky zachytit konce větví a tedy smrk v celé jeho šíři. Většina bodů v datech zachycuje strom po celé jeho délce, avšak už ne po celého jeho šířce, jelikož směrem ke koncům větví je koruna stromu hodně nekompaktní a necelistvá. Výsledek se tím pádem projevuje i v získaných modelech, kdy oba algoritmy modelují tento smrk mnohem užší oproti jeho reálné podobě, jak ukazuje Obr. 17.

Jak je patrné z Tab. 3, výšku stromu i délku koruny v tomto případě lépe určil výsekový algoritmus oproti RANSACu. Velký rozdíl je pak patrný ve vypočtených objemech koruny a plochách projekce koruny. Při vizuálním porovnání přesnosti určení šířky stromu lze říci, že oba algoritmy skutečnou šířku koruny podhodnocují, výsekový algoritmus o něco méně.

V případě tohoto smrku ztepilého lépe vyhovuje model získaný z výsekového algoritmu.



Obr. 17 Smrk ztepilý (zdroj: autor)

Dub zimní (*Quercus petraea*)

Tab. 4 Dub zimní a jeho parametry (zdroj: autor)

DUB ZIMNÍ (282 LLS bodů)	Vlastní výsekový algoritmus	RANSAC algoritmus	Terénní měření
Výška stromu	14,13 m (-10 %)	14,41 m (-8 %)	15,7 m $\begin{cases} 15,4 \text{ m} \\ 15,9 \text{ m} \end{cases}$
Délka koruny	14,31 m (-7 %)	14,59 m (-5 %)	15,4 m
Šířka koruny	14,65 m	14,02 m	
Plocha projekce koruny	168,56 m ²	152,3 m ²	
Objem koruny	1436,92 m ³	1111,03 m ³	
Rovnice	$z = -0,22w^2 - 0,04w + 534,83$	$z = -0,3 \cdot ((x-530351,77)^2 + (y-5617163,13)^2) + 535,11$	

Dub zimní je příkladem rozložitého listnatého stromu. Nachází se na okraji svahu a je zachycen dostatkem bodů prvních odrazů, konkrétně 282 body. V tomto případě oba algoritmy korunu dubu vymodelovaly nižší oproti skutečné výšce stromu, resp. délce koruny. Zato šířku (dle vizuálního zhodnocení na základě Přílohy 2) oba nadhodnotily a strom modelují ve spodních partiích širší, než ve skutečnosti je.

Bříza bělokorá (*Betula pendula*)

Tab. 5 Bříza bělokorá a její parametry (zdroj: autor)

BŘÍZA BĚLOKORÁ (13 LLS bodů)	Vlastní výsekový algoritmus	RANSAC algoritmus	Terénní měření
Výška stromu	14,84 m (-26 %)	12,95 m (-36 %)	20,1 m $\begin{cases} 19,5 \text{ m} \\ 20,6 \text{ m} \end{cases}$
Délka koruny	10,24 m (-44 %)	11,81 m (-36 %)	18,4 m
Šířka koruny	6,46 m	5,93 m	
Plocha projekce koruny	32,74 m ²	27,63 m ²	
Objem koruny	165,93 m ³	163,15 m ³	
Rovnice	$z = -0,31w^2 - 1,74w + 603,84$	$z = -1,34 \cdot ((x-531452,14)^2 + (y-5617290,07)^2) + 601,95$	

Bříza bělokorá je příkladem stromu, který je zachycen malým množstvím bodů, konkrétně 13 body. Přestože se jedná o malé množství, oba algoritmy byly schopny nějaký model vytvořit. Ale jak je patrné z Tab. 5, jedná se už o velmi chybné modely. Rozdíl v určení výšek (vůči výšce referenční) u obou přesáhl 25 % a při určení délek koruny dokonce hranici 35 %. Lze tedy říci, že v tomto případě je 13 vstupních bodů pro modelování málo, viz také Příloha 3.

4.4 Statistické zhodnocení

V této části jsou zhodnoceny výsledky obou algoritmů v porovnání s referenčními daty z terénního měření.

Průměrná odchylka měření (průměr ze všech procentuálně vyjádřených odchylek) – vyjadřuje, zda algoritmus nadhodnocuje či spíše podhodnocuje jednotlivé parametry

Tab. 6 Průměrná odchylka měření (zdroj: autor)

		Výška stromu	Délka koruny
Stromy s vysokou hustotou sken. (počet LLS bodů >90)	Vlastní algoritmus	2,74 %	-5,34 %
	RANSAC algoritmus	-5,04 %	-11,82 %
Stromy s nízkou hustotou sken. (počet LLS bodů <35)	Vlastní algoritmus	-21,33 %	-51,67 %
	RANSAC algoritmus	-28,33 %	-50,33 %

Odmocnina ze střední kvadratické chyby měření (odmocnina z průměru druhých mocnin všech procentuálně vyjádřených odchylek) – vyjadřuje jak přesný je algoritmus vzhledem k terénnímu měření, neboli jak moc se odchyluje od terénního měření bez ohledu na směr odchylky.

Tab. 7 Odmocnina ze střední kvadratické chyby měření (zdroj: autor)

		Výška stromu	Délka koruny
Stromy s vysokou hustotou sken. (počet LLS bodů >90)	Vlastní algoritmus	8,40 %	10,19 %
	RANSAC algoritmus	6,16 %	14,46 %
Stromy s nízkou hustotou sken. (počet LLS bodů <35)	Vlastní algoritmus	22,33 %	52,79 %
	RANSAC algoritmus	30,60 %	51,47 %

Z Tab. 6 vyplývá, že oba algoritmy mají tendenci podhodnocovat délku koruny. Je to patrně způsobeno především tím, že v datech LLS se často nenacházejí nejnižší body koruny (paprsek k nim přes korunu stromu nepronikne). Algoritmy tak tyto body nezohlední a korunu omezí. Výška stromu již vychází pro oba algoritmy odlišně. Algoritmus RANSAC má tendenci výšku stromu podhodnocovat (v průměru o 5,04 %), vlastní výsekový algoritmus ji naopak nadhodnocuje (v průměru o 2,74 %). Dochází k tomu patrně z toho důvodu, že algoritmus RANSAC považuje za vrchol stromu nejvyšší změřený bod v datech, který od skutečného vrcholu stromu může být vzdálen. Vlastní algoritmus naopak dopočítává vrchol prodloužením kvadratické křivky, což při nepřesně určeném sklonu křivky může vést k nadhodnocení.

Dále je z Tab. 6 i Tab. 7 patrné, že oba algoritmy poskytují rozumně přesné výsledky pouze pro stromy s dostatečně vysokou hustotou skenování. Souvisí to patrně především s tím, že u stromů s nízkou hustotou skenování nejsou často zachyceny body dostatečně blízko vrcholu stromu ani body z ostatních částí koruny, díky nimž by bylo možno zachytit tvar koruny. Aproximační křivky se díky tomu vychýlí až příliš.

Stromy zachycené v datech LLS méně než 35 body se v rámci této práce ukázaly jako pro modelování nevhodné. Výšky stromů jsou velmi výrazně podhodnoceny, a to o více než 20 % oproti skutečnosti. Délky koruny jsou podhodnoceny v případě obou testovaných algoritmů dokonce o více než 50 %. Oproti skutečné délce koruny jsou tedy poloviční.

5. DISKUZE

Hlavním záměrem této práce je určit tvar koruny stromu, odhadnout geometrické parametry stromu a stanovit minimální počet vstupních bodů pro modelování. První část diskuze se věnuje limitům navrženého výsekového algoritmu, jeho silným a slabým stránkám a možným modifikacím a úpravám podoby algoritmu pro specifické aplikace. V další části je zmíněno, za jakých podmínek by bylo možné geometrické parametry korun stromů stanovit z fotografií pořízených při terénním šetření. A třetí část je věnována odvození charakteristik porostu na základě znalosti charakteristik jednotlivých stromů.

5.1 Diskuze nad výsekovým algoritmem navrženým v rámci práce

Výsekový algoritmus navržený v této práci aproximuje tvar koruny stromu do rotačního tělesa. V jednom z kroků zároveň vybírá ze vstupních dat takové body, které jsou s největší pravděpodobností body pláště (povrchu) koruny. Samotný výpočet tak neprobíhá na stovkách bodů, ale jen na desítkce reprezentativních vybraných bodů.

5.1.1 Limity algoritmu

Výsekový algoritmus navržený v rámci této práce je schopen modelovat rotační těleso. Toto těleso vznikne rotací křivky podle svislé osy (zde osa z). Tato křivka je vyjádřena rovnicí:

$$f(x) = a_2x^2 + a_1x + a_0 ; x \geq 0$$

Těleso je navíc zdola omezeno rovinou nacházející se ve výšce nejnižšího bodu v datech. V případě, že $a_2 = 0$, jsou body proloženy přímkou a těleso, které vznikne její rotací, je kužel. V případě, že $a_1 = 0$, jsou body proloženy křivkou, která je přesnou polovinou paraboly a těleso, které vznikne její rotací, je rotační paraboloid.

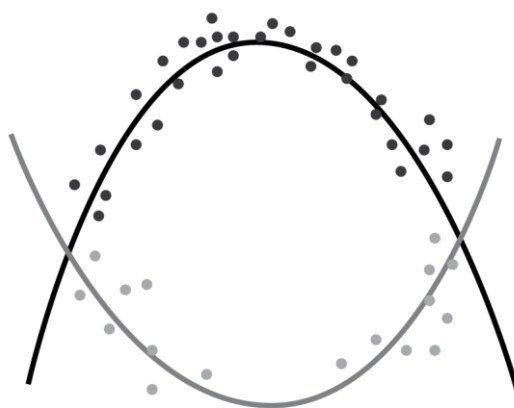
Jak vyplývá z výsledků, výsekový algoritmus jmeně nadhodnocuje výšku stromů. Z vzorků analyzovaných v rámci práce vyplynulo, že nadhodnocení výšky oproti referenčním datům je 2,74 %. Z literatury a analýz dalších autorů však vyplývá, že při stanovování výšky stromu z dat LLS dochází spíše k jejímu podhodnocování vůči referenčním datům. Jak píše například Yu et al. (2004), podhodnocení výšky stromu se dle jejich závěrů pohybuje v rozmezí 0,54 – 0,67 m, a to v přímé úměře k výšce stromu. Podhodnocování výšky stromů zmiňují ve svých pracích i

Brandtberg et al. (2003) nebo Shan a Toth (2009). Hlavním důvodem je, že jako vrchol stromu je zde brán bod s nejvyšší souřadnicí z. Výsekový algoritmus naproti tomu vrchol stromu odhaduje z dat.

V případě, že bude algoritmus aplikován na data velmi úzkých stromů, typicky jsou takovými výrazně vysokými a nepřilíš širokými stromy např. topoly nebo úzké smrky, dojde k tomu, že vymodelovaný tvar bude charakteristický protaženou špičkou u vrcholu. A může se tedy stát, že výšku stromu tak neúměrně nadhodnotí. Možným řešením by bylo do finálně vybraných bodů zahrnout větší množství bodů z oblasti vrcholu stromu. Tím by měly větší vliv na výsledný tvar modelu a špičku by snížily.

Výsekový algoritmus aproximuje velmi věrně takové koruny, jejichž tvar se blíží rotačnímu tělesu. Tedy pravidelné koruny, které nejsou výrazně vychýleny v žádném směru. V případě, že bude koruna stromu výrazně dominantní v jednom směru, výsekový algoritmus přeneseme tuto výchylku i do ostatních směrů a tvar koruny tak spíše nadhodnotí, rozšíří. Tím pádem bude úměrně nadhodnocena i vypočítaná šířka koruny, objem koruny a plocha projekce koruny.

V případě kulatých korun stromů dochází k tomu, že u špičky jsou tyto koruny modelovány adekvátně, ale ve spodních partiích koruny je výsledné těleso až příliš rozšířené, viz např. Příloha 2 Dub zimní nebo Příloha 4 Líska obecná. Je to dáno tím, že model není schopen vytvořit dorůstající tvar v podobě písmene „D“, nebo couvající tvar v podobě písmene „C“, tedy jakýsi půlkruh. Řešení této problematiky by mohlo být následující. Pokud by se podařilo získat i body ze spodní části koruny, např. při terestrickém skenování, bylo by možné provést samostatné modelování na vrchní části koruny a samostatné modelování na spodní části koruny. A za výsledek označit průnik obou modelů, viz Obr. 18.



Obr. 18 Modelování kulatých stromů (zdroj: autor)

Výhodou výsekového algoritmu je, že velké množství dat dokáže zredukovat na hrstku reprezentativních bodů z povrchu koruny. A to právě díky rozdělení dat do úhlových výseků a v nich nalezení bodů, které se s největší pravděpodobností nacházejí na plášti koruny. Této

vlastnosti se dá využít v případě, kdy ve vstupních datech nemusí být jen první odrazy, ale i odrazy další. Je tedy možné ho použít i pro data koruny stromu, ve kterých se nacházejí body prvních, prostředních i posledních odrazů. Velké množství vstupních dat algoritmu nevádí, vybírá z nich jen určité množství reprezentativních bodů.

5.1.2 Možné modifikace výsekového algoritmu

Vlastní výsekový algoritmus představený v práci je možné modifikovat na několika místech:

a) nahrazení výběru reprezentativních bodů (kap. 3.4.5) metodou RANSAC

Metodu určení bodů ležících na povrchu koruny pomocí nejbližšího bodu v kruhovém výseku je možné nahradit metodou RANSAC. Jako model v RANSACu lze použít kvadratickou funkci, stejnou jako v případě výsekového algoritmu, a v postupných iteracích hledat maximální množinu inliers vyhovujících modelu. Lze předpokládat, že RANSAC bude vhodnější v případě, kdy koruna stromu má nekonzistentní tvar, je otevřená anebo dominantní v jednom směru. Na rozdíl od výsekového algoritmu tuto dominanci potlačí, vyváží.

b) proložení bodů složitějším tělesem v kroku 6 části 3.4.5

Prokládání bodů pomocí kvadratické funkce je možné nahradit jiným (složitějším) modelem. Jednak zvýšením stupně polynomu a jednak zcela jiným modelem.

c) modelování do podoby rotačního paraboloidu

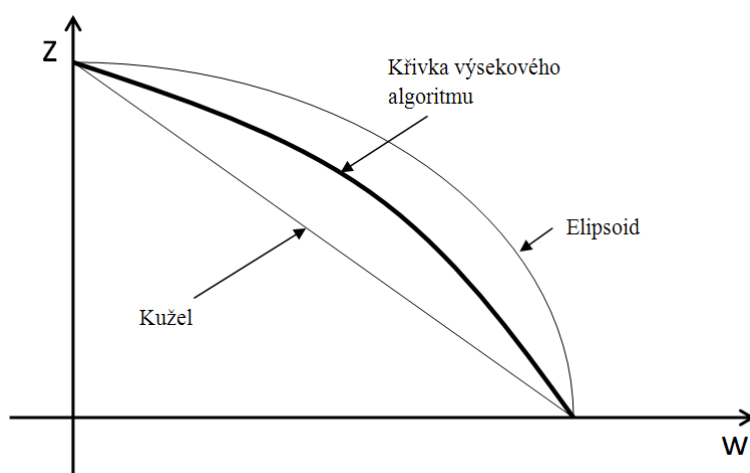
Pokud by bylo třeba mračno bodů prokládat přímo rotačním paraboloidem, tj. tělesem, které je definováno jako (Tittmann et al., 2011):

$$f(x, y) = \alpha((x - x_c)^2 + (y - y_c)^2) + z_c,$$

je možné použít pro výpočet parametru modelu fitting funkci popsanou v kap. 3.3.1.

d) zpětné zjednodušení výsledného rotačního tělesa do podoby kužele, elipsoidu

Může se stát, že pro některé účely je výsledné vymodelované rotační těleso složité a bylo by žádoucí ho ještě více zjednodušit. A to konkrétně do podoby kužele nebo elipsoidu. Tato tělesa se používají při modelování radiačních přenosů. Používají se zde konkrétní zavedené tvary korun, a to kužele a elipsoidy a pomocí nich se namodeluje analyzovaná oblast. Dost často jde o větší oblast na úrovni porostu nebo dílce, jedná se tedy o rozsáhlejší lesní plochu. A proto je důležité při takové datové náročnosti zjednodušit informaci o výšce stromu, šířce a délce koruny, tvaru koruny a objemu stromu do co nejméně datově náročné formy. Tedy do souboru několika parametrů.



Obr. 19 Zjednodušení do podoby kužele či elipsoidu (zdroj: autor)

Při rozhodování, zda se výstup výsekového algoritmu blíží více kuželu nebo elipsoidu, je možné postupovat následujícím způsobem.

Výstup výsekového algoritmu vede k popisu koruny stromu pomocí rotační křivky. Z matematického hlediska se jedná o těleso T popsané následující rovnicí:

$$T = \left\{ (x, y, z) \left| \begin{array}{l} z = a_2((x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2) + \\ a_1\sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2} + a_0 \quad z > z_{min} \end{array} \right. \right\}$$

Rovnice je získána z vyjádření kvadratické funkce v lokálním souřadnicovém systému (w, z) :

$$z = a_2w^2 + a_1w + a_0,$$

do které je za w dosazeno:

$$w_i = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2},$$

a tím pádem převedeno ze souřadnic (w, z) do souřadnic (x, y, z) .

Je-li potřeba, je možné tento tvar dále zjednodušit:

- na kužel
- na polovinu rotačního elipsoidu

Kužel je popsán vrcholem (x_{ku}, y_{ku}, z_{ku}) , výškou v_{ku} a poloměrem podstavy r_{ku} . Tyto veličiny je možné vypočítat z následujících vztahů:

$$x_{ku} = x_0$$

$$y_{ku} = y_0$$

$$z_{ku} = a_0$$

$$v_{ku} = z_{ku} - z_{min}$$

$$z_{min} = a_2r_{ku}^2 + a_1r_{ku} + a_0$$

Tedy osa kužele prochází souřadnicemi $[x_0, y_0]$, vrchol je určen jako průsečík kvadratické funkce se středovou osou ($w = 0$) a šířka jako průsečík kvadratické funkce s podstavou ($z = z_{min}$).

Polovinu rotačního elipsoidu je možné popsat středem podstavy (x_{el}, y_{el}, z_{el}) a délkou všech poloos (a_{el}, b_{el}, c_{el}) , přičemž osy a a b jsou shodné délky. Tyto veličiny lze vypočítat z následujících vztahů:

$$\begin{aligned}x_{el} &= x_0 \\y_{el} &= y_0 \\z_{el} &= z_{min} \\z_{min} &= a_2 a_{el}^2 + a_1 a_{el} + a_0 \\b_{el} &= a_{el} \\c_{el} &= a_0 - z_{min}\end{aligned}$$

Rozhodnutí, zda korunu stromu aproximovat kuželem či polovinou rotačního elipsoidu, je možné učinit na základě porovnání objemů těles. Přičemž porovnávány budou objemy poloviny rotačního elipsoidu a kužele s objemem tělesa T (popsaného výše), které je definováno vypočtenou kvadratickou křivkou. Jako pro aproximaci vhodnější bude vybráno to těleso, jehož objem se více blíží objemu referenčního tělesa T . V tomto případě je však možné si porovnání objemů zjednodušit do porovnávání obsahů, což bude matematicky snáze vyjádřitelné. Je to tedy ekvivalentní, jako kdyby byla tělesa protnuta libovolnou rovinou, která prochází rotační osou tělesa, a porovnávaly by se obsahy takto vzniklých průřezů. Tyto obsahy průřezů je možné vyjádřit následujícími rovnicemi:

$$\begin{aligned}S_c &= 2 \int_0^l a_2 t^2 + a_1 t + a_0 dt \\S_{ku} &= v_{ku} \cdot r_{ku} \\S_{el} &= \frac{\pi a_{el} c_{el}}{2}\end{aligned}$$

Kde S_c je obsah průřezu tělesa T touto rovinou, S_{ku} obsah průřezu kužele touto rovinou a S_{el} obsah průřezu poloviny elipsoidu touto rovinou. Hodnota l z rovnice pro S_c je dána vztahem

$$z_{min} = a_2 l^2 + a_1 l + a_0$$

Finální výběr tělesa je pak proveden na základě porovnání obsahů. Kužel je vybrán v případě, kdy

$$|S_c - S_{ku}| < |S_c - S_{el}|$$

5.1.3 Časová efektivnost algoritmu

Časová náročnost jednotlivých kroků algoritmu vychází takto:

1. **Výpočet středu** – obsahuje pouze jeden cyklus přes všechny body
2. **Určení nejvzdálenějšího bodu v kruhových výsečích** – tato část algoritmu obsahuje dva vnořené cykly – první prochází jednotlivé výseče, kterých je konstantní počet, druhý pak všechny body v rámci výseče a hledá nejvzdálenější.
3. **Výpočet parametrů kvadratické funkce pomocí metody nejmenších čtverců** – v rámci tohoto kroku se vypočte několik hodnot (sum) ze souřadnic všech bodů

Oproti tomu algoritmus založený na RANSAC může mít horší časovou složitost, minimálně obsahuje dva vnořené cykly (jeden je cyklem iterací RANSACu a druhý v rámci jedné iterace RANSACu určuje vzdálenost všech bodů od modelu).

5.2 Diskuze nad způsobem terénního měření

5.2.1 Odhad parametrů z fotografií

Pro účely této práce byly z fotografií pořízeny a odvozeny kontury korun stromů. U některých z těchto kontur je patrné zkreslení, které je způsobeno použitou technikou fotografování. Pro dosažení ideálního zobrazení kontury by bylo vhodné fotit strom z místa, které se nachází v polovině výšky stromu. V takovém případě totiž bude optické zkreslení jak na vrcholu, tak u paty stromu obdobné a celkově minimální. Je-li strom focen z umístění, které je vertikálně v místě paty stromu, dochází k velkému optickému zkreslení u vrcholu stromu. K ještě většímu zkreslení pak dochází, pokud je strom focen z místa, které se výškově nachází pod úrovní paty stromu.

Některé ze zkoumaných stromů se nacházejí ve svahu, což vedlo k tomu, že fotografie stromu z různých světových stran byly pořízeny z různých nadmořských výšek. Kontury zaznamenané z obrysu stromu na fotografiích jsou tak díky tomu zkresleny. Pro přesnější fotografie by bylo třeba pokročilejšího vybavení, například shodné nadmořské výšky fotografií by bylo možné dosáhnout fotografickým vrtulníkem (dronem), který by pořizoval snímky ve stejné výšce kolem celého stromu. Ideální by také byla stejná vzdálenost (strom-vrtulník), ze které by fotografie byly pořízeny.

Pokud by se podařilo pořídit takto popsané ideální fotografie, bylo by možné některé z parametrů počítaných algoritmy určit přímo ze snímku. Na tomto místě by bylo vhodné dále znát hodnotu zkreslení objektivu, kterou by se výpočty daly kalibrovat u okrajů snímku. Z takového měřického snímku o známém měřítku by tak bylo možné odečíst údaj o výšce stromu, délce a šířce koruny, tloušťce kmene.

5.3 Odvození parametrů lesních porostů

Z parametrů vypočtených pro jednotlivé stromy, je možné získat charakteristiky vztažené k porostu. Z výšky stromu odvodit střední výšku porostu, z ploch korunových projekcí pak celkový korunový zápoj v porostu.

Metodami určení střední výšky porostu se zabývají ve svých pracích např. Næset (1997), Sedláčková (2010) nebo Nilsson (1996). Zde je tedy možné navázat. Postup by mohl vypadat následovně. Data LLS na území porostu je třeba nejprve segmentovat a klasifikovat a nalézt v nich koruny jednotlivých stromů. O tématu vymezení korun stromů blíže např. v Tittmann et al. (2011), Eysn et al. (2011), Höfle a Hollaus (2010), Andersen et al. (2002) nebo Tóvári a Vögtle (2004). K těmto segmentům, odpovídajícím jednotlivým korunám stromů, by byly přiřazeny všechny body mračna spadající do konkrétních segmentů. A na tyto body mračna by byl postupně po segmentech aplikován výsekový algoritmus. Výstupem by byla sada geometrických charakteristik pro jednotlivé koruny. Z nich by nejzajímavější pro další výpočty byla výška stromu. Po zvolení vhodné metody určení střední výšky porostu by se ze známých výšek jednotlivých stromů dopočetla střední výška porostu.

Dále je možné se dopracovat k zjištění hodnot výčetní tloušťky kmene, a to přes regresní modelování, kde vstupem jsou výška stromu a poloměr koruny. Velice důležitým předpokladem je však kalibrace tohoto modelu, a to referenčními daty naměřenými v terénu, jak popisuje Heurich (2008). Model lze obecně vyjádřit vztahem:

$$dbh = b_0 + b_1 \cdot v + b_2 \cdot r + b_3 \cdot v^2 + b_4 \cdot r^2,$$

kde b_0 až b_4 jsou konstanty regresního modelu, v je výška stromu vypočtená z dat LLS a r je poloměr koruny získaný z dat LLS.

Z výčetní tloušťky kmene je možné dopočítat výčetní plochu kmene, což je plocha kruhu o výčetní tloušťce ve výši 1,3 m nad zemí. Odtud lze pak plošně stanovit i výčetní plochu porostu.

6. ZÁVĚR

Cílem práce je aproximovat tvar koruny stromu matematicky popsatelným rotačním tělesem. Následně z tohoto modelu získat geometrické parametry, popisující korunu stromu. Dílčím záměrem práce je dále pokusit se stanovit minimální počet bodů prvních odrazů, kterými je potřeba korunu zachytit při skenování, aby modelování mohlo proběhnout korektně.

V rámci práce je navržen vlastní výsekový algoritmus, který je konfrontován s algoritmem založeným na RANSAC dle Tittmanna et al. (2011) a s terénním měřením. Výsekový algoritmus zjednodušuje tvar koruny do podoby rotačního tělesa popsaného kvadratickou funkcí. V jednom z kroků zároveň vybírá ze vstupních dat, takové body, které jsou s největší pravděpodobností body ležící na plášti koruny. Samotný výpočet tak neprobíhá na stovkách bodů, ale jen na desítkách reprezentativních vybraných bodů. Algoritmus je tímto časově efektivní a mohl by být použit i k robustnějším analýzám.

Navržený výsekový algoritmus v porovnání s algoritmem založeným na RANSAC, nevykazuje podhodnocení výšky stromu, což je známým efektem popisovaným v řadě studií. Naopak výšku stromu nadhodnocuje (alespoň dle výsledků této práce), a to v řádu jednotek procent. Je vhodný pro modelování tvarů korun stromů, které byly zachyceny dostatečným množstvím bodů a mají symetrický tvar. Pokud je v datech nedostatek bodů a není v nich možné vysledovat trend, tvar, algoritmus nedospěje ke korektním výsledkům. Výsekový algoritmus nevykazuje horší výsledky než RANSAC. A díky implementaci v software Matlab je algoritmus snadno modifikovatelný a použitelný pro další užití.

V diskuzi navržené modifikace algoritmu by dále mohly zpřesnit aproximaci modelované koruny stromu. A jak bylo v diskuzi dále načrtnuto, na výstupy algoritmu, tedy geometrické parametry koruny stromu, by bylo možné navázat a odvodit tak charakteristiky na úrovni porostu. Algoritmus tak, zvláště při zobecnění na celé porosty, může nalézt uplatnění při inventarizaci lesů.

SEZNAM ZDROJŮ A INFORMACÍ

- ANDERSEN, H. E., REUTEBUCH, S. E., SCHREUDER, G. F. (2002): *Bayesian object recognition for the analysis of complex forest scenes in airborne laser scanner data*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume 34, Part 3/A, s. 35-41.
- AXELSSON, P. (2000): *DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 33, Part B4, s. 110-117.
- BRANDTBERG, T., WARNER, T. A., LANDENBERGER, R. E., MCGRAW, J. B. (2003): *Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America*. Remote Sensing of Environment, Volume 85, Issue 3, s. 290-303.
- CHAUVE, A., MALLET, C., BRETAR, F., DURRIEU, S., DESEILLIGNY, M. P., PUECH, W. (2007): *Processing full-waveform lidar data: modelling raw signals*. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2007, s. 102-107.
- ČÚZK : *Geoportál* [online]. c2010 [cit. 2014-07-16]. Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G). Dostupné z WWW: <[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(ta1lei154ake3ujh5fs0iqpd\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302](http://geoportal.cuzk.cz/(S(ta1lei154ake3ujh5fs0iqpd))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302)>.
- EYSN, L., HOLLAUS, M., SCHADAUER, K., RONCAT, A. (2011): *Crown coverage calculation based on ALS data*. Proceedings of SilviLaser 2011, 11th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, s. 1-10.
- FAO (2000): *FRA 2000 on definitions of forest and forest change*. Forest Resources Assessment Programme, Řím, 15 s. Dostupné z WWW: <<http://www.fao.org/docrep/006/ad665e/ad665e06.htm>>.

- FISCHLER, M. A., BOLLES, R. C. (1981): *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography*. Communications of the ACM, Volume 24, Issue 6, s. 381-395.
- HEURICH, M. (2008): *Automatic recognition and measurement of single trees based on data from airborne laser scanning over the richly structured natural forests of the Bavarian Forest National Park*. Forest Ecology and Management, Volume 255, Issue 7, s. 2416-2433.
- HOLLAUS, M., EYSN, L., BAUERHANSL, C., RICCABONA, F., MAIER, B., JOCHEM, A., PETRINI-MONTEFERRI, F. (2012): *Accuracy assessment of ALS-derived stem volume and biomass maps*. EARSeL eProceedings 11 (1), s. 74-86.
- HOLLAUS, M., MANDLBURGER, G., PFEIFER, N., MÜCKE, W. (2010): *Land cover dependent derivation of digital surface models from airborne laser scanning data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 38, Part 3A, s. 221-226.
- HÖFLE, B., HOLLAUS, M. (2010): *Urban vegetation detection using high density full-waveform airborne lidar data-combination of object-based image and point cloud analysis*. International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, Volume 38, Part 7B, s. 281-286.
- HÖFLE, B., HOLLAUS, M., HAGENAUER, J. (2012): *Urban vegetation detection using radiometrically calibrated small-footprint full-waveform airborne LiDAR data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 67, s. 134-147.
- HYYPÄ, J., SCHARDT, M., HAGGRÉN, H., KOCH, B., LOHR, U., PAANANEN, R., SCHERRER, H. U., LUUKKONEN, H., ZIEGLER, M., HYYPÄ, H., PYYSALO, U., FRIEDLÄNDER, H., UUTTERA, J., WAGNER, S., INKINEN, M., WIMMER, A., KUKKO, A., AHOKAS, E., KARJALAINEN, M. (2001): *High-Scan: The first European-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data*. The Photogrammetric Journal of Finland, Volume 17, Issue 2, s. 58-68.
- JENNINGS, S. B., BROWN, N. D., SHEIL, D. (1999): *Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures*. Forestry, Volume 72 (1), s. 59-74.
- KATO, A., MOSKAL, L. M., SCHIESS, P., SWANSON, M. E., CALHOUN, D., STUETZLE, W. (2009): *Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data*. Remote Sensing of Environment, Volume 113, s. 1148-1162.
- KRAUS, K., PFEIFER, N. (1998): *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 53, Issue 4, s. 193-203.
- KROF, V., HUBAČ, K., ŠMELKO, Š., WOLF, J. (1972): *Dendrometrie*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 371 s.

- LINDBERG, E., HOLLAUS, M. (2012): *Comparison of methods for estimation of stem volume, stem number and basal area from airborne laser scanning data in a hemi-boreal forest*. Remote Sensing, Volume 4 (4), s. 1004-1023.
- MALLET, C., BRETAR, F. (2009): *Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 64, Issue 1, s. 1-16.
- MALLET, C., SOERGEL, U., BRETAR, F. (2008): *Analysis of full-waveform lidar data for classification of urban areas*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume 37, Part B3a, s. 85-91.
- NÆSSET, E. (1997): *Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 52, Issue 2, s. 49-56.
- NILSSON, M. (1996): *Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system*. Remote Sensing of Environment, Volume 56, Issue 1, s. 1-7.
- Mezi stromy : Lesnicko-dřevařský vzdělávací portál [online]. c2007 [cit. 2014-07-02]. Slovníček pojmů. Dostupné z WWW: <<http://www.mezistromy.cz/cz/slovnicek-pojmu>>.
- REITBERGER, J., SCHNÖRR, C., KRZYSZEK, P., STILLA, U. (2009): *3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 64, Issue 6, s. 561-574.
- Riegl USA : *Datasheet LMS-Q680i* [online]. c2012 [cit. 2014-08-12]. LMS-Q680i. Dostupné z WWW: <http://products.rieglusa.com/Asset/10_DataSheet_LMS-Q680i_28-09-2012.pdf>.
- RUTZINGER, M., HÖFLE, B., HOLLAUS, M., PFEIFER, N. (2008): *Object-based point cloud analysis of full-waveform airborne laser scanning data for urban vegetation classification*. Sensors, 8 (8), s. 4505-4528.
- SEDLÁČKOVÁ, O. (2010): *Využití dat leteckého laserového skenování v lesních porostech*. Praha, 2010, 50 s. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy na katedře aplikované geoinformatiky a kartografie.
- SHAN, J., TOTH C. K. (ed.) (2009): *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. Taylor & Francis Group, 590 s.
- THOMAS, V., TREITZ, P., McCAUGHEY, J. H., MORRISON, I. (2006): *Mapping stand-level forest biophysical variables for a mixedwood boreal forest using lidar: an examination of scanning density*. Canadian Journal of Forest Research, Volume 36, s. 34-47.
- TITTMANN, P., SHAFFI, S., HARTSOUGH, B., HAMANN, B. (2011): *Tree detection and delineation from LIDAR point clouds using RANSAC*. Proceedings of SilviLaser 2011, 11th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, s. 1-23.
- TÓVÁRI, D., VÖGTLE, T. (2004): *Classification methods for 3D objects in laserscanning data*. In: Geo-Imagery Bridging Continents 20th ISPRS Congress, s. 12-23.

ÚHÚL Brandýs nad Labem (2003): *Inventarizace lesů v České republice 2001-2004*. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, 136 s. Dostupné z WWW: <<http://www.uhul.cz/nase-cinnost/narodni-inventarizace-lesu/prvni-cyklus-2001-2004>>.

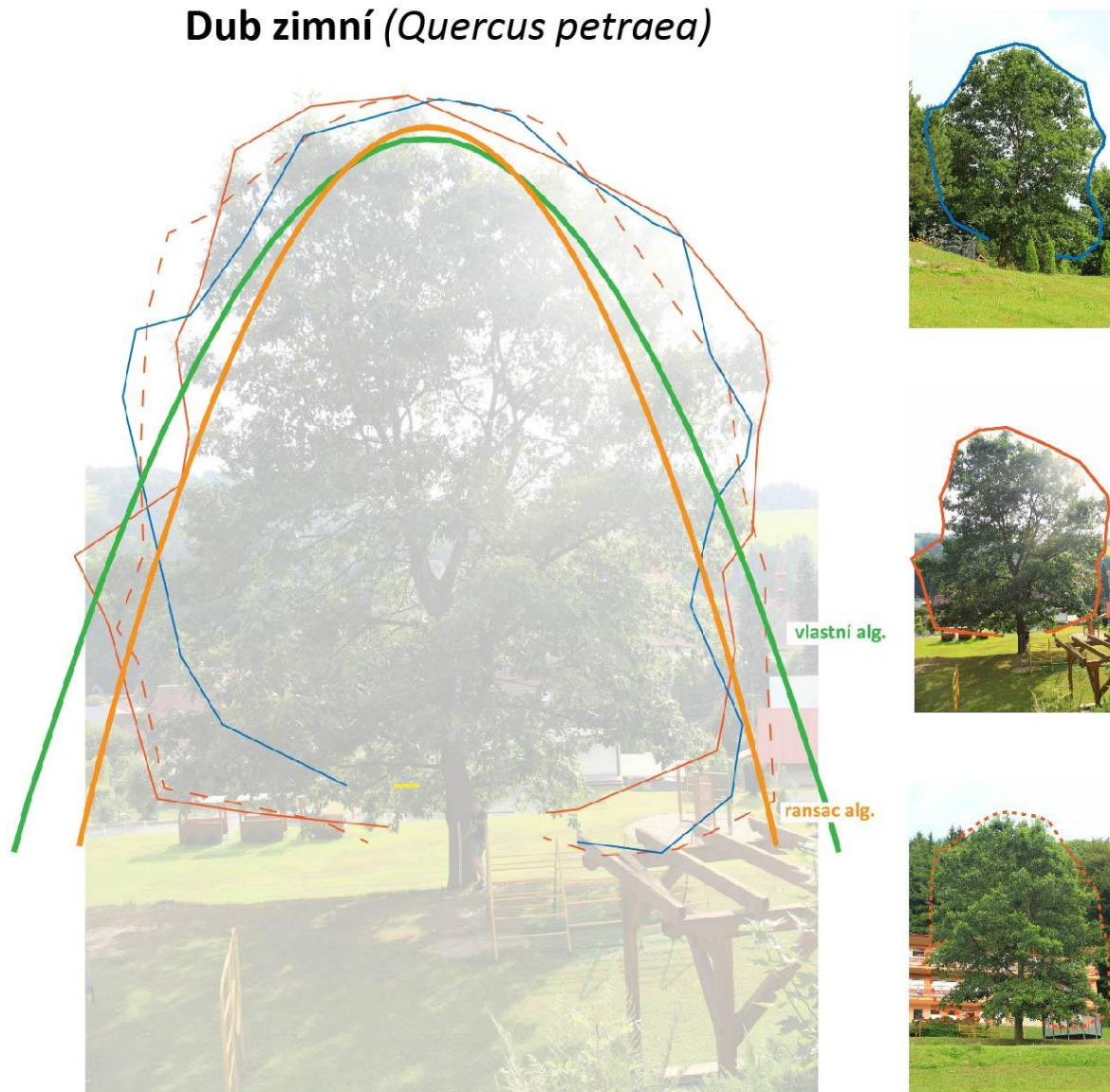
VOSSSELMAN, G., MAAS, H. G. (2010): *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, 318 s.

YU, X., HYYPPÄ, J., KAARTINEN, H., MALTAMO, M. (2004): *Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning*. Remote Sensing of Environment, Volume 90, Issue 4, s. 451-462.

SEZNAM PŘÍLOH

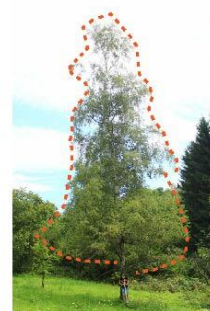
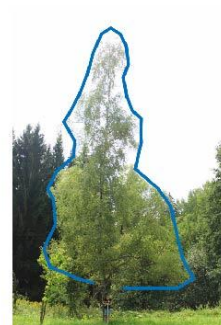
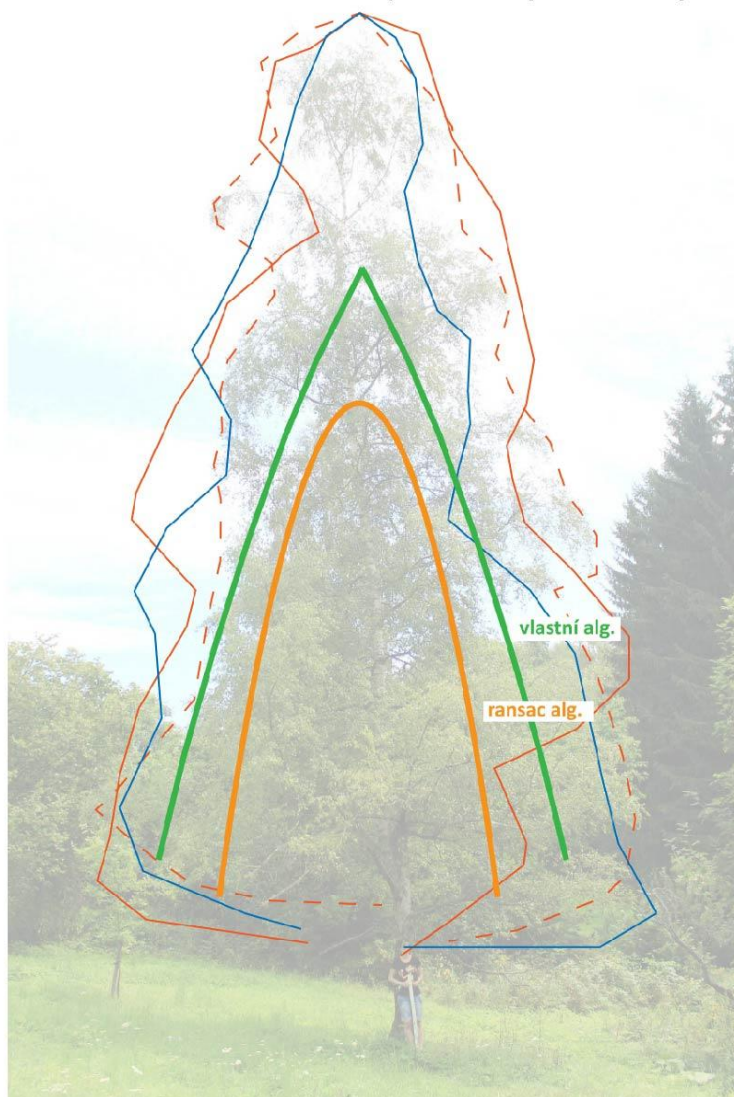
Příloha 1	CD s elektronickou verzí práce
Příloha 2	Dub zimní
Příloha 3	Bříza bělokorá
Příloha 4	Líska obecná
Příloha 5	Smrk ztepilý
Příloha 6	Borovice lesní
Příloha 7	Lípa malolistá

Příloha 2: Dub zimní

Dub zimní (*Quercus petraea*)

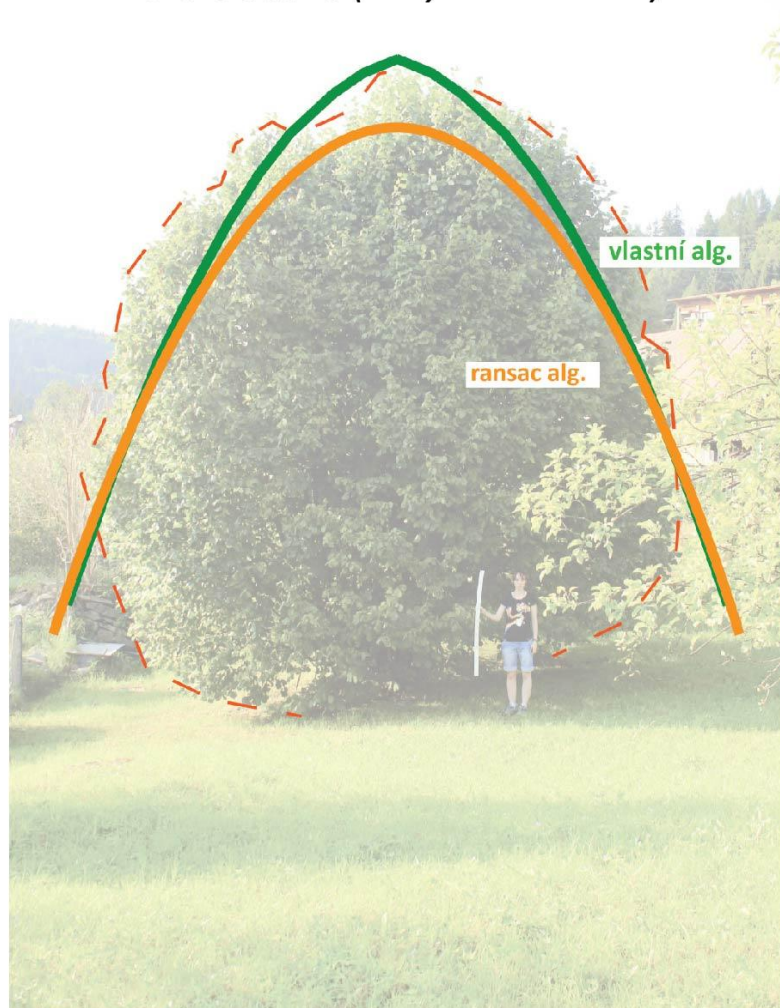
DUB ZIMNÍ (282 LLS bodů)	Vlastní výsekový algoritmus	RANSAC algoritmus	Terénní měření
Výška stromu	14,13 m (-10 %)	14,41 m (-8 %)	15,7 m $\left\{ \begin{array}{l} 15,4 \text{ m} \\ 15,9 \text{ m} \end{array} \right.$
Délka koruny	14,31 m (-7 %)	14,59 m (-5 %)	15,4 m
Šířka koruny	14,65 m	14,02 m	
Plocha projekce koruny	168,56 m ²	152,3 m ²	
Objem koruny	1436,92 m ³	1111,03 m ³	
Rovnice	$z = -0,22w^2 - 0,04w + 534,83$	$z = -0,3 \cdot ((x-530351,77)^2 + (y-5617163,13)^2) + 535,11$	

Příloha 3: Bříza bělokorá

Bříza bělokorá (*Betula pendula*)

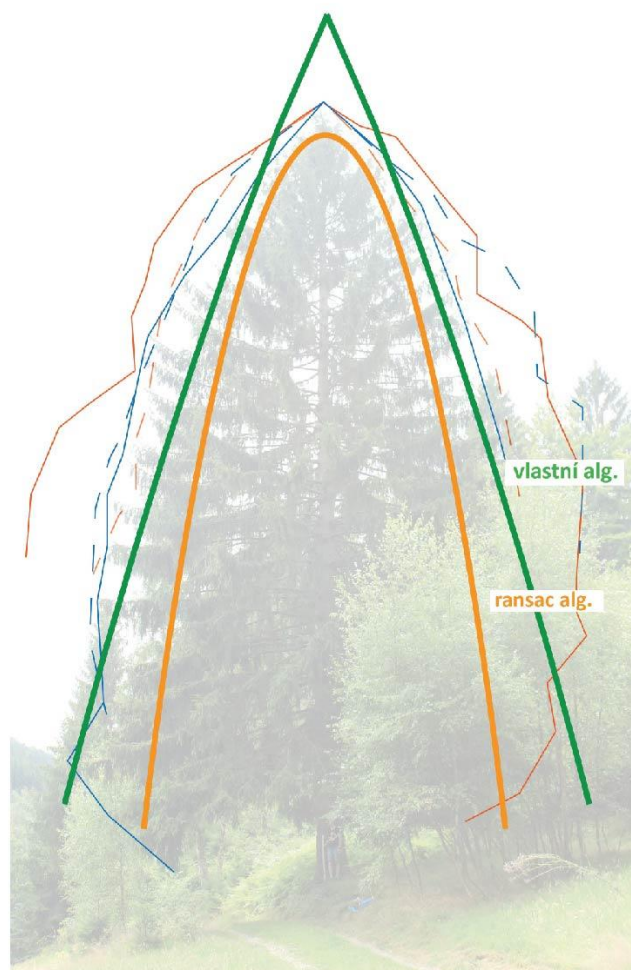
BŘÍZA BĚLOKORÁ (13 LLS bodů)	Vlastní výsekový algoritmus	RANSAC algoritmus	Terénní měření
Výška stromu	14,84 m (-26 %)	12,95 m (-36 %)	20,1 m $\begin{cases} 19,5 \text{ m} \\ 20,6 \text{ m} \end{cases}$
Délka koruny	10,24 m (-44 %)	11,81 m (-36 %)	18,4 m
Šířka koruny	6,46 m	5,93 m	
Plocha projekce koruny	32,74 m ²	27,63 m ²	
Objem koruny	165,93 m ³	163,15 m ³	
Rovnice	$z = -0,31w^2 - 1,74w + 603,84$	$z = -1,34 \cdot ((x-531452,14)^2 + (y-5617290,07)^2) + 601,95$	

Příloha 4: Líška obecná

Líška obecná (*Corylus avellana*)

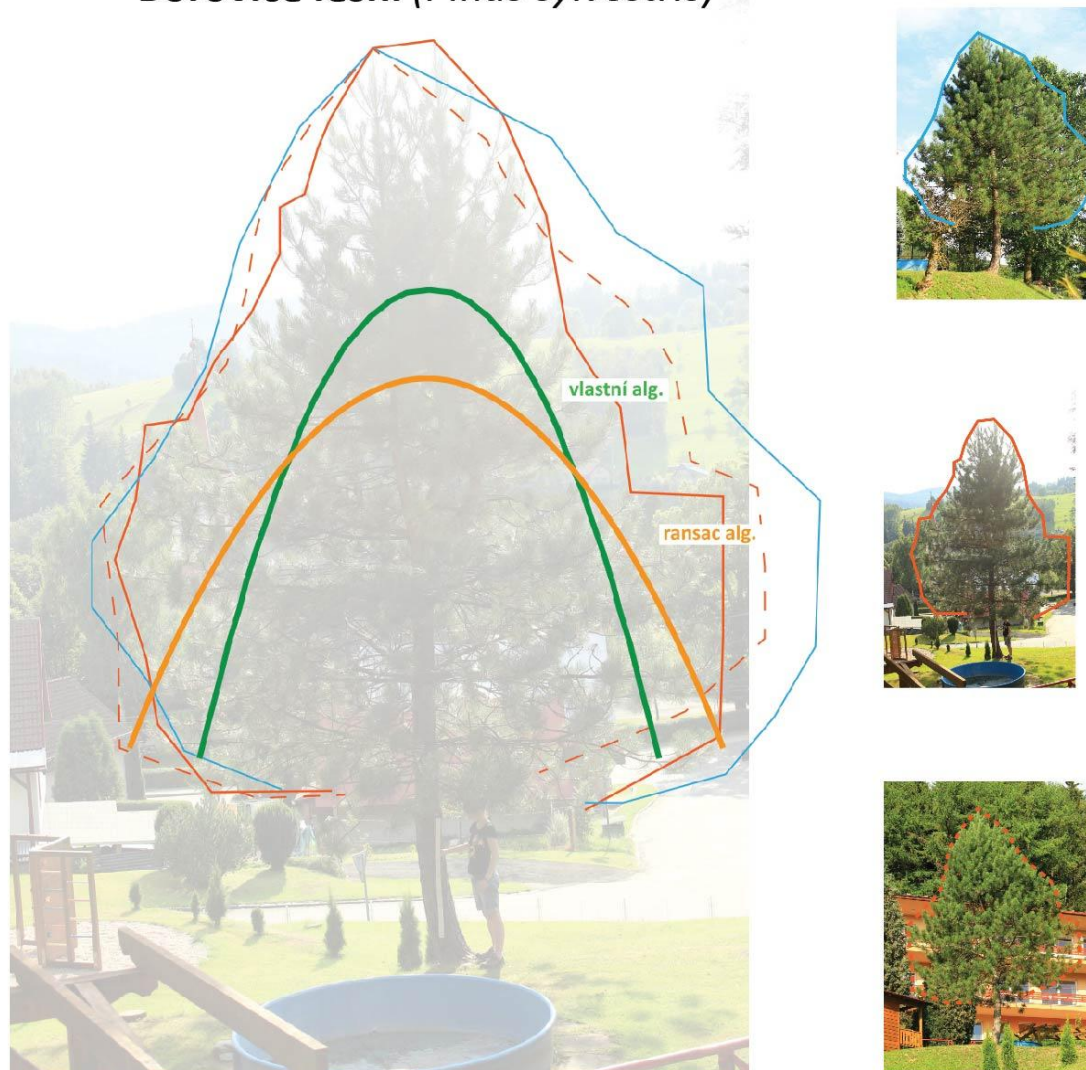
LÍŠKA OBECNÁ (195 LLS bodů)	Vlastní výsekový algoritmus	RANSAC algoritmus	Terénní měření
Výška stromu	8,14 m (+1,7%)	7,40 m (-7,5%)	8,0 m $\begin{cases} 8,2 \text{ m} \\ 7,8 \text{ m} \end{cases}$
Délka koruny	6,88 m (-16%)	6,14 m (-25%)	8,2 m
Šířka koruny	8,01 m	8,74 m	
Plocha projekce koruny	50,47 m ²	59,69 m ²	
Objem koruny	186,26 m ³	183,24 m ³	
Rovnice	$z = -0,32w^2 - 0,24w + 517,64$	$z = -0,32 \cdot ((x-530282,79)^2 + (y-5617207,31)^2) + 516,90$	

Příloha 5: Smrk ztepilý

Smrk ztepilý (*Picea abies*)

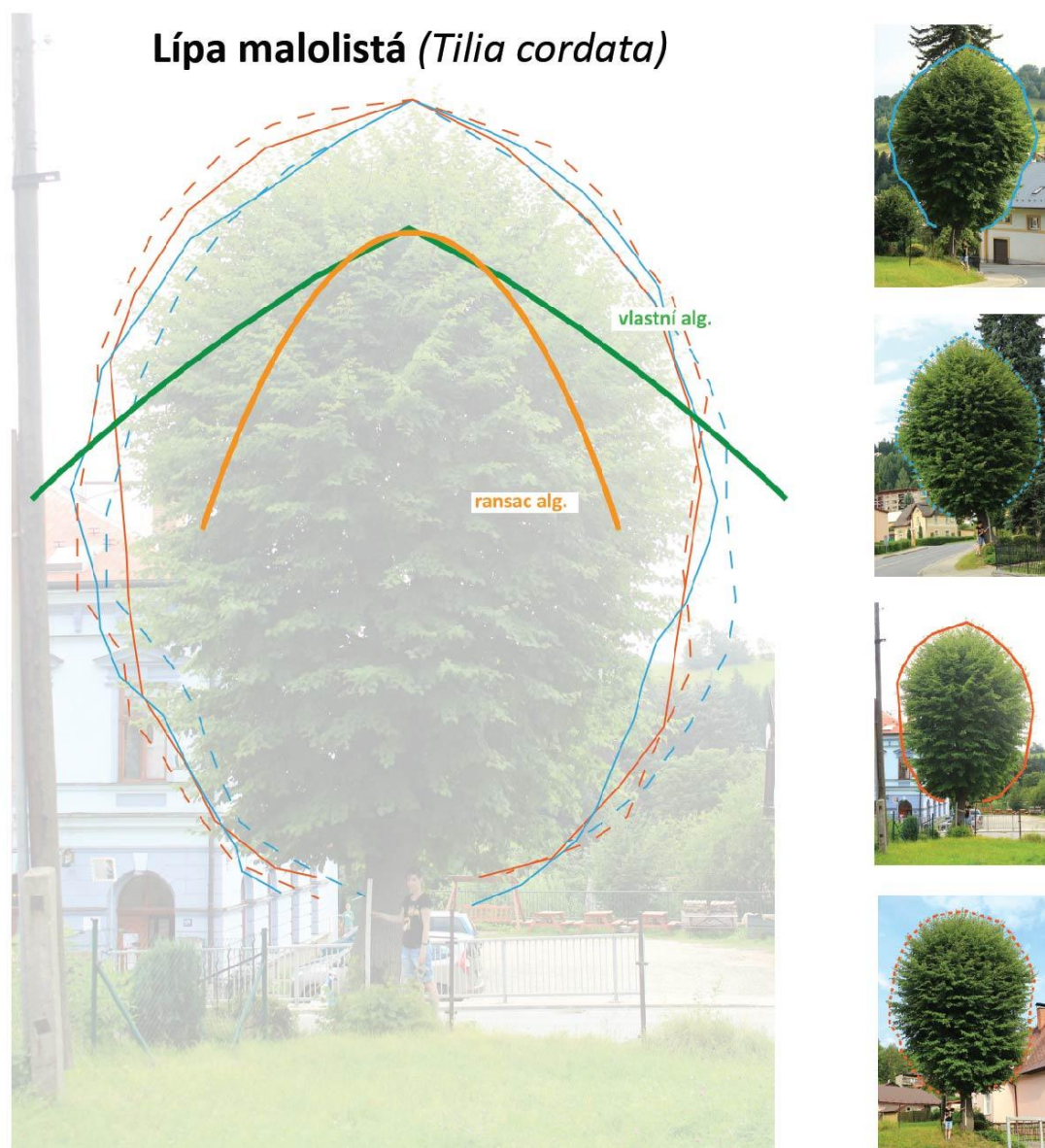
SMRK ZTEPILÝ (u hájovny) (212 LLS bodů)	Vlastní výškový algoritmus	RANSAC algoritmus	Terénní měření
Výška stromu	27,95 m (+15 %)	23,74 m (-2,3 %)	24,3 m $\begin{cases} 24,1 \text{ m} \\ 24,5 \text{ m} \end{cases}$
Délka koruny	26,24 m (+10 %)	23,54 m (-1,1 %)	23,8 m
Šířka koruny	14,35 m	11,87 m	
Plocha projekce koruny	161,76 m ²	110,58 m ²	
Objem koruny	1724,88 m ³	1301,57 m ³	
Rovnice	$z = 0,03w^2 - 3,48w + 581,45$	$z = -0,67 \cdot ((x-531456,21)^2 + (y-5617112,65)^2) + 577,24$	

Příloha 6: Borovice lesní

Borovice lesní (*Pinus sylvestris*)

BOROVICE LESNÍ (25 LLS bodů)	Vlastní výsekový algoritmus	RANSAC algoritmus	Terénní měření
Výška stromu	7,17 m (-26 %)	6,13 m (-37 %)	9,7 m $\left\{ \begin{array}{l} 9,4 \text{ m} \\ 10,0 \text{ m} \end{array} \right.$
Délka koruny	4,66 m (-44 %)	3,88 m (-53 %)	8,3 m
Šířka koruny	4,63 m	6,07 m	
Plocha projekce koruny	16,81 m ²	28,97 m ²	
Objem koruny	42,5 m ³	56,2 m ³	
Rovnice	$z = -0,87w^2 + 0,12w + 528,27$	$z = -0,42 \cdot ((x-530348,96)^2 + (y-5617172,67)^2) + 527,23$	

Příloha 7: Lípa malolistá



LÍPA MALOLISTÁ (34 LLS bodů)	Vlastní výsekový algoritmus	RANSAC algoritmus	Terénní měření
Výška stromu	9,14 m (-12 %)	9,12 m (-12 %)	10,4 m { 10,3 m 10,5 m
Délka koruny	2,95 m (-67 %)	3,39 m (-62 %)	9,0 m
Šířka koruny	5,42 m	4,84 m	
Plocha projekce koruny	23,09 m ²	18,40 m ²	
Objem koruny	62,33 m ³	31,19 m ³	
Rovnice	$z = -0,06w^2 - 0,47w + 510,44$	$z = -0,58 \cdot ((x-530257,83)^2 + (y-5617072,78)^2) + 510,42$	