

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 783*

*ISSN 1213-4198*

*thesis*  
**IS**

*Ing. Jan Novotný*

**Matematické metody  
segmentace obrazu  
pro dálkový průzkum Země**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MATEMATIKY

**Ing. Jan Novotný**

**MATEMATICKÉ METODY SEGMENTACE OBRAZU  
PRO DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ**

MATHEMATICAL METHODS OF IMAGE SEGMENTATION  
FOR REMOTE SENSING APPLICATIONS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Aplikovaná matematika  
Vedoucí práce: doc. PaedDr. Dalibor Martišek, Ph.D.  
Oponenti: doc. Ing. Pavel Štarha, Ph.D.  
doc. Ing. Martin Klimánek, Ph.D.  
Datum obhajoby: 10. června 2015

**Klíčová slova:**

numerické metody analýzy obrazu, dálkový průzkum Země, segmentace jednotlivých korun, normalizovaný model povrchu, růstový algoritmus

**Keywords:**

numerical image processing, remote sensing of environment, individual tree crown segmentation, canopy height model, seeded region growing technique

**Místo uložení práce:**

Ústav matematiky  
Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně  
Technická 2896/2  
616 69 Brno

© Jan Novotný, 2015

ISBN 978-80-214-5225-1

ISSN 1213-4198

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>1 Používané pojmy z dálkového průzkumu Země</b>	<b>7</b>
1.1 Hyperspektrální snímkování . . . . .	7
1.2 Laserové skenování . . . . .	10
<b>2 Matematické metody</b>	<b>12</b>
2.1 Metody přípravy dat . . . . .	12
2.1.1 Od bodového mračka k mapě výšek . . . . .	12
2.1.2 Úpravy mapy výšek . . . . .	13
2.1.3 Klasifikace typů pokryvu . . . . .	14
2.2 Metody detekce stromů . . . . .	16
2.3 Metody delineaace korun . . . . .	17
2.3.1 Zaplavování . . . . .	17
2.3.2 Metoda minimové sítě . . . . .	17
2.3.3 Růstový algoritmus . . . . .	18
<b>3 Z praktické části práce</b>	<b>20</b>
3.1 Hodnocení kvality detekce . . . . .	20
3.2 Hodnocení kvality delineaace . . . . .	22
3.3 Terénní šetření . . . . .	22
<b>Shrnutí</b>	<b>24</b>
<b>Literatura</b>	<b>26</b>
<b>Autorův životopis</b>	<b>29</b>



# Úvod

*Dálkový průzkum Země patří mezi neúspěšnější aplikace číslicového zpracování obrazových dat...* napsali pánové Šonka a Hlaváč v knize Počítačové vidění v roce 1992. Následující dizertační práce mimo jiné ukazuje, že užitečné propojení těchto dvou oborů je velmi aktuální i o dvacet let později.

**Numerické metody analýzy obrazu** jsou aplikovaným odvětvím matematiky, které se zabývá zpracováním obrazové informace nejrůznějšího charakteru. Jedno z použití zná každý Čech i Japonec, a to úpravu fotografií z dovolené. Ani každodenní uživatel kdekeré rozšířené aplikace si možná neuvědomí, že dnes rutinní metody jako je úprava kontrastu či hledání obličejů stojí na pevných matematických základech. Ze tyto postupy musel někdo vymyslet a jejich účinnost a efektivitu odvodit často s pomocí vyšší matematiky v čele s funkcionální analýzou. Rozvoj numerických metod analýzy obrazu pochopitelně souvisí s rozvojem počítačů a počítačové grafiky, kouzlo klasické fotografie je jiná kapitola. Počítačové zpracování snímků, jednodušší i komplexnější, nalézá uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti. Chceme-li uvést jediný příklad, bude to životně důležitý obor – lékařství. V této práci je nicméně pozornost zaměřena jinam.

**Dálkový průzkum Země (DPZ)** je aplikované odvětví vycházející z fyziky, matematiky a geografie, které v nejširším slova smyslu můžeme definovat jako sběr informací o objektech zájmu bez přímého kontaktu s nimi. Teorii elektromagnetického záření, která tento sběr dat umožňuje, se zabývat nebudeme. Nicméně informaci o objektech zájmu nejčastěji získáváme v podobě obrazu, čtenář si může pro začátek představit letecké snímky dostupné jako komplementární k mapám na internetu. Je tedy zřejmé, proč při analýze těchto snímků přichází ke slovu analýza obrazu. Také z historického pohledu mají oba obory mnoho společného. Moderní dějiny DPZ začínají s vynálezem klasické fotografie. A prudký rozvoj DPZ v posledních desetiletích souvisí s rostoucími možnostmi počítačů z hlediska uchování a zpracování velmi objemných obrazových dat.

**Segmentace obrazu** na objekty je jedna ze základních úloh analýzy obrazu. Jedná se o oblast důkladně probádanou, nabízející širokou škálu metod. Nicméně častým závěrem studií je, že každá praktická aplikace má svá specifika a vyžaduje nové metody nebo alespoň pečlivou adaptaci metod známých. V našem případě segmentujeme obraz lesa na jednotlivé stromy. Tento praktický produkt má své uplatnění při další analýze dat DPZ v aplikacích lesnických nebo též při zpracování problematiky městské zástavby a zeleně. Vývoj segmentačních algoritmů (pro lesnické aplikace DPZ) se táhne odbornou literaturou od 90. let 20. století, postupně se mění zdroj použitých dat (od satelitního DPZ k leteckému) i jejich charakter (od snímkování k laserovému skenování) a prostorové rozlišení

(od metrů k centimetrům). Jednotlivé přístupy jsou tak stále vylepšovány, jejich adaptace na nové skutečnosti umožňuje kvalitnější výstup. Autor se touto oblastí výzkumu zabývá již 7 let, od diplomové práce, i v rámci zaměstnání v Oddělení dálkového průzkumu Země v Centru výzkumu globální změny, AV ČR. Tato dizertační práce představuje široký náhled na segmentační postup a jeho praktickou aplikaci na reálná data z prostředí lesů České republiky. Hlavní teoretický přínos tvoří nový segmentační algoritmus kombinující růstový algoritmus a aktivní konturu, viz cíl 1. Praktickým přínosem je rozbor parametrizace a aplikovatelnosti na reálná data, viz cíl 2 a rovněž kompletní softwarové zpracování celé problematiky, viz cíl 3.

### **Mezi hlavní cíle práce patří:**

1. Rozvinout inovativní přístup kombinující růstový algoritmus s aktivní konturou na hranici koruny.
2. Posoudit účinnost tří různých segmentačních algoritmů na vybraných lesních porostech. Určit optimální parametry segmentačních algoritmů pro homogenní porostní celky. Popsat vztahy mezi parametry vstupních dat a jednotlivých fází segmentace.
3. Softwarové zpracování segmentačního procesu.

Z práce vybíráme do těchto tezí následující zásadní pasáže: Představíme základní principy hyperspektrálního snímkování a laserového skenování, v rozsahu nutném k porozumění zpracovávaným datovým strukturám. Z matematických metod rozebereme přípravu dat před samotnou segmentací, pro fázi detekce pozice stromů zmíníme metodu hledání lokálních maxim a pro fázi delineeace plochy korun uvedeme centrální výsledek dizertační práce – růstový algoritmus kombinovaný s aktivní konturou pro aproximaci hranice koruny. Z praktických aplikací se zaměříme na hodnocení výsledků segmentace. Pro další témata a implementaci algoritmů dle cíle 3 v tomto krátkém textu místo není, odkazujeme na plnou verzi dizertační práce.

# Kapitola 1

## Používané pojmy z dálkového průzkumu Země

Dálkový průzkum Země (DPZ) v nejširším slova smyslu můžeme definovat jako sběr informací o objektech zájmu bez přímého kontaktu s nimi. Například oči čtenáře provádí dálkový průzkum ve chvíli, kdy čtou tento text. Přesněji technicky řečeno, oči měří světlo odražené od potištěného papíru a mozek, náš zabudovaný počítač, překládá snímaný obraz na písmena, z nichž skládá slova a věty. Shrnutí historie DPZ, výklad teoretických principů a příklady aplikací leteckého DPZ laskavý čtenář nalezne například v nové české monografii [31], kterou vydalo v roce 2014 Centrum výzkumu globální změny, a do níž přispíval též autor této dizertační práce.

V dalším se zaměříme pouze na vybrané pojmy z teorie DPZ, které přímo souvisí s praktickou částí práce. Metody DPZ dělíme do dvou skupin podle použitého zdroje energie na metody aktivní a pasivní. V praxi lesnických aplikací, které jsou předmětem této dizertační práce, je příkladem pasivních metod hyperspektrální snímkování (1.1) a příkladem aktivních metod je laserové skenování (1.2).

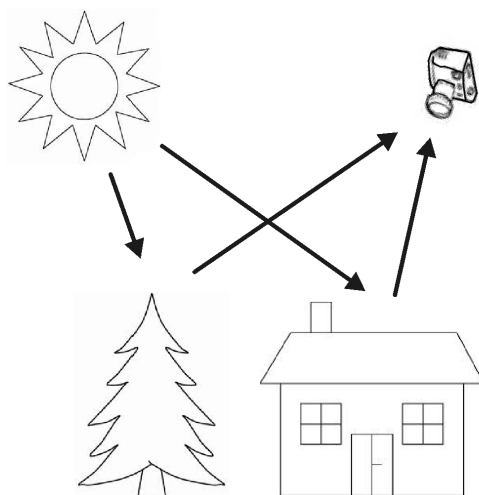
### 1.1 Hyperspektrální snímkování

Hyperspektrální snímkování je metodou pasivní, neboť skener pasivně snímá elektromagnetické záření odražené od objektů na zemském povrchu (zdrojem je Slunce, obrázek 1.1). V našich konkrétních úlohách se jedná o letecký řádkový hyperspektrální skener, což implikuje následující principy a parametry. Nasnímaná data mají podobu tzv. hyperspektrální krychle. První rozměr má význam prostorové souřadnice napříč letu a je dán počtem čipů v řádku skeneru. Druhý prostorový rozměr vzniká pohybem letadla, tedy podél letu. Jeden snímek má tedy podobu obdélníkové matice (silně nečtvercové) a každý pixel nese hodnotu energie odražené z určitého čtverce na zemském povrchu. Rozměr pixelu, jinak též prostorové rozlišení, závisí na technických limitech skeneru a také na výšce a rychlosti letu. Pro naše aplikace je typické prostorové rozlišení 20 centimetrů až 1 metr (obrázek 1.2). Pro plošné skenování většího území pak spojujeme více letových linií vedle sebe. Třetí rozměr hyperspektrální krychle je dán spektrálním rozlišením. Odražené elek-



elektromagnetické záření je děličem separováno podle vlnové délky a jednotlivé hodnoty jsou ukládány samostatně. Prostorová složka hyperspektrální krychle je tedy 2-D fyzickým digitálním prostorem, jeho fyzické domény nazýváme pixely (akronym z anglického picture element). Celou hyperspektrální krychli můžeme též chápat jako  $m$ -složkový obraz. Barevná letecká fotografie má 3 složky. Má-li obraz složek více, hovoříme o multispektrálním snímku. Typickým příkladem je využití vhodných filtrů a přidání vrstvy v oblasti infračerveného elektromagnetického záření. Jsou-li složek desítky tak, jak to popisujeme výše, hovoříme o hyperspektrálním snímkování. U hyperspektrálních dat pro každý prostorový pixel získáváme spektrální profil, což je závislost odrazivosti na vlnové délce (obrázek 1.3). Typické rozlišení (krok) v našich aplikacích je 2 až 10 nanometrů a rozsah spektra 400 až 1000 nanometrů.

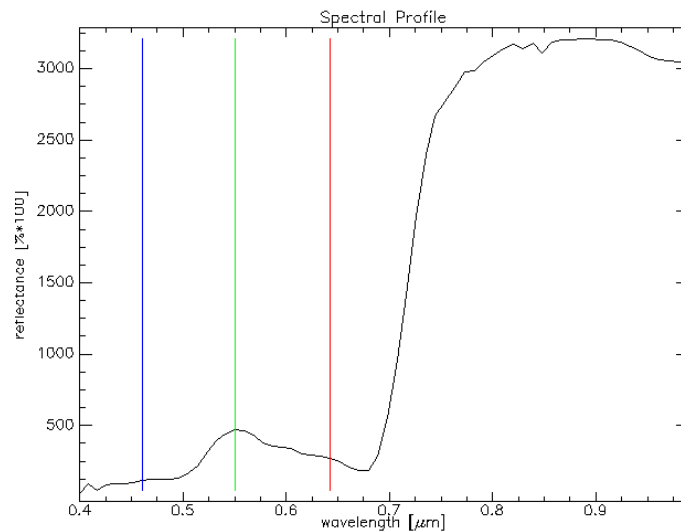
Z technických podrobností nad rámec této práce dodejme, že surová nasnímaná data prochází procesem radiometrických, atmosférických a geometrických korekcí tak, abychom získali datovou krychli s významem popsáním v předchozím odstavci. Více informací o této problematice lze nalézt v monografii [31].



Obrázek 1.1: *Princip pasivního dálkového průzkumu.* Zdrojem energie je Slunce. Senzory měří záření odražené od různých objektů na zemském povrchu. Energie odražená od jednotlivých objektů se pochopitelně liší. Různé typy povrchů odrážejí různou procentuální část dopadajícího záření, zbytek pohlcují. (Navíc, především v termální části spektra, některé objekty samy energii vyzařují.) Odrazové poměry se mohou lišit podle vlnové délky záření. Některé typy povrchů mají také různé odrazové vlastnosti podle směru dopadajícího záření, rozlišujeme například zrcadlový odraz a lambertiánský povrch odrážející všemi směry stejně. Všechny tyto vlivy se skládají do výsledného obrazu (obrázek 1.2), respektive do tzv. spektrální charakteristiky každého obrazového bodu (obrázek 1.3). V tomto schématu lze poukázat ještě na jeden podstatný jev, a tím je ovlivnění měřené energie průchodem atmosférou. Obrazová data DPZ proto pořizujeme především za jasných dnů a i tak jednotlivá spektra musíme od vlivu atmosféry očisťovat.



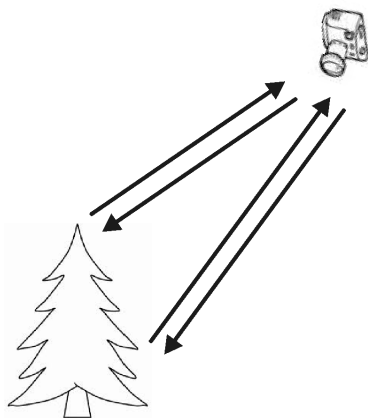
Obrázek 1.2: *Letecký snímek vysokého prostorového rozlišení.* Při zobrazení v pravých barvách není rozdíl oproti klasické fotografii. Je třeba mít na paměti, že u hyperspektrálních dat máme pro každý pixel k dispozici informace o celém spektru odrazivosti v jisté škále vlnových délek. Viz též obrázek 1.3.



Obrázek 1.3: *Typický spektrální profil zelené vegetace,* například jehlic smrku. Na vodorovné ose x je vlnová délka elektromagnetického záření v mikrometrech, na svislé ose y je odrazivost povrchu v procentech (v tomto případě násobeno 100, pohybujeme se tedy v rozsahu 0 až 30 procent). Charakteristickými prvky spektra zelené vegetace jsou lokální maximum okolo 550 nm, lokální minimum okolo 680 nm, následný prudký nárůst a vysoká stabilní úroveň v blízké infračervené oblasti, za 800 nm. Svislé barevné linie znázorňují pozici vlnové délky modrého, zeleného a červeného viditelného světla.

## 1.2 Laserové skenování

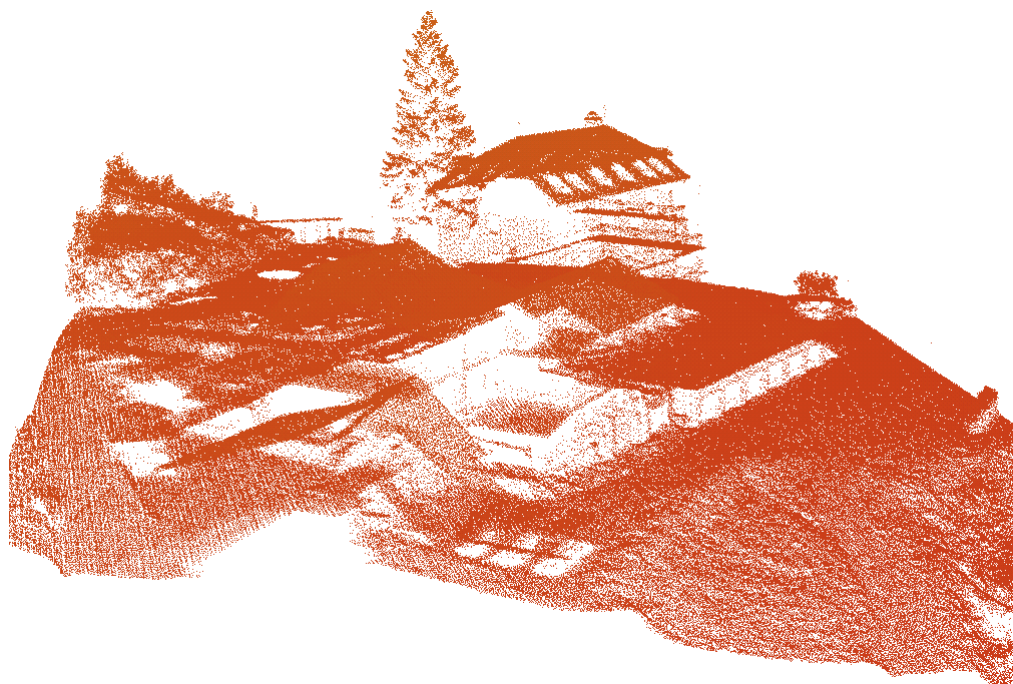
Laserové skenování je metodou aktivní, neboť skener aktivně vysílá laserový pulz směrem k objektům na zemském povrchu a následně měří energii od nich odraženou (obrázek 1.4). V našem případě se jedná o letecké laserové skenování, což implikuje následující principy a parametry. Při znalosti časů vyslání a přijetí pulzu z jednoduché rovnice  $2s = c\Delta t$  odvozujeme vzdálenost odrážejícího povrchu (vzdálenost  $s$ , rozdíl časů  $\Delta t$  a rychlost světla  $c$ ). Při znalosti přesné polohy letadla (a skeneru) během trajektorie letu dopočítáváme přesné 3D souřadnice místa odrazu. Surová data z laserového skenování mají podobu bodového mračka (obrázek 1.5). Klíčovým parametrem skenování je bodová hustota, která je dána technickými omezeními skeneru a výškou letu, a která určí, jak podrobnou a věrnou 3D rekonstrukci objektů na zemském povrchu získáme. Pro naši aplikaci je typická hustota 5 až 50 bodů na metr čtvereční.



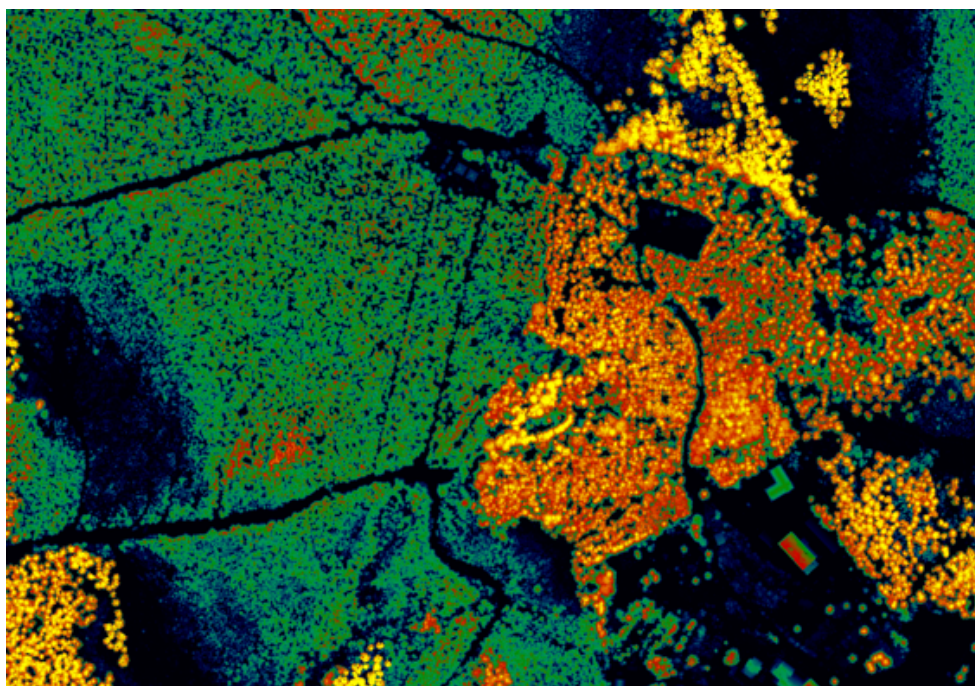
Obrázek 1.4: *Princip aktivního dálkového průzkumu.* Skener vysílá k objektům na povrchu Země laserové pulzy a měří časové zpoždění a intenzitu odraženého záření.

Z technických podrobností přesahujících záběr této práce dodejme, že použitá vlnová délka laserového záření (např. 1062 nm) ovlivňuje, jak se od kterých povrchů pulz odráží. Dále, že moderní laserové skenery umožňují zaznamenávat kompletní průběh odražené vlny, což také umožňuje odvozovat podrobnější informace o odrážejících objektech. Více informací o této problematice lze nalézt v monografii [31].

My se spokojíme s prostou 3D rekonstrukcí a pro segmentaci korun stromů odvozujeme z bodového mračka mapu výšek objektů (obrázek 1.6). K jejímu výpočtu potřebujeme v bodovém mračku rozdělit body na odrazy od terénu (holé země), odrazy od povrchu nadzemních objektů (stromů. . .) a případné další odrazy (například uvnitř koruny). Následně interpolujeme body terénu do rastrové vrstvy nazývané digitální model terénu (DTM) a body povrchu do rastrové vrstvy nazývané digitální model povrchu (DSM). Odečtením DSM-DTM získáváme výše zmíněnou mapu výšek, nazývanou též normalizovaný model povrchu (nDSM). Proces tvorby mapy výšek rozebíráme v kapitole 2.1.



Obrázek 1.5: *Bodové mračno*. Základním produktem laserového skenování je mračno bodů, jejich poloha v prostoru udává 3D souřadnice odrazů jednotlivých vyslaných pulzů. Jak vidíme, může sloužit k velmi podrobnému mapování povrchů přirozených i umělých.



Obrázek 1.6: *Normalizovaný model povrchu*. Výška nadzemních objektů je zde reprezentována na škále od černé (0 m) po žlutou (30 m).

# Kapitola 2

## Matematické metody

Tato kapitola popisuje matematické metody zpracování obrazu používané při segmentaci korun. Kapitola je v souladu se zvyklostmi rozdělena do tří částí podle jednotlivých fází segmentačního procesu. První podkapitola se zabývá předzpracováním obrazu před samotným zahájením segmentace, druhá podkapitola je zaměřena na fázi detekce pozice stromů a třetí na následnou delineaci plochy korun (2.3).

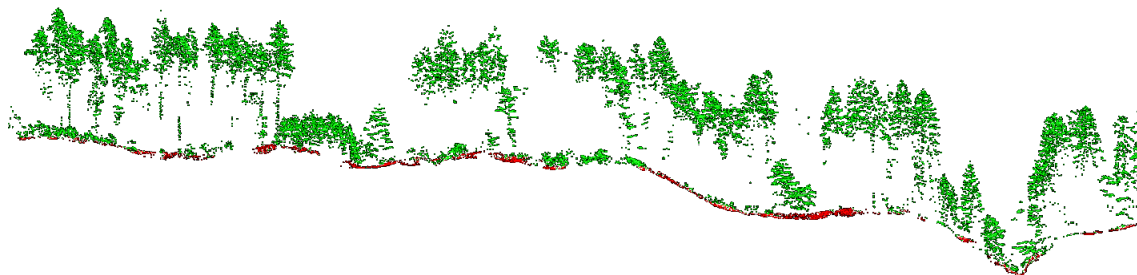
### 2.1 Metody přípravy dat

V této podkapitole popíšeme jednotlivé kroky na cestě od surových dat po data vstupující do procesu segmentace korun. Nelze ve všeobecnosti stavět přesnou hranici mezi předzpracováním a procesem segmentace, protože nutnost předzpracování pochopitelně vychází z použitých segmentačních metod. Nicméně v následujícím textu do předzpracování řadíme vytvoření mapy výšek ze surového bodového mračka a její následné úpravy.

#### 2.1.1 Od bodového mračka k mapě výšek

Surové bodové mračko nese s každým bodem informaci o jeho třech souřadnicích v prostoru. (Informace o intenzitě odraženého pulzu a případné další parametry full-waveform skenování pomíjíme). Pro určení výšky nadzemních objektů potřebujeme klasifikovat jednotlivé body na odrazy od holé země (roslého terénu) a odrazy od nadzemních objektů. Příklad je na obrázku 2.1. Detailní rozbor způsobů této klasifikace (často používaný anglický termín zní „ground filtering“) jde mimo záběr této práce. Laskavý čtenář jej může najít například v [2] či [29]. V principu se jedná o iterativní proces. Na jeho začátku jako body terénu stanovíme nejnížší body v jisté síti a další body přidáváme tak, aby plocha terénu zůstávala přiměřeně spojitá a hladká. Konkrétní nastavení závisí na prostředí, v němž se pohybujeme; jiné bude pro zemědělské plochy v nížině, jiné pro les v horách a jiné pro městskou zástavbu. Při přípravě dat pro praktickou část práce jsme využili skripty *lastools* vyvinuté v Německu (<http://rapidlasso.com/lastools/>), které umožňují klasifikovat terén, napočítat výšky nadzemních bodů a sestavit potřebné rastry, viz dále.





Obrázek 2.1: Výsledek klasifikace bodového mračka na body rostlého terénu (červená) a nadzemní objekty (zelená). Na obrázku lze vidět i další specifika horského lesa, členitost terénu a tvary jednotlivých korun v modelu povrchu. Dále vidíme, že prostupnost lesního porostu pro laserový paprsek je značně proměnná. Projevuje se různým počtem bodů odražených od rostlého terénu, i v rámci vertikálního členění korun. Liší se podle stáří porostu, jiná je u mladých a dospělých stromů, liší se podle míry zapojení porostu a extrémně se liší u listnatých stromů v obdobích s listy a bez listů.

Z bodů klasifikovaných jako terén sestavujeme tzv. digitální model terénu (DTM = digital terrain model). Jednou z možných metod je triangulace provedená nad body terénu. Náhodně rozložené body pak převádíme do pravidelného rastru, při jeho sestavení je klíčový parametr prostorového rozlišení, velikost pixelu. Z bodů klasifikovaných jako nadzemní objekty vybíráme ty nejvyšší a sestavujeme z nich tzv. digitální model povrchu (DSM = digital surface model). Bodů odražených od povrchu je v lesním ekosystému výrazně více než pulzů, které projdou až k terénu. Triangulace povrchu tak má menší prvky, my ji opět převádíme do pravidelného rastru a prostorové rozlišení volíme jemnější nebo stejné jako u modelu terénu.

Mapu výšek (CHM = canopy height model, nebo též nDSM = normalizovaný model povrchu) získáme odečtením  $CHM = DSM - DTM$ . Tento produkt je nezávislý na nadmořské výšce zkoumaného území, hodnoty jednotlivých pixelů mají význam výšky (nad terénem) v daném místě.

## 2.1.2 Úpravy mapy výšek

Laserové skenování může být v různých fázích zatíženo určitou chybou, stejně tak následná klasifikace bodového mračka a interpolace modelů terénu a povrchu. Ve výsledné mapě výšek může být přítomný multiplikativní šum, který odstraňujeme vhodným filtrováním.

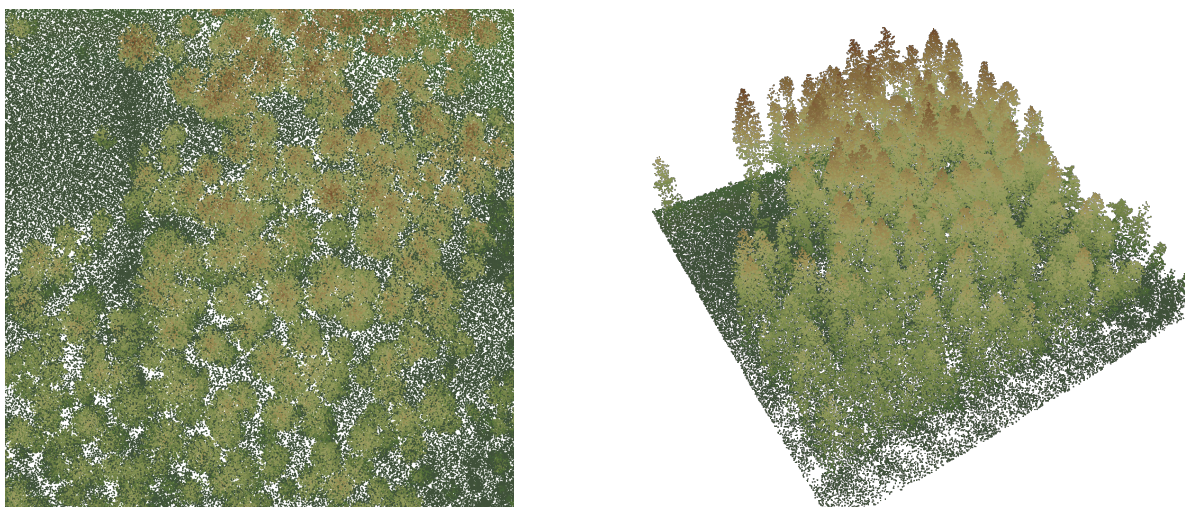
V datech laserového skenování s vysokým prostorovým rozlišením (vysokou primární bodovou hustotou) jsou zachyceny značné podrobnosti – v našem kontextu až jednotlivé větve stromů. Tyto podrobnosti mohou být na překážku při detekci a delineaci jednotlivých stromů, proto se je snažíme potlačit, opět vhodným filtrováním. Zvolené parametry filtrování mohou ovlivňovat výsledky segmentace, proto se jimi budeme v praktické části podrobněji zabývat.

Komplexní přístup k tvorbě mapy výšek je uveden v článku [16]. Jde o to, že při

rasterizaci modelu povrchu s vysokým prostorovým rozlišením dochází ke vzniku silně nespojité plochy. Je to dáno různou úrovní penetrace paprsku do korunového zápoje. Výše uvádíme, že tento problém lze řešit filtrováním. Místo dodatečného řešení lze též jinak přistoupit k procesu rasterizace. Postup popsany v [16] vychází ze dvou základních kroků.

1. Body bodového mračna nejsou při rasterizaci považovány za body, ale za malé disky vhodného poloměru tak, aby svrchní úroveň zakrývala průstřely dovnitř koruny stromu.
2. Mapa výšek je sestavována iterativně po jednotlivých výškových úrovních. Do výsledného rastru se tak dostane vždy maximální hodnota v každé buňce.

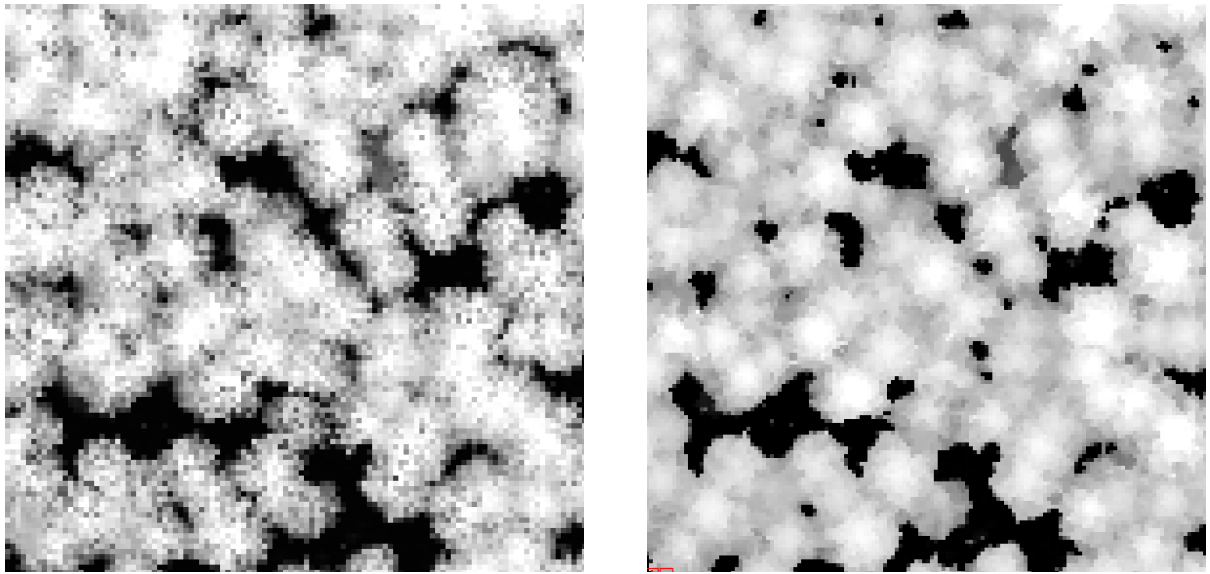
Problematiku dále ilustrujeme na obrázcích 2.2 a 2.3.



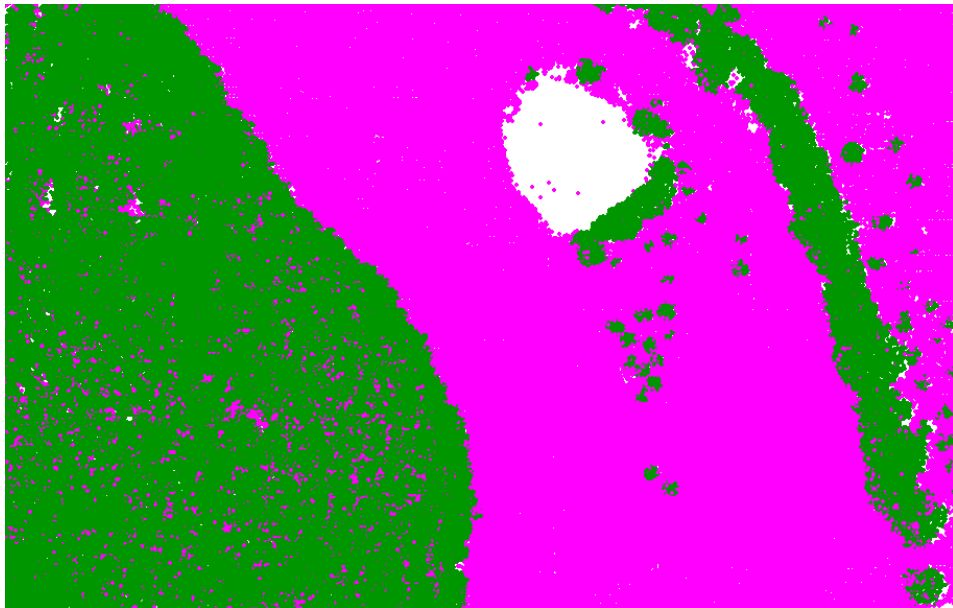
Obrázek 2.2: Ukázka bodového mračna s vysokou hustotou (až  $100 \text{ b/m}^2$ ). Vlevo pohled shora, vpravo v perspektivě. Za povšimnutí stojí, jaké podrobnosti uvnitř jednotlivých korun lze rozlišit.

### 2.1.3 Klasifikace typů pokryvu

U malého zájmového území je možné předpokládat, že všechny nadzemní objekty jsou stromy, ale v případě velkoplošného uvažování tomu tak určitě není. Dalším přípravným krokem proto bývá vymaskování území lesa od dalších povrchů (paseka, cesty, zástavba, ap.). Pro odstranění některých tříd pokryvu (paseka, cesta) může stačit prahování určitou minimální hodnotou výšky. Ke správnému klasifikování dalších tříd pokryvu se hodí fúze s obrazovými daty a klasifikace na základě spektrálních projevů. V případě, že máme k dispozici pouze data laserového skenování, můžeme využívat parametry textury a drsnosti (plocha střechy je rovina), případně intenzitu a další parametry z full-waveform záznamu (odraz od střechy má jiný tvar a amplitudu než odraz od listů či jehlic). Příklad klasifikace je na obrázku 2.4.



Obrázek 2.3: Rozdíly při běžné (vlevo) a speciální (vpravo) rasterizaci mapy výšek. Vidíme, že speciální model povrchu je kvalitnější, zásadně ubylo nespojitostí vlivem odrazů uvnitř koruny. A jedná se tak o model povrchu hodný svého jména.



Obrázek 2.4: Ukázka klasifikace bodového mračka. Zelenou barvou je označena vysoká vegetace (stromy), fialovou barvou holá půda, žluté body zůstaly neklasifikované. Velká prázdná oblast v horní části obrazu je vodní plocha – od té se laserový paprsek neodráží.



## 2.2 Metody detekce stromů

V této podkapitole popíšeme nejužívanější algoritmus používaný k detekci pozice jednotlivých stromů – hledání lokálního maxima. (Mezi další varianty patří prahování, korelační hledání vzoru a rekonstrukce od kmene.)

Přirozeným předpokladem této metody detekce stromů je očekávaná ekvivalence mezi pozicí vrcholku stromů a pozicí lokálních maxim v mapě výšek. Širší diskuze o tomto základním předpokladu bude následovat později, napřed probereme technické aspekty hledání lokálních maxim.

Při hledání lokálního maxima v mapě výšek procházíme okolí zkoumaného pixelu a za maximum jej označíme tehdy, je-li vyšší než všechny pixely z okolí. Pro výsledek je klíčový tvar a velikost okolí. V lese, který není zcela homogenní, je třeba velikost okolí nastavovat adaptivně – nižší/menší stromy hledáme s menším plovoucím oknem, vyšší/větší stromy pak s větším plovoucím oknem.

Optimální je taková velikost plovoucího okna, která přesně odpovídá velikosti koruny stromu v daném místě. Očekávanou velikost koruny můžeme odhadovat podle výšky stromu, tedy podle hodnoty výšky v posuzovaném pixelu. Pro přepočítání mezi výškou stromu a průměrem koruny existují tzv. alometrické rovnice – empiricky odvozené závislosti kalibrované na základě destruktivních měření. Tato závislost se pochopitelně liší podle druhu dřeviny, proto nejpřesnějších výsledků dosáhneme s apriori znalostí o druhovém složení ve zkoumané oblasti.

Když nemáme k dispozici výše zmíněné podpůrné informace o zpracovávaném porostu, stanovujeme velikost plovoucího okna přímou analýzou obrazu – v okolí posuzovaného pixelu. Předpokládáme, že se nacházíme v bodě vrcholku koruny a snažíme se odhadnout její velikost, tedy vzdálenost k okraji koruny. Používáme dvě různé metody, první z nich je spádová metoda. Výška bodů na povrchu stromu klesá od vrcholku směrem k okraji koruny. Konstruujeme transepty procházející posuzovaným pixelem a okraj koruny v daném směru detekujeme jako místo, kde poprvé přestane být derivace výšky záporná. Ve čtvercovém rastru mapy výšek se přirozeně nabízí osm základních směrů transektů. Za odhad velikosti koruny bereme průměrnou nebo maximální spádovou vzdálenost ze všech transektů.

Druhá metoda pro určení okrajů koruny využívá statistické veličiny soběpodobnosti (semivariance). Opět konstruujeme transepty vycházející z posuzovaného pixelu. Soběpodobnost vůči startovnímu pixelu narůstá až do určitého bodu, kdy dochází k nasycení. Právě jeho vzdálenost bereme jako odhad velikosti koruny a pro stanovení velikosti plovoucího okna volíme průměrnou nebo maximální hodnotu pro všechny transepty. Logickou variantou je kombinace obou přístupů, kdy odhadneme velikost koruny oběma metodami a velikost plovoucího okna zvolíme podle získaných hodnot.

Máme-li k dispozici výsledky klasifikace, můžeme na nalezená lokální maxima aplikovat masku a odstranit ta, která například leží na umělých objektech (domy, stožáry a podobně). Další typický krok čištění je odstranění nalezených maxim, která leží příliš blízko sebe – blíže, než by odpovídalo očekávané velikosti korun pro danou výšku – zachováme vyšší z maxim. Pokud jsou hledaná maxima pouze vstupem do kroku delineace

plochy korun, stačí mít uložené jejich obrazové souřadnice; v případě, že se jedná o finální (mezi)produkt, exportujeme nalezené body včetně jejich reálných souřadnic ve stejném geografickém souřadném systému jako měl původní obraz.

## 2.3 Metody delineaace korun

V této podkapitole popíšeme algoritmy používané k delineaci plochy korun. Delineací zde i v dalším máme na mysli určení hranice jednotlivých korun. Ne tak ve smyslu nějaké spojité funkce, spíše v kontextu diskrétních obrazových dat. O každém pixelu tedy rozhodujeme, zda patří do té či jiné koruny, případně do plochy pozadí.

Rozebereme tři používané postupy. Nejsnáze implementovatelná je metoda zaplavování. Analogií k hledání lokálních maxim při detekci je metoda minimové sítě. Největší prostor bude věnován růstovému algoritmu v kombinaci s využitím aktivní kontury pro modelování hranice koruny. Jedná se o klíčový algoritmus, vyvinutý v rámci této dizertační práce.

### 2.3.1 Zaplavování

Postup nazývaný zaplavování (anglicky „watershed“) je převzatý z hydrologických aplikací. Základní myšlenka spočívá v tom, že mapu výšek vynásobíme mínus jedničkou. Původní lokální maxima (vrcholky korun) se tím změň na lokální minima. Vzniklou 3D strukturu následně virtuálně zaplavujeme. Zdroje vody umísťujeme do detekovaných vrcholků (nyní lokálních minim). Hranice korun pak vznikají na hranicích jednotlivých subpovodí odpovídajících jednotlivým zdrojům.

Technicky se využívá tzv. značkovací algoritmus. V prvním kroku označíme každý startovní pixel (vrcholek stromu) unikátním číslem a zařadíme jej do seznamu. Následuje iterační krok. Ze seznamu vybereme pixel s nejvyšší hodnotou výšky. Projdeme jeho sousední pixely. Pokud dosud nebyly označovány, a přitom mají nižší výšku, přiřadíme jim jeho číslo a zařadíme je do seznamu. Pak aktuální pixel vyřadíme ze seznamu. Iterativní proces končí po vyprázdnění seznamu. Oblasti obrazu označené shodným číslem tvoří jednotlivé koruny.

### 2.3.2 Metoda minimové sítě

Metodu minimové sítě (anglický termín „valley following“) navrhl v devadesátých letech minulého století kanadský expert na dálkový průzkum a lesnictví F. Gougeon (viz [10]). Základní myšlenkou je sestavení hranice koruny propojením sítě lokálních minim. Pro praktickou část dizertační práce jsme použili níže popsany algoritmus, který vychází z práce Gougeona, a modifikovali jej pro aplikaci na data laserového skenování. (Primárním obrazem Gougeona byl družicový multispektrální snímek.)

První část algoritmu se zaměřuje na odlišení plochy stromů od pozadí, druhá pak dolaďuje hranice jednotlivých korun.

1. (Inicializace) Vstupem je mapa výšek. Výstupní obraz stejného rozměru má binární charakter, ve výsledku rozlišuje plochu lesa a zbývající plochu – v analýze obrazu se používá termín pozadí.
2. (Pozadí) Do plochy pozadí zařazujeme pixely podle určitého výškového prahu, například  $h < 1$  m. Další možností je využití klasifikace pokryvu na základě hyperspektrálních dat, viz kapitola 2.1.3.
3. (Lokální minima) V ploše lesa detekujeme lokální minima. S plovoucím oknem velikosti 3 krát 3 označíme středový pixel jako minimum, pokud je jeho výška nižší než u všech osmi sousedů.
4. (Údolí) Následně v mnoha iteracích procházíme body pozadí a minimové sítě. Body, které jsou prvkem údolí, tj. mají z obou stran vyššího souseda, přidáváme do minimové sítě.
5. (Dokončení) Podle sady pravidel je sledována hranice každé potenciální koruny. Preferovaný pohyb je po směru hodinových ručiček. Smyslem je doplnit místa, kde je minimová síť z nějakého důvodu přerušena (např. dvě blízko sousedící koruny); a naopak odstranit ze sítě slepé konce.
6. (Koruny) Dosavadní postup měl za výsledek binární informaci o tom, kde jsou koruny (1) a kde je pozadí (0). Jednotlivé koruny pak extrahujeme jako souvislé podoblasti plochy korun (1).

### 2.3.3 Růstový algoritmus

Základní princip této metody je trefně vystižen v používaném anglickém termínu – „seeded region growing“, který můžeme přeložit jako rozrůstání oblasti ze semínka. Vycházíme z lokálních maxim – detekovaných vrcholků korun – a plochu koruny rozrůstáme postupným připojováním sousedních pixelů.

Pro každý potenciálně připojovaný pixel, který je 4-sousedem dosavadní plochy, posuzujeme sadu tzv. stopovacích podmínek. V případě kladného výsledku posuzovaný pixel připojíme k dané koruně. Mezi typické podmínky v kontextu dat laserového skenování patří minimální výškový limit, vzdálenost od vrcholku a vzdálenost od sousedních korun. Právě třetí podmínka je charakteristickým rysem růstového algoritmu – při budování plochy jedné koruny bereme ohled i na koruny sousední. Z toho plyne další prvek technického řešení – je nutné všechny koruny narůstat současně – jen tak zajistíme korektní vztah dvou blízko stojících korun.

Konkrétní podoba stopovacích podmínek může být různá, příklady nalezneme ve studiích různých světových autorů. Podmínky musí být přizpůsobeny také charakteru vstupních DPZ dat. Příklad aplikace této segmentační metody pro hyperspektrální snímky lze nalézt v článku [23], starší práci autora tohoto textu.

V dalším popíšeme komplexní růstový algoritmus, který jsme vyvinuli v rámci této dizertační práce a poprvé publikovali v [25]. Inovativní postup přebírá také prvky aktivní kontury.

Pro řízení procesu narůstání pro každou korunu v každém čase definujeme umělou hodnotu energie následujícím vztahem:

$$E = A_H E_H + A_B E_B + A_S E_S + A_N E_N.$$

Jednotlivé komponenty odrážejí různé podstatné parametry koruny a jednotlivé koeficienty  $A$  určují jejich váhu. Komponenty  $E_B$  a  $E_S$  představují ve fyzikální analogii vnitřní energii odvozenou od tvaru koruny, respektive její hranice. Komponenty  $E_H$  a  $E_N$  představují vnější energii, tíhu působící na okraj koruny a tlak sousedících korun. Komponenta  $E_H$  je definována jako průměrná výška hraničních pixelů, komponenta  $E_B$  je definována jako délka hranice koruny, komponenta  $E_S$  je odvozena z tvaru koruny (kruhovitost, excentricita), komponenta  $E_N$  je odvozena z tlaku (vzdálenosti) sousedících korun.

Smysl jednotlivých komponent je následující:  $E_H$  táhne hranici koruny dolů (gravitační analogie),  $E_B$  a  $E_S$  udržují přirozený tvar koruny,  $E_N$  řídí vzájemnou polohu sousedících korun, brání jejich překrývání. Jak plocha koruny postupně narůstá, hodnota  $E_H$  klesá se snižující se průměrnou výškou na hranici, hodnota  $E_B$  mírně roste v souvislosti s prodlužováním hranice, hodnota  $E_S$  se mění různě podle změn tvaru koruny a konečně hodnota  $E_N$  vzrůstá, když se k sobě přibližují koruny dvou sousedících stromů.

### Postup segmentace:

- (Inicializace) Každou korunu zakládáme jako kříž 4-sousedů lokálního maxima. Vypočítáme pro každou korunu základní hodnotu energie. Podle konkrétní zpracovávané oblasti nastavujeme koeficienty energetické bilance a stopovací prahy. Následující čtyři kroky jsou iterační, opakují se tak dlouho, dokud existují neuzavřené koruny.
- (Výběr koruny) Ze seznamu neuzavřených korun vybíráme strom pro růstový krok. Řídíme se podle poměru výška vrcholku ku ploše koruny. To znamená, že nejvyšší a nebo nejméně rozvinuté koruny jsou narůstány dříve. Což odpovídá přirozené kompetici v přírodě.
- (Kandidáti) Pro vybranou korunu sestavujeme množinu kandidátů, která zahrnuje všechny možnosti připojení jednoho pixelu k dosavadní ploše koruny. Pro každého kandidáta vypočítáme novou hodnotu energie.
- (Ukončovací podmínky) Korunu označíme jako uzavřenou v okamžiku, kdy energie všech kandidátů přesahuje dopředu stanovený ukončovací práh. Nebo v okamžiku, kdy u všech kandidátů vzniká nárůst energie oproti původní hodnotě o více než je předem stanoveno.
- (Růstový krok) Podle principu minimalizace energie vybíráme z množiny kandidátů korunu s nejnižší energií a prohlašujeme ji za další iteraci.

# Kapitola 3

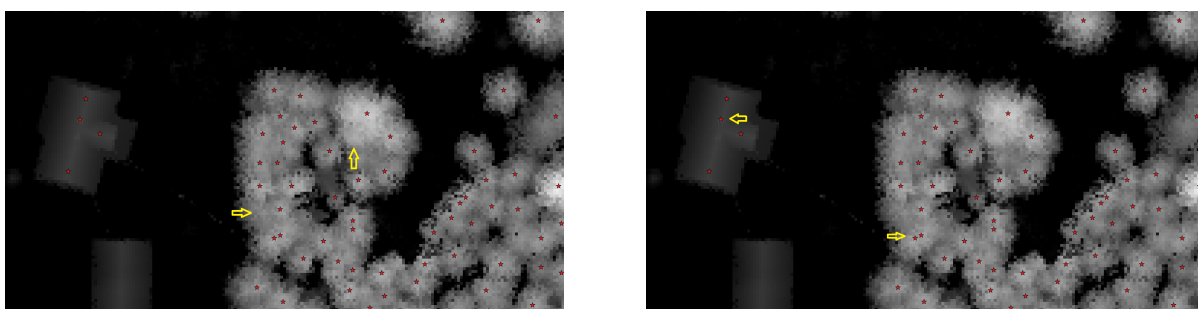
## Z praktické části práce

Z praktické části práce vybíráme téma hodnocení výsledků segmentace. Výsledky segmentace obvykle posuzujeme vůči vizuální interpretaci snímků, případně vůči lesnickému terénnímu šetření. K prvnímu přístupu uvádíme konkrétní čísla dle článku [25].

### 3.1 Hodnocení kvality detekce

Detekované pozice stromů třídíme do tří kategorií.

1. Korektní. Detekovaná pozice stromu odpovídá pozici stromu ve skutečnosti.
2. Opomenutá. Chyba 1. druhu. Strom zde ve skutečnosti je, algoritmus ale dané místo neoznačil.
3. Nadbytečná. Chyba 2. druhu. Algoritmem označený strom ve skutečnosti neexistuje.



Obrázek 3.1: Hodnocení kvality detekce. Vlevo příklady chyby 1. druhu, vpravo příklady chyby 2. druhu.

Na obrázku 3.1 vlevo jsou označena 2 místa, kde se v realitě strom vyskytuje, ale dané místo nebylo algoritmem detekce označeno. K dané chybě může dojít při nesprávně nastaveném výškovém limitu (opomenutí nižších stromů), s příliš velkým plovoucím oknem při

detekci (opomenutí jednoho z více blízko sebe stojících stromů), nebo v situaci, kdy hodnoty v normalizovaném modelu povrchu vykazují nějaké singulární chování a algoritmus tak ani nemůže situaci vyhodnotit správně.

Na obrázku 3.1 vpravo jsou označena 2 místa, kde algoritmem detekovaný bod ve skutečnosti nepředstavuje strom. Může se zdát až nespravedlivé označovat za chybu detekovaný komín (na domě vlevo). Nutno říci, že to je opravdu nejčastější příklad chyby nadbytečnosti. Pokud není před samotnou detekcí provedena klasifikace povrchů, pak nejčastější automaticky detekované nadbytečné stromy jsou jiné objekty, které skutečně představují lokální maxima výšky a samotný detekční algoritmus tak na vině není. Pokud jsou označeny dva vrcholky u jediného reálného stromu, můžete to především značit, že plovoucí okno při detekci nebylo dostatečně velké, jak by odpovídalo výšce stromu daného druhu.

Ve studii [25] bylo zpracováno území tří lokalit, jejich charakteristiky uvádí tabulka 3.1. Ve všech třech případech bylo zpracováno území 500 krát 500 metrů, v tabulce uvádíme počet detekovaných stromů a průměrnou výšku včetně směrodatné odchylky. Vidíme, že na Bílém Kříži se jednalo o mladý porost, v Rájci a ve Štítné o dospělé stromy.

Tabulka 3.1: Tři testovací lokality

Lokalita	druh porostu	počet stromů	statistiky výšky
Bílý Kříž	smrkový les	5305	$11,9 \pm 3,8$ m
Rájec	smrkový les	4538	$27,6 \pm 4,1$ m
Štítná	bukový les	6204	$26,9 \pm 2,6$ m

Účinnost detekce byla posouzena na několika náhodně vybraných podoblastech dané lokality. Vizualní interpretací byly rozlišeny stromy korektně detekované a opomenuté. Výsledky této inspekce shrnuje tabulka 3.2. Dosažená účinnost okolo 85 % je mírně podprůměrná v porovnání s obvyklými čísly ze srovnatelných studií. Důvodem může být, že z adaptivních technik popsanych v kapitole 2.2 byla využita pouze alometrická rovnice mezi výškou stromu a očekávaným průměrem koruny.

Tabulka 3.2: Posouzení účinnosti detekce stromů

Lokalita	korektní	opomenuté	účinnost
Bílý Kříž	315	59	85,1 %
Rájec	372	53	87,5 %
Štítná	405	80	83,5 %

## 3.2 Hodnocení kvality delineace

Vizuální interpretace tvaru koruny je náročnější než posouzení pozice stromu. Kromě sledování přesného průběhu hranice koruny je vhodné mít na paměti další účel zpracování. Můžeme se tak například zaměřit na množství biomasy, které by odpovídalo delineované ploše ve srovnání s biomasou odpovídajícího stromu. Ve studii [25] byly při manuálním hodnocení kvality delineace polygony korun tříděny do čtyř kategorií, kde hodnocení 1 znamenalo 95% shody s reálným tvarem koruny, 2  $\approx$  75%, 3  $\approx$  50% a 4  $\approx$  25%. Dosažené výsledky shrnuje tabulka 3.3. Účinnost okolo 80 % je mírně nadprůměrná v porovnání s obvyklými čísly ze srovnatelných studií. Především pro dospělé stromy se podařilo nastavit dobré parametry řízeného růstového algoritmu.

Tabulka 3.3: Posouzení účinnosti delineace stromů

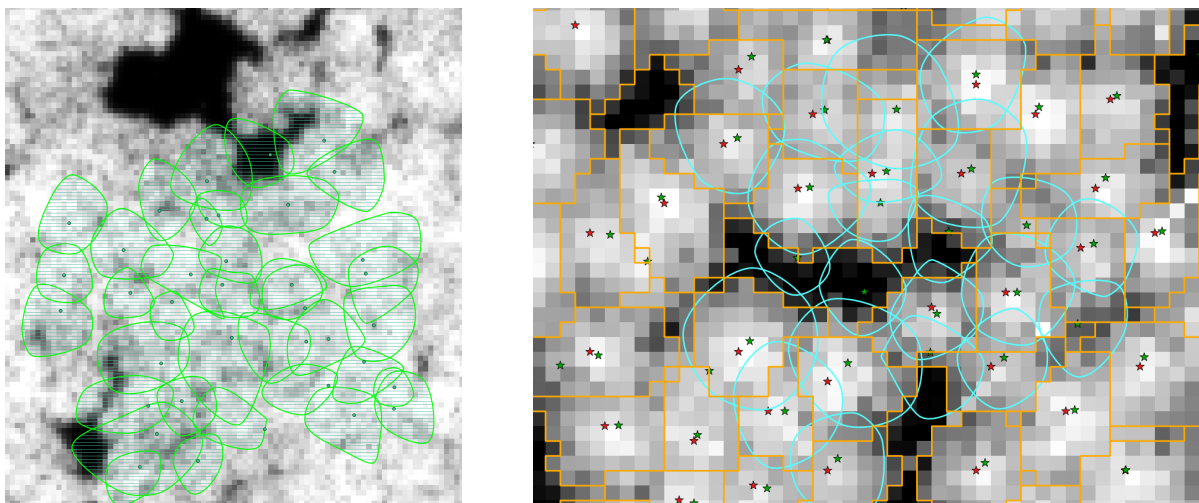
Lokalita	95 %	75 %	50 %	25 %	účinnost
Bílý Kříž	122	176	54	4	76,8 %
Rájec	177	188	53	10	79,0 %
Štítná	169	294	21	1	80,8 %

## 3.3 Terénní šetření

Při srovnávání výsledků segmentace korun v datech DPZ s lesnickým terénním šetřením je třeba dbát na použití stejného souřadného systému. Obecně může být problém s přesností GPS souřadnic při zaměřování v terénu. Z principu používání laserového dálkoměru plyne spolehlivé zaměření vzájemné pozice stromů v dané lokalitě, ale problematické bývá zaměření pozice této lokality v globálním souřadném systému. Výsledky terénního šetření a letecká DPZ data pak na sebe jednoduše nenesí. Tuto neblahou situaci vidíme na obrázku 3.2 – zaměřené pozice stromů a hranice korun kvůli velké chybě GPS polohy prakticky nelze použít k posouzení kvality automatického zpracování.

Nadějnější situaci vidíme na obrázku 3.2 vpravo. Zelené hvězdy představují pozice kmenů zaměřené v terénu pomocí GPS. Červené hvězdy představují vrcholky stromů detekované automaticky. Modré linie představují hranice korun vytyčené laserovým dálkoměrem v terénu. Oranžové linie představují automatickou segmentaci pomocí zaplavovacího algoritmu.

Červené a zelené hvězdy se s výjimkou jediného místa (nahore uprostřed) přesně nepřekrývají, nicméně vidíme několik odpovídajících si dvojic. Zbytková chyba může být stále přičtena nepřesnosti GPS polohy, případně faktu, že zaměřená pozice kmene nemusí horizontálně odpovídat pozici vrcholku, který „vidíme“ shora v modelu povrchu. (Odklon kmene může činit až několik metrů.) Několik stromů z terénního šetření nebylo automaticky detekováno a jedná se o chybu detekce prvního druhu. Pozornému čtenáři ale jistě neunikly zelené hvězdy v místech, kde podle mapy výšek strom není (tmavá místa



Obrázek 3.2: Záznam měření stromů přímo v terénu. Vlevo doklad nesouladu v geometrii způsobeného nepřesností GPS polohy. Vpravo srovnání automatické detekce (červené hvězdy), pozic stromů zaměřených v terénu (zelené hvězdy), automatické delineaace (oranžové linie) a hranic korun zaměřených v terénu (modré linie).

uprostřed zobrazené plochy). Tato nedokonalost ilustrativního příkladu souvisí s tím, že terénní šetření a letecké laserové skenování neproběhlo současně. Bohužel. Terénní kampaň se datuje před a letecká kampaň po polomu větrem, takže na zmíněných místech už v současnosti opravdu stromy nejsou.

Při srovnávání delineaace korun je třeba mít na paměti technické parametry obou přístupů. V terénu se vymezení korun provádí pomocí výtyčky a laserového dálkoměru. Hranice koruny je prokládána několika body zaměřenými na spodním okraji nejdelších větví. Automatická delineaace probíhá pohledem shora na model povrchu lesa a jedním ze základních předpokladů je vzájemné neprostupování jednotlivých korun. Proto modré a oranžové polygony nepředstavují úplně srovnatelné veličiny. V praktické aplikaci je pak třeba mít na paměti, co lze a co nelze danou technikou „změřit“.



# Shrnutí

Tato dizertační práce poskytuje ucelený přehled problematiky segmentace jednotlivých stromů v datech dálkového průzkumu.

Vycházíme z cca 20 let celosvětového výzkumu v této oblasti, přičemž sledujeme především moderní trendy, mezi něž patří přechod od obrazových dat k laserovému skenování a stále hardwarové pokroky směřující k vyššímu prostorovému rozlišení. V souladu s ostatními autory rozdělujeme proces segmentace na 1) přípravu dat, 2) detekci pozice stromů a 3) delineační plochy korun.

## Příprava dat

V bodě přípravy dat (kapitola 2.1) se zaměřujeme na data laserového skenování. Bodové mračno je třeba klasifikovat na body terénu a povrchu, algoritmy se liší podle charakteru porostu (především jeho zapojení), členitosti terénu a přítomnosti umělých struktur (jako jsou budovy). Následně sestavujeme rastrový model povrchu a terénu, jejich odečtením vzniká mapa výšek. Důvodem je mimo jiné úspora datových a výpočetních nároků, proto zatím nebyly algoritmy zpracovány rovnou ve 3D. Klíčovým parametrem rastrových modelů je prostorové rozlišení, jako osvědčené pravidlo doporučujeme alespoň 4 body původního mračna na jeden pixel mapy výšek. Dále doporučujeme speciální rasterizační techniku zmíněnou v odstavci 2.1.2, kdy cíleně omezujeme nespojitosti v modelu povrchu. Dalším poselství nesoucím se celou prací je kombinace datových zdrojů, zde například využití obrazových dat pro klasifikaci typů pokryvu a nahlédnutí do porostních map k zjištění druhového složení a základních charakteristik stromů ve zpracovávaném území.

Případně zájemce o problematiku hyperspektrálních obrazových dat odkazujeme na diplomovou práci [22] a článek [23].

## Detekce pozice stromů

V bodě detekce pozice stromů (kapitola 2.2) se zaměřujeme na metodu lokálního maxima, přičemž okrajově zmiňujeme také možnost prahování podle výšky, korelační analýzu a 3D segmentaci od kmene vzhůru. Při hledání pozice stromu jako lokálního maxima výšky je možné využít široké spektrum adaptivních technik obrazové analýzy, které zvyšují robustnost v datech s vysokou variabilitou (například ve věkovém či druhovém složení). Při pečlivé parametrizaci lze v konkrétním území dosáhnout kvality detekce přes 95 procent, při plošnějším použití okolo 90 procent. Výsledek detekce pozice stromů je klíčový sám o sobě, i pro pokračování segmentace. Delineační postupy z pozice stromů vycházejí

a jejich chybovost tak není poplatná kvalitě algoritmu jako takového, ale též navazuje na úspěšnost předcházející detekce.

Už výsledek samotné detekce může sloužit jako podklad ke kvantitativní analýze lesních porostů, odkazujeme na studii [5].

### **Delineace plochy korun**

V bodě delineace plochy korun představujeme a rozebíráme tři různé algoritmy. Metoda kombinující růstový algoritmus s aktivní konturou na hranici koruny byla vyvinuta v rámci této práce a poprvé představena v článku [25]. Mezi její přednosti patří důraz na přirozený tvar korunových segmentů a korektní zpracování vzájemné hranice sousedících stromů. Široká parametrizace umožňuje adaptivní přizpůsobení různým typům porostu včetně smíšených. Během testování bylo dosaženo přesnosti delineace okolo 80 procent.

Také u zbývajících dvou metod – zaplavování a minimové sítě – je v kapitole 2.3 vložena jejich modifikace pro data laserového skenování s vysokým prostorovým rozlišením a v praktické části rozebrána konkrétní parametrizace.

### **Přínos a budoucí rozvoj**

Obecný přínos práce souvisí s tím, že dané téma je komplexně rozebráno z pohledu současných datových zdrojů a v kontextu typických lesů České republiky, což vhodně shrnuje a rozšiřuje dostupnou zahraniční literaturu. Ambici na širší teoretický přínos své oblasti mají především detekce lokálních maxim adaptivně parametrizovaná podle lokálních vlastností obrazu a druhu dřevin a růstový algoritmus využívající aktivní konturu k aproximaci hranic korun.

Budoucí využití zde představených metod a jejich další rozvoj je zaručen vzhledem k zaměstnání autora v pracovní skupině Dálkového průzkumu Země v Centru výzkumu globální změny AV ČR, kde lesní ekosystém patří mezi klíčová území zájmu a stálý rozvoj techniky dálkového průzkumu směřuje právě od úrovně porostů k jednotlivým stromům.

Jeden z možných směrů dalšího zkoumání vidíme v již zmíněném důsledném převodu algoritmů do trojrozměrné reality bodového mračka, kdy by segmentace na jednotlivé stromy ve výsledku vedla ke klasifikaci bodů mračka podle jejich příslušnosti k jednotlivým stromům a pozadí. Vývoj algoritmů v této oblasti představuje výzvu z hlediska práce s velkými daty a výpočetní efektivity.

# Literatura

- [1] Anděl, J.: *Matematická statistika*. Praha: SNTL, 1985.
- [2] Axelsson, P. 2000. *DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33: 110–117.
- [3] Brandtberg, T., Warner, T.A., Landenberg, R.E. and 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 85: 290–303.
- [4] Breidenbach, J., Naesset, E., Lien, V., Gobakken, T. a Solberg, S. 2010. *Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data*. Remote Sensing of Environment 114: 911–924.
- [5] Brovkina, O., Novotny, J., Zemek, F., Russ, R. a Cienciala, E. 2014. *Mapping above-ground biomass using airborne data: a case study in the Beskydy Mountains temperate forest*. Manuskript, submitted in International Journal of Remote Sensing.
- [6] Bunting, P. and Lucas, R. 2006. *The delineation of tree crowns in australian mixed species forests using hyperspectral compact airborne spectrographic imager (CASI) data*. Remote Sensing of Environment 101: 230–248.
- [7] Čížek, V.: *Diskretní Fourierova transformace a její použití*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [8] Culvenor, D.S. 2002. *TIDA: an algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery*. Computers and Geosciences 28: 33–44.
- [9] Erikson, M. 2003. *Segmentation of individual tree crowns in colour aerial photographs using region growing supported by fuzzy rules*. Canadian Journal of Forest Research 33: 1557–1563.
- [10] Gougeon, F.A. 1995. *A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution digital images*. Canadian Journal of Remote Sensing 21: 274–284.

- [11] Gupta, S., Weinacker, H., Koch, B. 2010. *Comparative analysis of clustering-based approaches for 3-d single tree detection using airborne fullwave lidar data*. Remote Sensing 2: 968–989.
- [12] Hirschmugl, M., Ofner, M., Raggam, J., Schardt, M. 2007. *Single tree detection in very high resolution remote sensing data*. Remote Sensing of Environment 110: 533–544.
- [13] Chen, Q., Baldocchi, D., Gong, P., Kelly, M. 2006. *Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 72: 923–932.
- [14] Chilés, J.-P. a Delfiner, P.: *Geostatistics – Modeling Spatial Uncertainty*. New York: John Wiley and sons, 1999.
- [15] Jarník, V.: *Diferenciální počet*. Praha: Nakladatelství ČSAV, 1953.
- [16] Khosravipour, A., Skidmore, A.K., Isenburg, M., Wang, T.J., Hussin, Y.A. 2014. *Generating pit-free Canopy Height Models from Airborne LiDAR*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 80, 863-872.
- [17] Koch, B., Heyder, U., Weinacker, H. 2006. *Detection of individual tree crowns in airborne lidar data*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 72: 357–363.
- [18] Korpela, I., Orka, H.O., Maltamo, M., Tokola, T., Hyypä, J. 2010. *Tree species classification using airborne LiDAR—effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization, and sensor type*. Silva Fennica 44: 319–339.
- [19] Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., Quinn, R., Armstrong, L., Shreenan, R. 2003. *Combined highdensity lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis*. Canadian Journal of Remote Sensing 29: 633–649.
- [20] Likeš, J. a Machek, J.: *Matematická statistika*. Praha: SNTL, 1983.
- [21] Martišek, D.: *Matematické principy grafických systémů*. Brno: Litera, 2002.
- [22] Novotný, J. 2009. *Multispektrální analýza obrazových dat*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Diplomová práce, 49 s. Vedoucí doc. PaedDr. Dalibor Martišek, Ph.D.
- [23] Novotný, J., Hanuš, J., Lukeš, P., Kaplan, V. 2011. *Individual tree crowns delineation using local maxima approach and seeded region growing technique*. Proceedings of Symposium GIS Ostrava 2011, 27–39.
- [24] Novotný, J. a Zemek, F. 2013. *Segmentation of tree crowns from airborne hyperspectral and lidar data: method comparison*. Global Change and Resilience: From Impacts To Responses (Proceedings of the 3rd annual Global Change and Resilience Conference), Brno 2013, ISBN 978-80-904351-8-6, 188–191.

- [25] Novotný, J. 2014. *Tree crown delineation using region growing and active contour: approach introduction*. Proceedings of 20th International Conference on Soft Computing MENDEL 2014: 213-216.
- [26] Pitkänen, J. 2001. *Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maxima methods*. Canadian Journal of forest research 31: 832-844.
- [27] Pokorný, R., Tomasková, I. 2007 *Allometric relationships for surface area and dry mass of young Norway spruce aboveground organs*. Journal of Forest Science. 12: 548-554.
- [28] Pouliot, D.A., King, D.J. and Pitt, D.G. 2005. *Development and evaluation of an automated tree detection delineation algorithm for monitoring regenerating coniferous forests*. Canadian Journal of Forest Research 35: 2332-2345.
- [29] Vosselman, G. 2000. *Slope based filtering of laser altimetry data*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33: 935-942.
- [30] Wirth, C., Schumacher, J., Schulze, E.-D. 2004. *Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation*. Tree Physiology 24: 121-139.
- [31] Zemek F. a kol.: *Letecký dálkový průzkum Země*. Brno: Centrum výzkumu globální změny AV ČR, 2014.
- [32] Zianis, D., Muukkonen, P., Makipaa, R., Mencuccini M. 2005. *Biomass and stem volume equations for tree species in Europe*. Silva Fennica. Monographs 4. The Finnish Society of Forest Science and The Finnish Forest Research Institute.
- [33] Žára, J. a kol.: *Počítačová grafika – principy a algoritmy*. Praha: Computer Press, 2004.

# Autorův životopis

## Osobní informace

Jméno: Jan Novotný  
Datum narození: 25. 10. 1984  
Bydliště: Vedlejší 2, 625 00 Brno, Česká republika  
E-mail: novotny.j@czechglobe.cz

## Dosažené vzdělání

2009 – dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, doktorské studium, program Aplikace přírodních věd, obor Aplikovaná matematika. Téma dizertační práce: Matematické metody segmentace obrazu pro dálkový průzkum Země.

2007 – 2009 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, navazující magisterské studium, program Aplikované vědy v inženýrství, obor Matematické inženýrství, titul Ing. Diplomová práce: Multispektrální analýza obrazových dat.

2004 – 2007 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, bakalářské studium, program Aplikované vědy v inženýrství, obor Matematické inženýrství, titul Bc. Bakalářská práce: Interpolace kubickým splinem.

1996 – 2004 Gymnázium Brno, tř. Kpt. Jaroše 14, třída se zaměřením na matematiku.

## Pedagogická praxe

2009 – 2011 Vedení cvičení z předmětů Matematika I a Matematika II-B na FSI VUT v Brně

## Zaměstnání

2009 – dosud Centrum výzkumu globální změny, Akademie věd ČR, v.v.i., Oddělení dálkového průzkumu Země, Brno.

## **Abstrakt**

Segmentace obrazu na jednotlivé stromy je důležitý krok při zpracování dat dálkového průzkumu pro lesnickou praxi. Tato dizertační práce podává široký přehled dané problematiky. Shrnuje teoretický kontext z pohledu aplikované matematiky a základní pojmy leteckého snímkování a laserového skenování. Matematické metody detekce pozice stromů jsou zaměřeny na adaptivní techniky umožňující přizpůsobení se charakteru zpracovávaného území. Pro fázi delineaace je představen nový přístup kombinující růstový algoritmus s aktivní konturou na okrajích koruny. Praktická část analyzuje parametrizaci všech algoritmů a rozebírá další praktické aspekty celé úlohy. Přílohou práce jsou spustitelné aplikace, které segmentaci realizují.

## **Summary**

Segmentation of an image into individual tree crowns is a key step in the processing of remotely sensed data for forestry practice. The doctoral thesis gives a broad overview of this topic. It comprehends theoretical context from mathematical point of view and defines basic terms from airborne imaging and laser scanning. Mathematical methods of tree detection are focused on a robust adaptation to the actual conditions in a region of interest. A novel approach of crown area delineation is introduced, it combines a seeded region growing technique with an active contour as a crown boundary representation. The parametrisation of all algorithms is analysed in a practical half of the thesis and more application-oriented issues are mentioned. Executable computer programs are attached.