

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**

**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**

**KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A KARTOGRAFIE**



**ZJIŠŤOVÁNÍ RELATIVNÍCH VÝŠEK BUDOV  
Z DAT DPZ**

*Diplomová práce*

**Milan Bartůšek**

duben 2008

Vedoucí diplomové práce: Ing. M. Potůčková, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citoval.

Jsem si vědom 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 28. dubna 2008:

.....

Milan Bartůšek

Děkuji své školitelce Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D. za trpělivé vedení a odborné připomínky v průběhu tvorby. Dále děkuji Ing. Miroslavu Čábelkovi za zapůjčení GPS stanice a pomoc při zpracování s ní naměřených dat, Mgr. Přemyslu Štychovi, Ph.D. za možnost nahlédnutí do dat z digitálního modelu Prahy.

# Zjišťování relativních výšek budov z dat DPZ

## Abstrakt

V řadě odvětvích dochází k nárůstu potřeby aktuálních prostorových dat a roste význam jejich dostupnosti a použití. Snaha o zpřesnění, zjednodušení a urychlení zpracování dat vede výrobce k vývoji stále lepších zobrazovacích zařízení a vědce k objevování nových postupů. Tato práce poskytuje souhrnnou studii racionálního funkčního modelu (RFM), který nahrazuje fyzický senzorový model při transformaci souřadnic mezi obrazovým a objektovým prostorem. Tento dokument popisuje blokové vyrovnání obrazu vysokého rozlišení vyjádřeného RFM a ukazuje metodu na příkladu snímku z družice QuickBird. Je představena a s využitím programu Silver Eye testována jednosnímková metoda zjišťování relativních výšek budov. S pomocí tohoto programu bylo vytvořeno několik vizualizací 3D modelů. Na konec jsou analyzovány nedostatky a vhodnost této metody ve srovnání s jinými zpracovatelskými postupy .

**Klíčová slova:** Vysoké rozlišení, Ikonos, QuickBird, jednosnímková metoda, 3D, budova, získávání výšek

## Determining relative heights of buildings from remote sensing data

### Abstract

The demand for up-to-date spatial information is increasing and its availability and utilization is becoming more important for variety of tasks. Desire for accuracy, simplicity and promptness of data processing leads the vendors to evolve superior imagery sensors, in conjunction with developing new working methods on the part of scientific brains. This thesis provides comprehensive study of the rational function model (RFM), which has been adopted to replace the physical sensor model to represent transformation between the image space and object space. This document describes how to block adjust high-resolution imagery described by RFM and illustrates the method with QuickBird example. Single image metrology as a method of determining relative heights of buildings is presented. The method was tested through the engagement of Silver Eye software. By using the same program several visualizations of 3D models were rendered. Finally, the suitability and issues of the method is analyzed and the comparison with other processing methods is discussed.

**Keywords:** High resolution, Ikonos, QuickBird, Metrology, Monoplotting, 3D, Building, Extraction

## OBSAH

<b>PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>10</b>
<b>2. SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU .....</b>	<b>11</b>
<b>3. REŠERŠE LITERATURY .....</b>	<b>15</b>
<b>4. METODIKA .....</b>	<b>20</b>
4.1. Fyzický sensorový model .....	20
4.2. Racionální funkční model - RFM .....	21
4.2.1. Na terénu závislý přístup .....	23
4.2.2. Na terénu nezávislý přístup .....	26
4.3. Vyrovnání RFM .....	28
4.4. Jednosnímková metoda určení výšky budov .....	38
<b>5. DATA A VÝSLEDKY JEJICH ZPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>42</b>
5.1. Zpracovávaný satelitní snímek .....	43
5.2. Digitální model terénu .....	43
5.3. Program Silver Eye .....	44
5.4. Sběr vlčovacíh bodů.....	45
5.5. Zpřesnění RFM .....	46
5.6. Modelování a vizualizace zástavby .....	48
<b>6. DISKUZE .....</b>	<b>60</b>
<b>7. ZÁVĚR .....</b>	<b>68</b>
<b>8. LITERATURA .....</b>	<b>70</b>
<b>PŘÍLOHA Č. 1: METADATA KE ZPRACOVANÉMU SNÍMKU .....</b>	<b>72</b>
<b>PŘÍLOHA Č. 2: ÚDAJE O GCPS .....</b>	<b>75</b>
<b>PŘÍLOHA Č. 3: SENZORY PRO JEDNOSNÍMKOVOU METODU .....</b>	<b>83</b>

## **PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK**

- \**dem*...datový formát pro uložení rastrových dat
- \**dgn*...datový formát pro uložení především vektorových dat („*Design*“)
- \**gcp*...soubor se strukturovanými daty o vložených vlíčovacích bodech
- \**rpb*...soubor s daty o racionálních polynomických koeficientech sondy Quickbird
- \**rpc*...soubor s daty o racionálních polynomických koeficientech sondy Ikonos
- \**rpj*...soubor projektu vytvořený v programu Silver Eye
- \**sev*...soubor pro 3D model, s kterým pracuje prohlížeč Silver Eye Viewer
- \**shp*...soubor pro ukládání vektorových vrstev firmy ESRI („*shapefile*“)
- \**tif*...soubor pro uložení rastrových dat
- \**txt*...datový formát pro uložení textu, alternativa pro uskladnění informací o DEM
- \**x*...soubor pro uložení 3D modelu
- 2D*...dvou rozměrný („*two dimensional*“)
- 3D*...tří rozměrný („*three dimensional*“)
- ASCII*...Americký standardní kód pro výměnu informací („*American Standard Code for Information Interchange*“)
- ASPRS*...Americká společnost pro fotogrammetrii a dálkový průzkum („*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*“)
- BMP*... formát obrazových dat („*BitMap*“)
- CCD*...zařízení s vázanými náboji; jednotka kupíci náboj („*Charge Coupled Device*“)
- CZEPOS*...Česká síť permanentních stanic pro určování polohy
- DEM*...digitální model terénu („*Digital Elevation Model*“)
- DLT*...přímá lineární transformace („*Direct Linear Transformation*“)
- DMZZ*...Digitální Model Zeleně a Zástavby
- EO*...prvky vnější orientace („*Exterior Orientation*“)
- GCPs*...vlíčovací body („*Ground Control Points*“)
- GeoTIFF*...formát obrazových dat („*Geo Tagged Image File Format*“)
- GIF*... formát obrazových dat („*Graphics Interchange Format*“)
- GIS*...geografický informační systém
- GPS*...světový polohový systém („*Global Positioning System*“)
- HRSI*...snímek velmi vysokého rozlišení („*High Resolution Satellite Imagery*“)
- IMG*... formát obrazových dat společnosti Erdas
- IMIP*...Institut Městské Informatiky Praha

*IO*...prvky vnitřní orientace („*Interior Orientation*“)

*ISPRS*...Mezinárodní společnost pro fotogrammetrii a dálkový průzkum („*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*“)

*JPG*... formát obrazových dat („*Joint Photographic Experts Group*“)

*MB*...jednotka informace udávající množství paměti či místa na disku počítače („*Mbit*“, 1 MB = 10<sup>6</sup> bitů)

*NIMA*...Americký národní snímkový a mapový úřad („*National Imagery and Mapping Agency*“)

*NITF*...formát obrazových dat („*National Imagery Transmission Format*“)

*OGC*...OpenGIS Konsorcium

*PAN*...panchromatický snímek

*RAM*...paměť s přímým výběrem; operační paměť („*Random Access Memory*“)

*RFM*...racionální funkční model („*Rational Functional Model*“)

*R.M.S.*...střední kvadratická odchylka („*Root Mean Square Error*“)

*RPCs*...racionální polynomičné koeficienty („*Rational Polynomial Coefficients*“)

*TIFF*...formát obrazových dat („*Tagged Image File Format*“)

*URM*...Útvar **R**ozvoje **M**ěsta

*USM*...univerzální senzorový model („*Universal Sensor Model*“)

*UTM*...příčné válčové Mercatorovo zobrazení („*Universal Transverse Mercator*“)

*VHR*...snímek velmi vysokého rozlišení („*Very High Resolution*“)

*VRML*...značkový jazyk pro virtuální realitu („*Virtual Reality Mark-up Language*“)

*WGS-84*...světový geodetický systém („*World Geodetic System*“)

*ZABAGED*...**Z**ákladní **B**áze **G**eografických **D**at

## **SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek č. 1: Postup použití RFM.....	22
Obrázek č. 2: Řešení RFM zapojením 3D sítě z DEM a 2D sítě na snímku.....	26
Obrázek č. 3: Interpolace souřadnice Z z DEM.....	27
Obrázek č. 4: Schéma výpočtu relativní výšky objektu.....	28
Obrázek č. 5: Efekt příčného posunutí a stočení kamery.....	31
Obrázek č. 6: Vliv změny sklonu kamery a její pozice ve směru letu nosiče.....	32
Obrázek č. 7: Iterace 3D informace bodu s pomocí jednoho snímku a DEM.....	39
Obrázek č. 8: Princip výpočtu rozdílu výšek ( $\Delta H$ ).....	40
Obrázek č. 9: Schématická mapa snímaného území, lokace zvolené oblasti a GCPs.....	42
Obrázek č. 10: Převod souřadnic v prostředí programu Matkart.....	46
Obrázek č. 11: Vlícovací bod Chýně.....	47
Obrázek č. 12: Vektory posunutí po zpřesnění RFM.....	48
Obrázek č. 13: Detail posunutí.....	48
Obrázek č. 14: Typické objekty v oblasti Velká Ohrada.....	50
Obrázek č. 15: 3D model Velké Ohrady s automaticky vytvořenými fasádami.....	51
Obrázek č. 16: Oblast Malá Ohrada s individuální výstavbou.....	52
Obrázek č. 17: Objekty se sedlovou střechou:.....	54
Obrázek č. 18: Dům s valbovou střechou:.....	54
Obrázek č. 19: Dům se stanovou střechou:.....	55
Obrázek č. 20: Dům se stupňovitou střechou:.....	55
Obrázek č. 21: Objekt s obloukovou střechou:.....	56
Obrázek č. 22: Objekt s kopulovitou střechou:.....	57
Obrázek č. 23: 3D model bloku lesa:.....	58
Obrázek č. 24: 3D model oblasti Malá Ohrada:.....	59
Obrázek č. 25: Srovnání polohy zpracovaných budov vůči DMZZ.....	63
Obrázek č. 26: GCP Vokovice.....	75
Obrázek č. 27: GCP Liboc.....	76
Obrázek č. 28: GCP Hostivice.....	77
Obrázek č. 29: GCP Řepy.....	78
Obrázek č. 30: GCP Chýně.....	79
Obrázek č. 31: GCP Ohrada.....	80
Obrázek č. 32: GCP Jinočany.....	81
Obrázek č. 33: GCP Rudná.....	82



## **1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE**

Získávání relativních výšek budov či dalších nadzemních objektů z dat pořízených dálkovým průzkumem Země (dále DPZ) představuje jedno z mnoha tvůrčích odvětví spjatých s geoinformatikou popřípadě také kartografií. Formou DPZ mohou být pořízena data řadou rozličných metod. V této práci se budu věnovat především datům získaným prostřednictvím satelitních, popř. i leteckých nosičů vybavených citlivou snímací aparaturou. Tou je myšlena digitální kamera, čili moderní optické zařízení ukotvené na satelitu, letadle či jiném nosiči pohybujícím se nad zemským povrchem a sbírajícím informace o zemském povrchu jeho snímáním z určité vzdálenosti.

Nejznámější a nejrozšířenější metodou získávání prostorové – tří dimenzionální (3D) - informace o zemském terénu a objektech na něm představuje metoda stereofotogrammetrie. Tou je nazýván proces zpracování dvojice leteckých měřičských snímků, v dálkovém průzkumu poměrně známá a zaběhnutá metoda.

V posledních letech se ovšem ve světě DPZ a 3D modelování začal používat odlišný a jak bude dále ukázáno, z jistých hledisek i výjimečný způsob, jak prostorové údaje o nadzemních objektech, převážně budovách, získat. Tento způsob zpracování dat se nazývá jednosnímková metoda; v zahraniční, resp. v anglické literatuře je označována slovy „*Single Image Metrology*“ či také „*Monoplotting*.“ Jsou-li k dispozici dostatečně kvalitní data, můžeme dosáhnout vůči klasické stereofotogrammetrii srovnatelných výsledků co do kvality, ovšem v kratším čase a v určitých případech i za nižší finanční náklady.

Cílem této magisterské práce je podrobně popsat a objasnit princip jednosnímkové metody a aplikovat ji při zpracování části satelitního snímku severozápadního okraje Prahy. Použitím této metody dojde ke zjištění relativních výšek vybraných budov a jejich digitalizaci, tj. vyjádření ve vektorové formě. Následně bude sestaven prostorový digitální model dotyčných osídlených ploch. Zpracování snímku bude provedeno v programu Silver Eye postaveném takřkajíc na klíč k účelům jednosnímkového zpracování obrazu. Pro objasnění této metody je zcela nezbytné také specifikovat nároky na vstupní data a jejich vlastnosti, čímž se zabývá následující kapitola.

Dosažené výsledky a náročnost zpracování budou konfrontovány s metodou stereofotogrammetrie v závěru práce, kde budou stejně tak uvedeny příklady praktického využití.

## 2. SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU

Jedním z dnes dominantních zdrojů dat pro poskytování prostorové informace pro početné GIS aplikace jsou tzv. snímky typu HRSI („*High Resolution Satellite Imagery*“). Jak z názvu vyplývá, jde o satelitní snímky velmi vysokého rozlišení (někdy také označovaných zkratkou VHR - „*Very High Resolution*“). Není to tak dávno, co takové snímky byly dostupné pouze ve vojenské sféře a zpracovatelné pouze za pomoci velmi sofistikovaných programů a hardwarového vybavení. S příchodem nového tisíciletí se na scéně ovšem objevili i komerční producenti HRSI snímků. První Ikonos (společnost *Space Imaging Inc.*) a za ním následoval QuickBird (společnost *DigitalGlobe*), kteří nabízejí za dostupnou cenu velmi kvalitní produkt DPZ v různých formátech a úrovni zpracování.

Hlavním úskalím bránícím širšímu užití a zpracování HRSI byl z počátku sensorový model, tedy určitý transformační klíč, který specifikuje způsob přechodu z 3D souřadnic ( $X, Y, Z$ ) v objektovém prostoru na 2D souřadnice na snímku ( $x, y$ ) a naopak. To je zásadní prvek pro obnovení funkčních vazeb mezi obrazovým prostorem snímku a objektovým prostorem a je naprosto nezbytný pro ortorektifikaci, stereo vyhodnocení či právě jednosnímkovou metodu získávání 3D informace. Problémem byl časový skluz nástrojů na straně zpracovatele (především kvalitní software a metodologie), který nastal za vývojem samotných snímacích aparatur. Byť odvětví DPZ udělalo za poslední desetiletí veliký skok ve smyslu rozlišení, kvality a distribuce obrazových dat, potřebný vývoj, vyšší dostupnost a uživatelská osvěta z hlediska zpracovatelských metod a nástrojů zůstávala dlouho pozadu.

Totíž i na scéně nově se objeví VHR snímky se musí tak jako příbuzné produkty letecké či satelitní fotogrammetrie umístit do vztažného souřadnicového systému. To znamená přiřadit každému bodu snímku správnou geografickou polohu v daném souřadnicovém systému. Až po úspěšné identifikaci bodů na snímku s příslušnými body na zemském povrchu může zpracovatel postoupit k dalším geometrickým, resp. kartografickým pracím s daty. Tuto elementární fázi zpracování obrazu zprostředkovává, jak již bylo řečeno, tzv. sensorový model. V této práci seznámím čtenáře s modelem fyzickým, ale především s racionálním funkčním modelem označovaným nadále zkratkou RFM (z angl. „*Rational Functional Model*“), který byl použit při vlastní práci s poskytnutými daty.

Fyzický sensorový model („*physical/ rigorous sensor model*“) používaný ve stereofotogrammetrii je velmi vhodný a zavedený nástroj vyrovnání geometrických

vlastností snímku a transformace mezi 3D objektovým prostorem a snímkovým prostorem. „Fyzický sensorový model se používá k reprezentaci fyzických obrazových procesů zapojením informací o pozici a orientaci nosiče/ senzoru.“ (Hu Y., Tao C. V., Croitoru A., 2004, 1. str.). Obecně přináší vysoce přesné informace o každém pixelu. Při jeho používání je nutné mít k dispozici informace o prvcích vnitřní orientace, tj. o ohniskové vzdálenosti, pozici hlavního bodu, distorzi objektivu a velikosti pixelu (dále IO – „*Interior Orientation*“). Proto je tento model označován jako fyzický, neboť nese informace o fyzických vlastnostech kamery. Dále jsou do procesu vloženy vlíčovací body („*Ground Control Points – GCPs*“) nutné pro výpočet vnějších parametrů snímače a také orientaci snímku (souřadnice udávané inerciálním systémem nosiče). Pokud ty nejsou dostupné, pak není dost dobře možné takový snímek zpracovat.

Je-li dalším úkolem zpracovatele zjistit relativní výšky budov a jiných nadzemních objektů, potřebuje hned dvojici snímků shodného území se všemi výše zmíněnými náležitostmi. To může být ovšem v některých případech, například krizových situacích jakými jsou povodně, tektonické pohyby a podobné jevy, časově náročné. Dalším tíživým faktorem mluvícím v neprospěch fyzického modelu je fakt, že lineární snímače jakými jsou Ikonos, QuickBird a další vykazují pro každý řádek snímku jiné parametry kamery, tj. jiné prvky vnější a vnitřní orientace.

Na druhé straně je tu možnost obecného sensorového modelu („*generalized sensor model*“), jenž nahrazuje fyzický sensorový model. Při zpracování HRSI snímků se totiž k zjištění funkčních vazeb mezi snímkem a objekty na Zemi prvky vnitřní ani vnější orientace senzoru nepoužívají. Namísto toho u polynomického řešení platí stejné koeficienty pro celou scénu a výpočet je stabilnější, rychlejší a není potřeba zapojit takové množství vlíčovacích bodů „Poprvé s touto metodou přišlo vojenské odvětví a to GDE Systems Inc., dnes BAE Systems, které pojmenovalo tento princip zpracování distančních dat jako tzv. univerzální sensorový model („*Universal Sensor Model – USM*“) a až později byl přijat OpenGIS konsorciem (dále OGC)“ (Whiteside, 1997; OGC, 1999).

V roce 1999 se pak ještě OGC shodlo na specifikaci tří typů sensorových modelů (dohromady zahrnutých právě pod termín obecný sensorový model), které se místo fyzického modelu používají. „Jedním je tzv. síťový interpolační model („*Grid Interpolation Model*“), univerzální real-time sensorový model („*Universal real-time Sensor Model*“) a nakonec racionální funkční model (RFM)“ (Di, K., Ma, R., Li, R., X., 2003, 33. str.). Všechny tři modely jsou všeobecně použitelné (generické), což znamená, že

parametry potřebné k jejich výpočtu nejsou ovlivněny fyzickými vlastnostmi zobrazovacího procesu, respektive kamery.

Zmiňovaný racionální funkční model se stal ovšem jako jediný z oněch tří standardem při zpracování snímků vysokého rozlišení a je automaticky implementován při základním zpracování snímků Ikonos i QuickBird. Jak uvádí literatura: „RFM se používá již přes 10 let k aproximaci fyzického modelu díky jeho schopnosti poskytnout přesné informace o různých fyzických sensorových modelech, a to unikátními, na senzoru nezávislými a v reálném čase probíhajícími výpočty.“ (Hu Y., Tao C. V., Croitoru A., 2004, 1. str.).

Funkční předpis RFM totiž dává do poměru polynomy odvozené fyzickým modelem s daty o odpovídajícímu terénu území. RFM poskytuje implicitní informaci o vnitřních i vnějších parametrech senzoru a tak pro georeferencování či ortorektifikaci snímků není třeba doplnit výpočet o data vlíčovacích bodů (GCPs), ale je třeba do systému vložit digitální model terénu (dále DEM) příslušného území.

Dvě výše zmíněné družice Ikonos a QuickBird, resp. jejich provozovatelé společnosti Space Imaging a DigitalGlobe jsou v současnosti nejvýznamnějšími komerčními a tedy veřejně dostupnými producenty snímků tohoto typu. Ve třetí příloze je uvedena tabulka družic pořizujících HRSI. Metoda zjišťování relativních výšek budov za pomoci jen jednoho snímku území, která je předmětem této magisterské práce, je založena právě na principu racionálního funkčního modelu a tak se i nadále bude tato práce zabývat výhradně jím, nebude-li řečeno jinak. Použité snímky plus příslušná data pocházejí z dílny společnosti DigitalGlobe a jejího senzoru, družice QuickBird.

Softwarový nástroj poskytnutý k uskutečnění této magisterské práce se jmenuje Silver Eye. Jde o sofistikovaný program zpracování dat DPZ, který extrahuje prostorová data o reliéfu mimo jiné i jednosnímkovou metodou. RFM obsažený v HRSI snímku přímo udává jeho orientaci a umístění do souřadnicového systému. Kontrola této georeference se provádí pomocí kontrolních bodů. Orientace senzoru je reprezentována sadou koeficientů označovaných zkratkou RPCs (z angl. „*Rational Polynomial Coefficients*“) a s těmi je pak možno uskutečnit několik fotogrammetrických operací, jako jsou ortorektifikace snímku či stereofotogrammetrie. Poněvadž HRSI snímky a k nim příslušná data poskytovaná senzory Ikonos a QuickBird v sobě právě informaci o RPCs nesou, je veškeré další zpracování pro uživatele více transparentní. Nemusí se obtěžovat s určováním parametrů kamery, ale po načtení snímku do systému a vzápětí dodáním potřebných koeficientů je schopen okamžitě začít zpracovávat snímek. Silver Eye poskytuje jak mono tak i stereo pracovní rozhraní

a uživatel může tak oběma způsoby sbírat 2D či 3D data. Jak navíc uvádí jeho výrobce kanadská společnost GeoTango, program je schopen zpracovávat dva snímky ze dvou různých satelitů, obsahuje přes 1100 souřadnicových systémů a automaticky odečítá výškové rozdíly mezi vloženým digitálním modelem terénu a hodnotami místního geoidu.

Konstrukce digitálního modelu budov způsobem, jakým je v této práci použit, se sestává z detekce hran a rohů budov, jimž je pak s pomocí digitálního modelu terénu přiřazena určitá nadmořská výška. Tato metoda je podrobně objasněna v kapitole 4.4. Při určování samotné výšky objektu, ovšem není zpracovatel odkázán pouze na jasné definování hrany, paty a vrcholu daného objektu, ale nabízí se mu i další možnost. Tou je alternativa v podobě určování výšky objektů z délky jejich stínu vrženého na zemský povrch. Známe-li hodnotu času, azimut a výšku slunce v době pořízení snímku, lokalizováním pozice vrcholu stínu a jeho základny při patě daného objektu jsme schopni díky vnořenému DEM určit relativní výšku objektu. Je na místě si ale uvědomit, že taková technika zcela selhává v místech jakými jsou města, kde stín jedné budovy se láme o jinou nebo bývá jiným stínem překryt. Naopak, někdy může být objekt natolik překryt jiným, že stín zůstane jedinou možností odvození jeho výšky. Obecně lze ale princip této metody aplikovat například v modelovém určování výšky bloku lesa, kdy je takto možné odhalit výšku krajních stromů. Dále lze předpokládat, že i stromy uvnitř lesa mají stejnou výšku a pak už zbývá jen jeden krok k určení celkového objemu biomasy daného území. A se známým objemem objektu se již dají provádět další modelové výpočty jako kupříkladu odhady objemu čistého dřeva a tak dále.

### 3. REŠERŠE LITERATURY

Literárních pramenů zabývajících se jednosnímkovou metodou obecně není mnoho. Ačkoliv tato metoda, jakožto iterativní vypočítávání relativní výšky budovy na principu detekce průsečíku digitálního modelu terénu s přímkou představující spojnicí ohniska kamery a vrcholu dané budovy (dále viz kapitola metodika) byla prvně představena veřejnosti již před pětatřiceti lety. Jednalo se o článek „*Digital mono-plotters*“ prezentovaný ve vědeckém časopise ITC Journal, v němž je popsán princip této metody (Makarovic, 1973). Bohužel tento text je v českém prostředí nedostupný a tak nezbyvá než se při odkazování na tohoto autora spoléhat na reference z ostatních publikací. Vzhledem k náskoku Makarovicovi teorie jaký před technologickou vyspělostí DPZ v oné době měla, k praktickému využití této metody mohlo dojít až o řadu let později. Je nejisté, kdy byla poprvé vyzkoušena ve vojenství, ovšem ve veřejné sféře byly podmínky k jejímu uplatnění naplněny až s vypuštěním prvního komerčního satelitu Ikonos 24. září roku 1999.

Na uvolnění distribuce snímků velmi vysokého rozlišení reagovaly vědecké instituce rozšířením výzkumu v oblasti metodiky zpracování a využití těchto dat, ale také vlastním vývojem nástrojů, jež by takové operace byly schopny zvládnout. Ze shromážděné literatury je jasně patrné, že množství vědeckých pracovišť a k nim příslušných týmů zabývajících se látkou, která je náplní této diplomové práce, je poměrně omezené. Drtivá většina použité literatury je de facto produktem stále stejných osob a na takto nakumulovaném materiálu je jako na časové ose dobře patrný vývoj, jímž se tato problematika ubírala. Vzhledem k úzkému tématu a okruhu lidí, jichž se literatura týká, je logické, že mnohokrát cituje jeden autor druhého a objevují se příbuzné definice, vysvětlení a podobně. Obecně lze rozdělit dotýcnou autorskou obec do dvou skupin.

První skupinu tvoří autoři, kteří se soustředí pouze na metodiku zpracování VHR snímků. Do tohoto okruhu se řadí odborníci: Jacek Grodecki, Gene Dial působící ve společnosti Space Imaging; dále Emmanuel Baltsavias zastupující Švýcarský národní technologický institut se sídlem v Zürichu odkud pochází software „*CyberCity*“ (pracuje s RFM modelem a extrakcí 3D modelů budov, nikoliv ale jednosnímkovou metodou). Jejich práce se zabývají více či méně podrobným popisem georeferencování satelitních snímků použitím racionálního funkčního modelu (ten mne zajímal především), affinního modelu a jejich další využití nijak zvlášť nerozebírají. Dále srovnávají přesnost toho či onoho modelu použitého za určitých podmínek. V o několik let mladších článcích pak tyto autoři metodiku dále rozvíjejí a přinášejí možnost další korekce nepřesností

georeferencovaných snímků za pomoci blokového vyrovnání a kompenzace odchylek způsobených samotným nosičem kamery.

Druhou skupinou jsou pak autoři spjatí přímo se vznikem softwarového nástroje, který HRSI snímky zmíněnými principy georeferencuje a dále umožňuje vytvářet 3D model zástavby jednosnímkovou metodou. Dosud byly stvořeny pouze dvě takové komerčně prodávané aplikace a právě od jejich tvůrců byla prakticky jediná možnost dozvědět se, na jakém principu funguje metoda detekce relativních výšek budov z jediného snímku.

Jednou z těchto aplikací je produkt z dílny katedry geomatiky při melbournské univerzitě v Austrálii („*Department of Geomatics, University of Melbourne*“) nazvaný jeho tvůrci **Barista**. K tomuto pracovišti a programu se váží vědci a autoři Clive S. Fraser, Harry B. Hanley, J. Wilneff, J. Poon.

Druhým pak je program nesoucí jméno **Silver Eye** pocházející z Kanady, konkrétně z torontské firmy GeoTango. S ním jsou spojeny osoby přímo z této společnosti Feng Wang a Peter Lenson, kteří společně se zástupci GeoICT laboratoře při Yorkské univerzitě v Torontu publikovali také několik užitečných článků. Společnost GeoTango byla ovšem 23. prosince 2005 pohlcena podnikem Microsoft, jež má s jejím klíčovým produktem velkorysé plány na 3D digitalizaci měst. Z tohoto důvodu již není tato aplikace dále v distribuci, navíc na webových stránkách [www.geotango.com](http://www.geotango.com) bylo ponecháno prosté sdělení o uskutečněné akvizici, bez možnosti dozvědět se něco hlubšího o zmíněném programu. V každém případě kvůli „embargu“ vydaném na program Silver Eye z vůle Microsoftu je situace při pátrání po literatuře objasňující princip jednosnímkové fotogrammetrie značně ztížená. V pramenech vydaných autory majícími spojitost s tímto softwarem se o monoplottingu píše v obecné rovině, bez bližších matematických formulací či doprovodných ilustrací. Naštěstí tvůrci konkurenčního programu Baristy v Melbourne zaujali mnohem otevřenější stanovisko a tak z několika jimi vydaných publikací je příležitost dostatečně čerpat informace vedoucí k poznání této metody a následně ji také v této práci prezentovat.

V následující části je již pozornost věnována samotnému hodnocení studované literatury, popř. dalších zdrojů. S ohledem na povahu ostatních pramenů je třeba začít dílem vzniklým na kanadské půdě. Jedná se o společnou publikaci vědců C. Vincenta Taa z York University v Torontu a Yonga Hua tehdy ještě z University of Calgary (2001). Jejich práce prezentovaná na konferenci Americké společnosti pro fotogrammetrii a dál-

kový průzkum (ASPRS) velice podrobně popisuje principy ustálení vazeb mezi prostorem snímku a objektovým prostorem na Zemi metodou racionálního funkčního modelu. Publikace patří mezi starší z mnoha využitých pramenů a matematické předpisy v ní uvedené jsou dále široce používány dalšími autory. Tento dokument se stal základním kamenem pro pochopení principu RFM, zdařile popisuje oba typy jak na terénu nezávislého, tak i závislého řešení, dále normalizaci souřadnic a nakonec srovnává výsledky s kontrolním měřením nad sadou GCPs. Popis kompenzace systematických chyb senzorů blokovým vyrovnáním však přichází až v další navazující literatuře jiných autorů. Tato práce se také jediným slovem nezmiňuje o jednosnímkové metodě, byť její autoři o něco později spolupracovali na tvorbě programu Silver Eye.

I v případě dalšího pramene, jímž se zabývá tento odstavec, nedojde k opuštění kanadské proveniencí. Jde o společný článek jednak vědců z Yorské Univerzity: Arie Croitoru, Vincent Tao, Yong Hu a Jeff Xu a také dvou pracovníků ze společnosti GeoTango: Feng Wang a Peter Lenson; prezentovaný na konferenci ASPRS (2004). Jejich práce v úvodu opět představuje princip RFM, byť nikoliv tak obsírně jako předchozí publikace. Dále se soustředí na ortorektifikaci a pro tuto práci konečně relevantní metody rekonstrukce 3D souřadnic. Na toto téma je popsána metoda stereofotogrammetrie a pouze obecně i jednosnímková fotogrammetrie. Zásadní na této práci je ovšem závěrečná část, kde jsou vzájemně konfrontovány programy Silver Eye v prostředí mono a stereo s programy *PCI Geomatica* a *Erdas Imagine* vždy pracujících ve stereo prostředí. Ve všech aplikacích byla použita shodná data a racionální funkční model. Hodnocení metod a programů bylo učiněno za prvé srovnáním horizontálních vzdáleností mezi vždy stejnou sadou dvojic bodů na snímku a za druhé došlo k porovnání změřených výšek 22 budov. Byly stanoveny průměrné, standardní, minimální a maximální odchylky a na základě zjištěných rozdílů byla kladně hodnocena metoda detekce relativních výšek z jednoho snímku. Bez bližšího popisu byla v této práci také naznačena možnost vyrovnání systematických chyb senzoru, ovšem pro objasnění této procedury bylo zapotřebí sáhnout po jiných pramenech.

Jedním z takových pramenů je článek vydaný dvěma odbornými zaměstnanci společnosti Space Imaging Jacka Grodeckiho a Gene Diala (2003). Jejich práce v úvodu ve stručnosti představuje fyzický sensorový model a racionální funkční model. V dalších odstavcích zdařile popisuje všechny systematické chyby, k nimž v případě sondy Ikonos dochází a objasňuje podmínky jejich zařazení do vyrovnání. Ačkoliv snímky, které jsou v této práci poskytnuty ke zpracování, pocházejí ze sondy QuickBird, informace o fyzických parametrech, respektive systematických chybách tohoto senzoru k dispozici



nebyly. Nicméně předpoklad je takový, že u obou senzorů dochází k podobným systematickým chybám, čili jejich popis platí obecně pro obě kamery. V tomto článku jsou dále popsány matematické základy odvození parametrů vyrovnání a jejich zařazení do opravy výpočtu racionálních koeficientů v RFM. Nutno poznamenat, že tato část je poněkud méně srozumitelná. Jednak protože popis výpočtu parametrů vyrovnání omezuje na stručnou formulaci o zařazení fyzického sensorového modelu a pak také kvůli trochu nešťastně zvolené znakové sadě použité v uvedených rovnicích. Na druhou stranu jako velmi přínosnou lze v tomto textu uvítat část, v níž jsou na sadě snímkových i objektových souřadnic srovnávány tři různé úrovně blokového vyrovnání pro čtyři různě dlouhé pásy území.

K lepšímu pochopení metody kompenzace systematických chyb kamery (opět pouze Ikonosu) bylo třeba se seznámit s článkem napsaným dvěma autory z australské University of Melbourne vydaném při konferenci ASPRS Clivem S. Fraserem a Harrym B. Hanleym (2003). Jak je již uvedeno dříve, na tamním pracovišti byl vyvinut software Barista, jehož prostřednictvím je rovněž možné konstruovat 3D model budov z jednoho snímku. V této publikaci je popsán princip slícování scény metodou RFM, jenž následuje popis kompenzace systematických chyb. Na uvedených příkladech je mimojiné graficky demonstrována velikost a orientace vypočtených odchylek. Odtud pochází především zásadní poznání, že odchylky u kamer z úzkým zorným polem a dlouhou ohniskovou vzdáleností se projevují zejména v posunu bodů ve směru os  $x$ ,  $y$  na snímku. Přičemž tento posun může v absolutní hodnotě dosahovat i 70 pixelů. Ovšem střední směrodatná odchylka těchto posunů se pohybuje v sub-pixelových hodnotách, což dokazuje vysokou podobnost v orientaci posunů na snímku. Na poslední straně tohoto textu jsou pak prezentovány obecné rovnice s výpočtem racionálního funkčního modelu s polynomickými koeficienty kompenzovanými o systematické chyby. Schéma těchto vzorců bylo následně převzato k jejich prezentaci v této práci.

Poslední nejasnost, kterou bylo zapotřebí si k definitivnímu pochopení blokového vyrovnání systematických chyb ujasnit, byl způsob, jakým se získávají prvky vnitřní a vnější orientace, ačkoliv nejsou explicitně dostupné fyzické parametry kamery. Tomuto okruhu se věnuje článek prezentovaný při stejné příležitosti jako ten předchozí. Tentokrát se ovšem jedná o publikaci, jejímž autorem je trojice vědců: Kaichang Di, Ruijin Ma, Rong Xing Li (2003). Jak již název této práce napovídá, jedná se o popis rekonstrukce fyzického sensorového modelu z racionálních polynomů. Po obšírnějším úvodu popisujícím počátky zavedení RFM do širší praxe následuje matematický popis fyzického

senzorového modelu a rovnic kolinearity v jejich normální i inverzní formě. Je zde vysvětlen význam jednotlivých parametrů a uvedeny výhody a nevýhody tohoto modelu. V navazující části je prezentován postupný rozvoj vzestupného RFM a jeho implementace při stereofotogrammetrii. Další kapitola už ovšem konečně odhaluje princip výpočtu fyzických parametrů kamery z racionálních koeficientů. Tento popis se omezuje spíše na teoretický popis veškeré procedury a s odkazem na starší zdroj poskytuje dvě rovnice, které rekonstrukci fyzických parametrů reprezentují po stránce matematické.

V podstatě jedinou seriózní publikací věnující se podrobně jednosnímkové metodě získávání relativních výšek, s kterou se lze setkat, byl článek již dříve zmiňovaných autorů z University of Melbourne. Odborníci J. Wilneff, J. Poon a Clive S. Fraser se osobně podíleli na vývoji programu Barista a výsledky své práce prezentovali na konferenci ISPRS (2005). Poněvadž, na rozdíl od mnoha dalších pracovišť, na půdě tamního vědeckého institutu mají možnost v praxi testovat techniku monoplottingu, aniž by je omezovaly jakékoliv licenční závazky, představoval - nejen pro mě - tento článek a příbuzné prezentace na jejich webových stránkách jediný relevantní zdroj informací o jednosnímkové metodě. Byť byl tento způsob detekce relativních výšek poprvé představený světu již v roce 1973, širší polemice se této metodě dostalo až s jejím komerčním aplikováním a vývoji vhodných nástrojů.

## 4. METODIKA

Na výsledné přesnosti jednosnímkového zpracování satelitních dat mají zásadní vliv dva faktory. Jednak jím je kvalita vloženého digitálního modelu terénu a tím druhým faktorem je přesnost použitého sensorového modelu. Zatímco na produkci a tedy přesnosti DEM se běžný uživatel nepodílí, ve výběru sensorového modelu má již určitou volnost. Zpravidla se řídí požadovanou přesností, jaké chce dosáhnout a také dostupnými informacemi o kameře či pozemních bodech, které má při práci k dispozici. Při zpracování snímků vysokého rozlišení jsou nejvíce diskutovány a vzájemně konfrontovány především fyzický a racionální sensorový model, kterým se budu v následujících kapitolách věnovat.

### 4.1. Fyzický sensorový model

Fyzický sensorový model dosahuje povětšinou vyšší přesnosti a bývá tak za standardních okolností (známé IO, EO a dostupné GCPs) upřednostňován. Na druhou stranu právě transformace, která není na fyzických parametrech kamery a na terénu závislá, činí obecný, potažmo racionální sensorový model velmi žádaný, někdy jediný možný použitelný.

Nejčastěji se pro slícování scény v případě použití fyzického sensorového modelu používá tzv. kolineární transformace, dosud hojně využívaná metoda při práci s fotogrammetrickými daty. Jde o transformaci, kdy obraz bodu je pomocí středového promítání zobrazen z terénu do roviny snímku. Předpis kolineární transformace reprezentují rovnice 1a, 1b níže.

$$x - x_0 = -f \frac{a_{11}(X - X_s) + a_{12}(Y - Y_s) + a_{13}(Z - Z_s)}{a_{31}(X - X_s) + a_{32}(Y - Y_s) + a_{33}(Z - Z_s)}$$

$$y - y_0 = -f \frac{a_{21}(X - X_s) + a_{22}(Y - Y_s) + a_{23}(Z - Z_s)}{a_{31}(X - X_s) + a_{32}(Y - Y_s) + a_{33}(Z - Z_s)}$$

Rovnice 1a, 1b; (Zdroj: Di, K., Ma, R., Li, R., X., 2003, 33. str.)

Kde  $x$ ,  $y$  jsou souřadnice bodu na snímku (snímkový prostor),  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  jsou souřadnice adekvátního bodu na zemském povrchu (objektový prostor);  $f$  je ohnisková vzdálenost,  $x_0$ ,  $y_0$  jsou souřadnice hlavního bodu snímku (IO).  $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$  jsou souřadnice

centrálního bodu projekce snímku. Koeficienty  $a_{ij}$  jsou parametry matice obsahující rotace ve směrech os  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – rotace o úhly  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$  (prvky vnější orientace; EO – „*Exterior Orientation*“). Souřadnice  $x$  a  $y$  jsou navíc již opraveny o distorze objektivu - radiální i tangenciální. Následující matice odhaluje výpočet koeficientů  $a_{ij}$ :

$$A^T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\kappa\sin\varphi & \sin\kappa\cos\omega + \cos\kappa\sin\varphi\sin\omega & \sin\kappa\sin\omega - \cos\kappa\sin\varphi\cos\omega \\ -\sin\kappa\cos\varphi & \cos\kappa\cos\omega - \sin\kappa\sin\varphi\sin\omega & \cos\kappa\sin\omega + \sin\kappa\sin\varphi\cos\omega \\ \sin\varphi & -\cos\varphi\sin\omega & \cos\varphi\sin\omega \end{bmatrix}$$

Rovnice 2: (Zdroj: Di, K., Ma, R., Li, R., X., 2003, 33. str.)

Na první pohled je patrné, že výše uvedené početní operace jsou poměrně komplikované. Zvážíme-li množství různých prvků vstupujících do výpočtu, potřebu mít k dispozici minimálně čtyři vlíčovací body a pro další stereofotogrammetrické zpracování toto vše pro každý jeden snímek, složitost celého procesu je evidentní.

#### 4.2. Racionální funkční model - RFM

Jak stojí napsáno v předchozí kapitole, jednosnímková metoda zjišťování relativních výšek je umožněna díky specifickým geometrickým vlastnostem snímků typu HRSI a jako takovou ji nelze uskutečnit jen pomocí fyzického sensorového modelu. Ten je tady nahrazen zmiňovaným racionálním modelem. Celá obrazová scéna je rozdělena na několik částí a na každou z nich je zvlášť aplikován RFM. To i přesto, že se může stát, že jeden RFM (jeden soubor RFM parametrů) plně dostačuje k vlícování celé scény (např. v případě PAN snímku z QuickBirdu se standardně jedná o 27552 řádků a 27424 sloupců pixelů).

Zemský povrch je totiž v obou případech snímán citlivou aparaturou z velké výšky (cca 680 km v případě Ikonosu a 450 km u QuickBirdu) a velmi úzkým zorným polem (0,98° u Ikonosu a 2,1° u QuickBirdu), které tak značně eliminují distorze. Samotný snímek je pak ke zpracovateli dodán spolu se sadou příslušných parametrů pro každý RFM. Tyto parametry se obecně označují zkratkou RPC („*Rational Polynomial Coefficients*“; také je možné se setkat s termínem „*Rapid Positioning Capability*“ či „*Rational Polynomial Camera data*“; dále RPCs). RPCs umožňují transformaci snímkových a objektových souřadnic. Pozice satelitu sledují přijímače GPS, souřadnice jsou tudíž uváděny v systému WGS-84. Proces georeferencování s pomocí RPCs vyžaduje

hodnoty zemských výšek v metrických jednotkách. Co se tedy hodnot ve vertikálním směru týče, jedná se vždy o výšky vzhledem k referenčnímu elipsoidu systému WGS-84. Proto je ovšem při práci metodou RFM nutné od hodnot výšek udávaných DEM pro příslušné území na snímku ještě odečíst hodnoty výšek lokálního geoidu (uvádí se pro střed snímku). Tuto hodnotu lze snadno dohledat na několika webových serverech po vložení geografických souřadnic; např.:

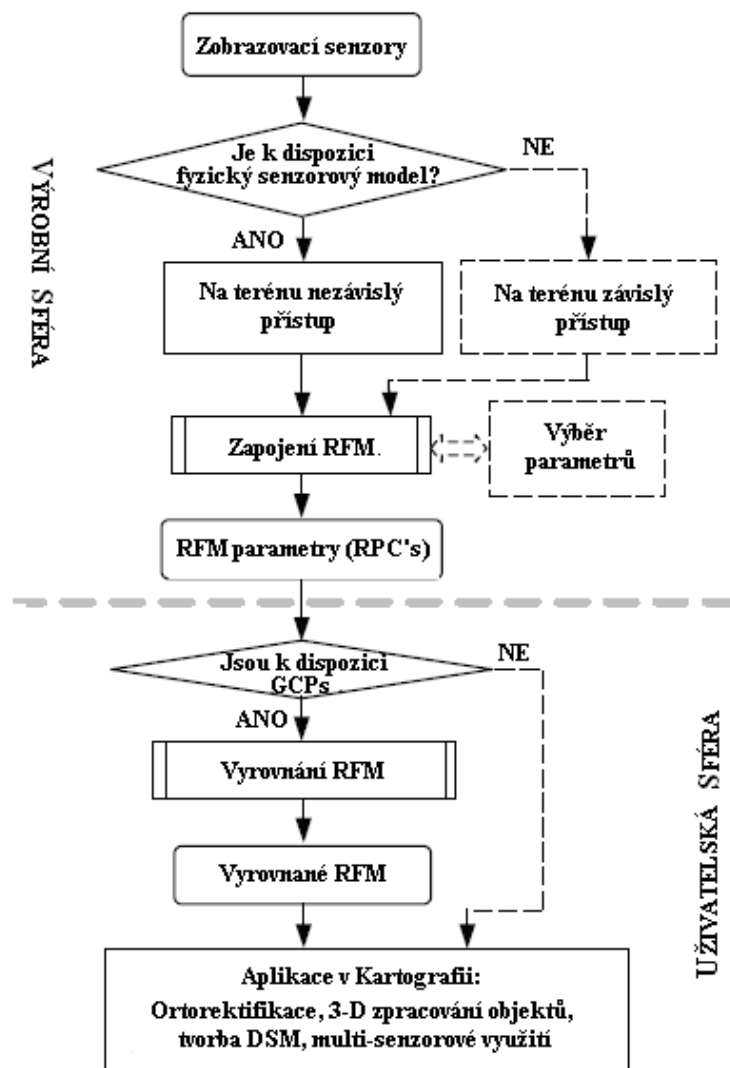
<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html>

<http://sps.unavco.org/geoid/>

[http://www.ngs.noaa.gov/cgi-bin/GEOID\\_STUFF/geoid03\\_prompt1.pr](http://www.ngs.noaa.gov/cgi-bin/GEOID_STUFF/geoid03_prompt1.pr)

Následující obrázek prezentuje postup práce se snímkem vysokého rozlišení metodou racionálního funkčního modelu RFM.

Obrázek č. 1: Postup použití RFM



Zdroj: Hu, Y., Tao, C., V., Croitoru, A., 2004, 2. str.

RFM byl vyvinut tak, aby co nejlépe aproximoval fyzický sensorový model. Obecně existují dvě cesty jak suplovat fyzický sensorový model v závislosti na využití či naopak nevyužití vlíčovacích bodů. Pokud nejsou GCPs dostupné, zpracovatel volí výpočet RFM označovaný termínem na terénu nezávislé řešení. Orientace senzoru je určena z efemerid a postavení snímače při pořízení snímku, jejichž hodnoty nám zprostředkovává fyzický sensorový model. Efemeridy se určují za pomoci palubních, tedy na nosiči ukotvených přijímačů GPS a sofistikovaného pozemního zpracování z nich obdržených dat. Postavení senzoru detekují gyroskopy s pomocí měření směrů vůči vzdáleným hvězdám.

Druhým pak je výpočet založený na zapojení vlíčovacích bodů a nazýváme jej na terénu závislým řešením. Ovšem výsledek tohoto přístupu je silně závislý na rozložení a na počtu GCPs, tudíž není na rozdíl od na terénu nezávislého řešení doporučován. Pokud máme ovšem informaci o známých GCPs, jejich využití může přece jen najít své uplatnění. Totiž zapojením sady vlíčovacích bodů do zpracování a jejich dosazením do transformačního klíče lze velmi efektivně eliminovat systematické chyby samotného senzoru, které jsou v hodnotách RPCs obsaženy. Tato etapa procesu bude podrobněji popsána v další části této kapitoly týkající se vyrovnání RFM. Jak nezdědka upozorňují rozličné literární prameny, uživatel je silně závislý na producentovi snímku a často je staven do situace, že mu nezbyvá jiná volba než právě na terénu závislé řešení výpočtu RFM.

#### **4.2.1. Na terénu závislý přístup**

Jak bylo dříve uvedeno, sensorový model je v podstatě matematický předpis popisující geometrické vazby mezi prostorem objektu na Zemi a prostorem snímku. To znamená, že definuje přechod z prostorových souřadnic objektu ( $X, Y, Z$ ) na souřadnice pixelů snímku ( $x, y$ ). V případě racionálního funkčního modelu hraje roli 80 polynomických koeficientů RPC umožňující zpracovateli rektifikaci snímku, aniž by přitom musel mít k dispozici fyzický sensorový model, tj. informace o IO a EO kamery. Pro transformaci souřadnic z objektového prostoru do prostoru snímku se používá výpočet racionálních polynomických funkcí  $g, h$ , čili poměr polynomů (podle v roce 2000 schváleného standardu „*National Imagery and Mapping Agency*“ - NIMA).

$$x_n = h(X_n, Y_n, Z_n) = \frac{P_1(X_n, Y_n, Z_n)}{P_2(X_n, Y_n, Z_n)}$$

$$y_n = g(X_n, Y_n, Z_n) = \frac{P_3(X_n, Y_n, Z_n)}{P_4(X_n, Y_n, Z_n)}$$

Rovnice 3a, 3b; (Zdroj: Di, K., Ma, R., Li, R., X., 2003, 34. str.)

Přičemž  $x_n, y_n$  jsou souřadnice sloupců ( $x$ ) a řádků ( $y$ ) ve snímku. V jiné literatuře se lze také setkat se značením  $l$  („line“) či  $r$  („row“) pro hodnotu  $y$  a  $s$  („sample“) popřípadě  $c$  („column“) pro  $x$ .  $X_n, Y_n$  a  $Z_n$  jsou hodnoty souřadnic bodu na Zemi, tedy v objektivém prostoru. Obě sady souřadnic jsou normalizovány. Tzn. jejich hodnoty jsou redukovány ke středu snímku („offset values;“  $x_o, y_o$ , resp.  $X_o, Y_o, Z_o$  jsou souřadnice středu snímku) a poděleny hodnotou měřítka („scale factors,“  $x_s, y_s$ , resp.  $X_s, Y_s, Z_s$ ). Výsledkem jsou hodnoty  $x_n$  a  $y_n$ , resp.  $X_n, Y_n, Z_n$  v rozmezí  $<-1, 1>$ . Tato normalizace slouží k vyšší stabilitě iterací a eliminaci chyb při výpočtech a je vyjádřena níže uvedenými vztahy:

$$X_n = \frac{X - X_o}{X_s}, \quad Y_n = \frac{Y - Y_o}{Y_s}, \quad Z_n = \frac{Z - Z_o}{Z_s}$$

Rovnice 4a, 4b, 4c; (Zdroj: Tao, C., V., Hu, Y., 2001, 1348 str.)

Z rovnic 3a, 3b:  $P_1, \dots, P_4$  jsou polynommické funkce s koeficienty  $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}, d_{ijk}$ . Viz následující rovnice 5 a 6a, 6b.

$$P(X_n, Y_n, Z_n) = a_0 + a_1 X_n + a_2 Y_n + a_3 Z_n + a_4 X_n^2 + a_5 X_n Y_n + a_6 X_n Z_n + a_7 Y_n^2 + a_8 Y_n Z_n + a_9 Z_n^2 + a_{10} X_n^3 + a_{11} X_n^2 Y_n + a_{12} X_n^2 Z_n + a_{13} X_n Y_n^2 + a_{14} X_n Y_n Z_n + a_{15} X_n Z_n^2 + a_{16} Y_n^3 + a_{17} Y_n^2 Z_n + a_{18} Y_n Z_n^2 + a_{19} Z_n^3$$

Rovnice 5; (Zdroj: Di, K., Ma, R., Li, R., X., 2003, 35. str.)

Po dosazení RPC koeficientů do rovnice 3a, 3b vypadá transformační klíč následovně:

$$x_n = \frac{\begin{pmatrix} 1 & X_n & Y_n & Z_n & \dots & Y_n Z_n^2 & Z_n^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_{18} & a_{19} \end{pmatrix}^T}{\begin{pmatrix} 1 & X_n & Y_n & Z_n & \dots & Y_n Z_n^2 & Z_n^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & \dots & b_{18} & b_{19} \end{pmatrix}^T}$$

$$y_n = \frac{(1 X_n Y_n Z_n \cdots Y_n Z_n^2 Z^3)(c_0 c_1 c_2 c_3 \cdots c_{18} c_{19})^T}{(1 X_n Y_n Z_n \cdots Y_n Z_n^2 Z^3)(1 d_1 d_2 d_3 \cdots d_{18} d_{19})^T}$$

Rovnice 6a, 6b; (Zdroj: Di, K., Ma, R., Li, R., X., 2003, 35. str.)

Takto je k dispozici v každé rovnici 20 RPC koeficientů v čitateli a 19 ve jmenovateli. Dohromady tedy v obou rovnicích 78 RPC koeficientů ( $b_0$ ,  $d_0$  nahrazeny hodnotou 1)<sup>1</sup>. Pokud pak chce zpracovatel vypočítat RFM model, musí mít k dispozici přinejmenším 39 vlíčovacích bodů (GCPs). Jak si můžeme z uvedených rovnic všimnout, proměnné dosahují až třetího řádu. „Proměnné prvního řádu reprezentují distorze zaviněné optickým promítáním, zatímco zakřivení Země, atmosférická refrakce a distorze čoček kamery jsou modelovány proměnnými druhého řádu. Další neznámé a doplňující distorze absorbují proměnné třetího řádu“ (Hu, Y., Tao, C., V., Croitoru, A., 2004, 3. str.).

Nakonec ještě zbývá uskutečnit převod normalizovaných souřadnic  $x_n$ ,  $y_n$  k původním souřadnicím  $x$ ,  $y$ . Tento krok definují níže uvedené rovnice 7a, 7b (srovnej s rovnicemi 4a, 4b, 4c výše):

$$x = x_n \cdot x_s + x_0,$$

$$y = y_n \cdot y_s + y_0$$

Rovnice 7a, 7b; (Zdroj: Dial, G., J. Grodecki, J., 2003, 61. str.)

Výše popsané vztahy a rovnice se také označují jako tzv. vzestupný RFM model („*upward*“ či „*forward RFM*“). Jedná se o polynomickou transformaci třetího řádu se zapojením vlíčovacích bodů. Jak poznamenávají autoři z GeoICT laboratoře v Torontu: „Pro zpracovatele může být vlastní vytvoření RFM výjimečně náročné, obzvláště pokud nemá k dispozici fyzický sensorový model. To proto, že tato operace si vyžaduje značné množství velmi dobře rozmístěných GCPs. Navíc i pokud jsou tyto body dodány spolehlivým zdrojem, mohou být vlastnosti terénu natolik komplikované, že výsledný RFM nemusí být co do přesnosti spolehlivý“ (Croitoru, A., Hu, Y., Tao, C., V., Xu, Z., Wang, F., Lenson, P., 2004, 2. str.).

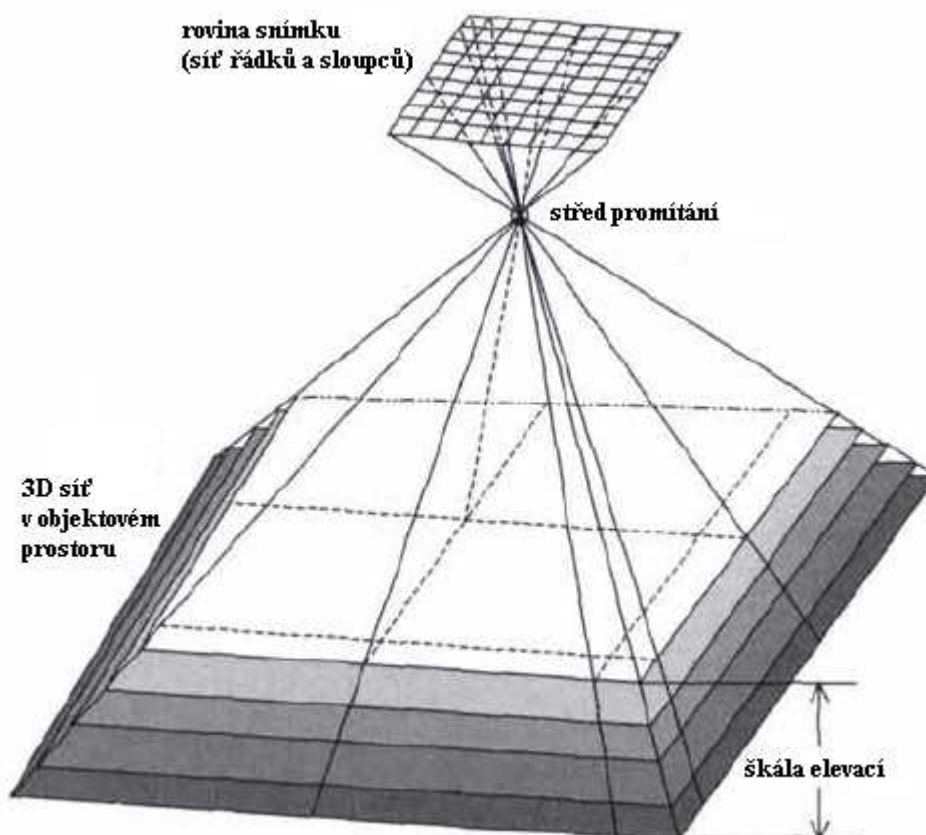
<sup>1</sup> Racionální koeficienty a další hodnoty, s kterými byl snímek zpracován jsou uvedeny v příloze č. 1.



#### 4.2.2. Na terénu nezávislý přístup

V případě, že má zpracovatel přístupné informace o vnitřní i vnější orientaci kamery a rozhodne se pro rektifikaci scény pomocí racionálních polynomů, může provést na terénu nezávislé řešení RFM. „Na snímku se nejdříve stanoví síť  $m \times n$  rovnoměrně rozložených bodů, přičemž počet řádků a sloupců by měl být stejný. Racionální polynomicke koeficienty se namísto užitím sady vlíčovacích bodů spočítají vytvořením odpovídající 3D sítě v objektovém prostoru („3D Object Grid“). Prostorové umístění každého bodu ze snímku je vypočteno zapojením fyzického sensorového modelu. Dimenzionální uspořádání této sítě se sestává z horizontální roviny odpovídající úplnému rozsahu snímku a z vertikálních hodnot reliéfu rozdělených do různých výškových intervalů. Tyto intervaly dohromady reprezentují úplnou škálu terénních elevací daného území, přičemž je dle dosažených zkušeností doporučeno rozdělit hodnoty do více než třech intervalů“ (Tao, C., V., Hu, Y., 2001, 1350. str.). Tuto problematiku také znázorňuje následující obrázek.

Obrázek č. 2: Řešení RFM zapojením 3D sítě z DEM a 2D sítě na snímku



Zdroj: Tao, C., V., Hu, Y., 2001, 1350. str.

Tento krok při řešení racionálního modelu se zdá být poněkud složitý, nicméně následující část se jej pokusí dostatečně objasnit. Problém při použití jen jednoho snímku je, že na rozdíl od stereofotogrammetrie, kde jsou souřadnice bodu v objektovém prostoru určeny protnutím sbíhajících se paprsků z každého snímku, u jednoho snímku máme pouze právě jeden paprsek a nikoliv definovaný bod  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Nicméně vložením digitálního modelu se získá počáteční hodnota souřadnice  $Z$  (maximální nebo minimální z DEM) a zbývající souřadnice  $X$  a  $Y$  jsou odvozeny z inverzních tvarů kolineární transformace, viz následující rovnice.

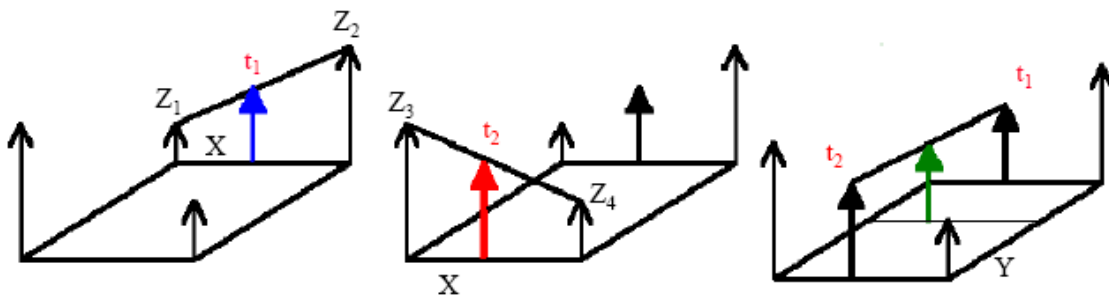
$$X = (Z - Z_S) \frac{a_{11}(x - x_0) + a_{21}(y - y_0) + a_{31}(-f)}{a_{13}(x - x_0) + a_{23}(y - y_0) + a_{33}(-f)} + X_S$$

$$Y = (Z - Z_S) \frac{a_{12}(x - x_0) + a_{22}(y - y_0) + a_{32}(-f)}{a_{13}(x - x_0) + a_{23}(y - y_0) + a_{33}(-f)} + Y_S$$

Rovnice 8a, 8b; (Zdroj: Di, K., Ma, R., Li, R., X., 2003, 34. str.)

Souřadnice  $Z$  se z digitálního modelu terénu vypočítává tak zvanou bilineární interpolací, které je možno porozumět z následujícího obrázku a rovnic.

Obrázek č. 3: Interpolace souřadnice  $Z$  z DEM



$$t_1 = X \cdot Z_2 + (1 - X) \cdot Z_1 \quad t_2 = X \cdot Z_4 + (1 - X) \cdot Z_3$$

$$Z = Y + t_1 + (1 - Y) \cdot t_2$$

Rovnice 9a, 9b, 9c;

Zdroj: <http://www.geom.unimelb.edu.au/cfraser/451332.htm> (2008)

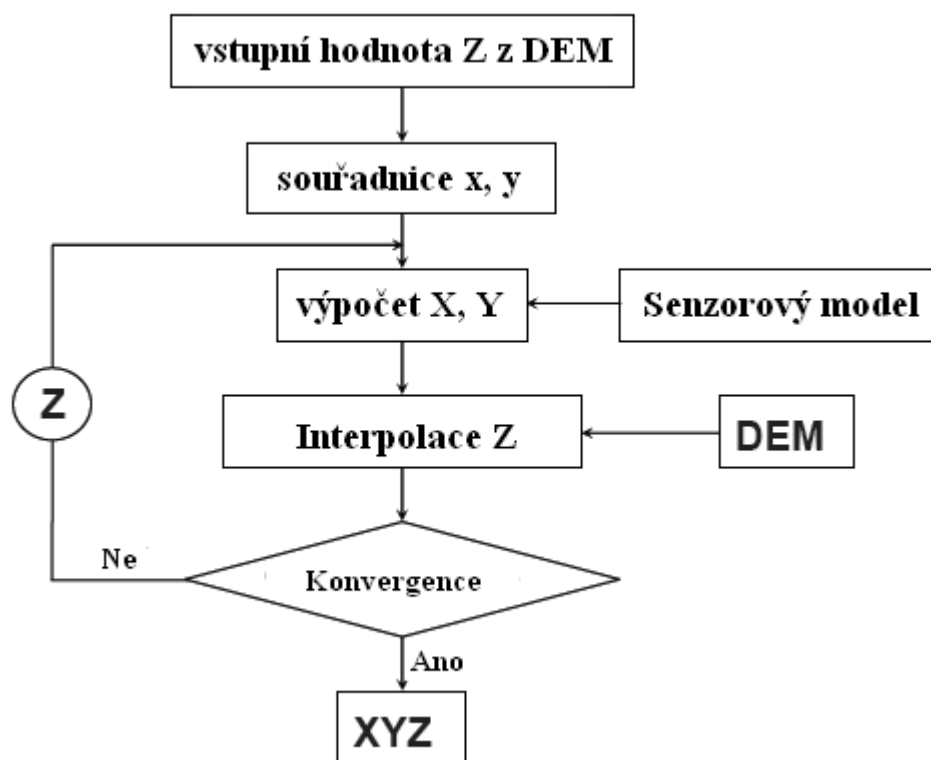
V dalším průběhu této procedury dochází k reprojekci bodu  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  využitím normálních forem rovnic kolineární transformace (viz rovnice 1a, 1b). Takto vypočítané snímkové souřadnice jsou porovnány s naměřenými snímkovými souřadnicemi, přičemž

jsou stanovena jistá konvergenční kritéria, která říkají kdy se celá iterace zastaví. Tj. dokud se rozdíly těchto souřadnic nedostanou pod určenou mez.

Výše popsaná procedura interpolace vertikální souřadnice by se dala schématicky vyjádřit jako na čtvrtém obrázku dále.

Přesto, že existuje pro oba typy řešení několik kombinací výše uvedených polynomických výrazů, právě zde uvedené rovnice byly zavedené a definované NIMA. V oblasti dálkového průzkumu a zpracování satelitních dat jsou uvažovány jako standard, neboť také právě je používají vůdčí společnosti Space Imaging i Digital Globe.

Obrázek č. 4: Schéma výpočtu relativní výšky objektu



Zdroj: <http://www.geom.unimelb.edu.au/cfraser/451332.htm>, (2008)

### 4.3. Vyrovnění RFM

Hodnoty RPCs jsou zprostředkovány producentem snímků a udávají pozici senzoru na jeho orbitě v systému WGS-84. Výška snímače nad Zemí je však odvozena od průměrné hodnoty výšky zemského povrchu v zorném poli resp. ve snímku. Tyto hodnoty jsou poté použity k výpočtu souřadnic rohů snímku. Ovšem i malé chyby v hodnotách

udávaných senzorem mohou nabýt poměrně vysokých rozměrů při georeferencování snímků. To způsobuje možný nesoulad hodnot s dosazeným DEM při slícování, které hraje zásadní roli při zorientování snímku. Z tohoto důvodu se celý proces ještě zpřesňuje tzv. georeferenční korekcí, v níž se výpočet transformačního klíče obohatí o hodnoty souřadnic vlícovacích bodů identifikovaných na snímku (Halounová, L., Pavelka, K., 2005). „Užitím GCPs pak může být dosaženo ještě větší přesnosti. Do RFM výpočtu jsou totiž zapojena data o souřadnicích GCPs a tím jsou pak ještě dodatečně opraveny informace o efemeridách a postavení senzoru. Produkty společnosti Digital Globe (QuickBird) v sobě nesou RFM s přesností od 0,6 m, v závislosti na právě určeném postavení a efemeridách nosiče“ (Hu, Y., Tao, C., V., Croitoru, A., 2004, 1. str.).

Vyrovnaní mezi hodnotami známých souřadnic vlícovacích bodů a jim příslušných souřadnic ze snímku ( $x, y$ ) zprostředkovaných na terénu nezávislým řešením RFM, vede ke zlepšení geografické pozice snímku a provádí se přepočtem racionálních polynomických koeficientů. Tuto operaci, jak prezentuje obrázek č. 1, iniciuje sám uživatel vložením GCPs a zapojením prvků vnitřní a vnější orientace, tzn. vložením fyzického sensorového modelu.

Zde je potřeba udělat menší odbočku a trochu připomenout technické vlastnosti uvažovaných kamer. Sensory s vysokou rozlišovací schopností a úzkým zorným polem, jakými jsou právě Ikonos či QuickBird, používají lineární snímač, čímž platí pro celou jednu řadu pixelů na snímku shodný čas expozice. Dále, stejně jako má každá řada pixelů odlišnou expozici, tak se i liší pro každou řadu také orientace přístroje v daném čase. Tato vlastnost je dána tím, že narozdíl od běžných optických zařízení, u těchto sensorů má každý pixel svojí stálou pozici upevněnou v ohniskové rovině a CCD detektory jsou rigidně ukotveny v tepelně a mechanicky konstantním prostředí. Tudíž není třeba a ani žádoucí provádět korekce prvků vnitřní orientace. Prvky vnější orientace jsou pak dány pozicí a polohou senzoru. Pozici jakožto proměnlivou v čase určují palubní přijímače GPS a změnu polohy - taktéž časovou proměnnou - sledují soustavy gyroskopů a zařízení pro sledování hvězd.

Na příkladě sondy Ikonos lze snadno demonstrovat, jaké parametry je tedy třeba pro vyrovnaní sledovat a jak s nimi pracovat. Mezní přesnost, respektive nepřesnost Ikonosu činí přibližně jeden metr pro odchylku pozice a zhruba jednu až dvě úhlové sekundy pro odchylky polohy senzoru. Pro satelitní systémy s vysokou rozlišovací schopností platí plná korelace mezi odchylkami ve směru i napříč směrem snímání („*in-track*“ a „*cross-track*“) a odchylkami ve sklonu a otočení senzoru („*pitch errors*“ a „*roll*“).

errors“). Jak bude popsáno dále, chyby vzniklé odbočením ze směru a radiální odchylky jsou zanedbatelné. Tudíž je potřeba pouze vyhodnotit odchylky ve sklonu a stočení kamery. Takové odchylky se vyskytují, dojde-li k následujícím chybám.

### ***Chyby z rotace***

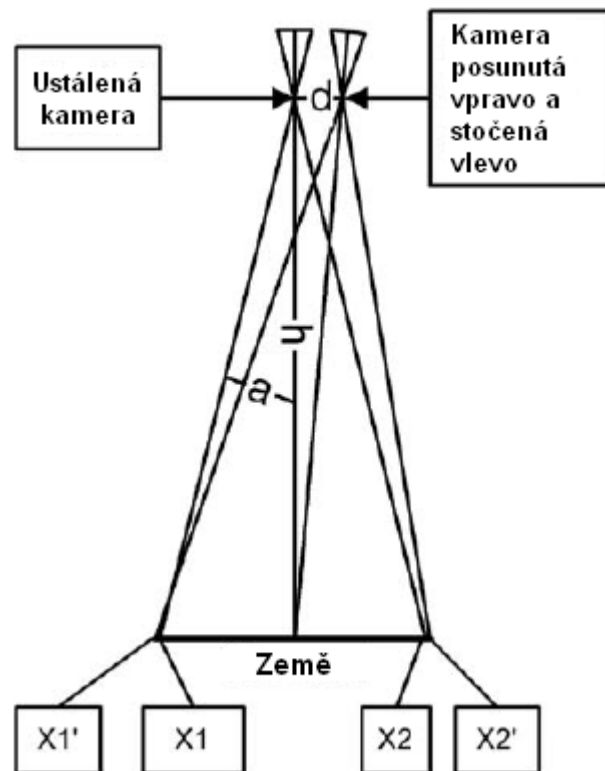
Tak zvané chyby z rotace senzoru („*attitude errors*“) tvoří: změna sklonu (rotace kamery kolem osy kolmé na směr pohybu senzoru), stočení kamery (rotace kolem osy ve směru pohybu) a vybočení (rotace kolem osy ve směru pohledu kamery). V případě sondy Ikonos pohybující se ve výšce 680 km nad Zemí (QuickBird 450 km) odchylka dvou úhlových sekund ve sklonu nebo stočení kamery způsobí nepřesnost 6,6 m a vyšší, protože tato nepřesnost lineárně roste s rostoucí šikmou vzdáleností mezi ohniskem kamery a skenovaného území. Na druhé straně odchylka ve vybočení kamery („*yaw error*“) se projevuje nepřesností pouze vzhledem k šířce pruhu, který kamera sejme na povrchu. Činí-li tedy maximální chyba 2’’ a Ikonos snímá pás široký 11 km (QuickBird 16,5 km), maximální nepřesnost může být pouhých 0,055 m, čili zanedbatelná.

### ***Efemeridní chyby***

Chyby v efemeridách, tj. v pozici senzoru vůči hvězdám, lze obecně rozdělit na odchylky způsobené změnou pozice kamery ve směru letu, změnou pozice kolmo na směr letu a radiální odchylky, jejichž příčinou je členitost terénu.

„Pro kamery s velmi úzkým zorným polem jsou malé horizontální posuny srovnatelné s rotacemi o velmi malé úhly. Tudíž je možno plně suplovat příčné změny pozice kamery jejím stočením. Obdobné je to také v případě pozice ve směru pohybu senzoru a jejím nahrazením odchylkou ve sklonu kamery“ (Dial, G., Grodecki, J., 2003, 60. str.). Jak demonstruje následující pátý obrázek a početní důkaz, dojde-li ke stočení senzoru o 2’’, rozdíl mezi geometrií snímku pořízeného ustálenou kamerou a pootočenou kamerou odpovídá:  $X_1 - X_1' = X_2 - X_2' = 0,000454 \text{ m}$ , tedy méně než 1/2000 pixelu. „Vykazuje-li tedy kamera s potřebně úzkým zorným polem dostatečně malé poziční chyby, takové, že efekt vychýlení kamery z nominální pozice je zanedbatelný, potom nemohou být změny v pozici a poloze kamery nezávisle zpozorovány“ (Dial, G., Grodecki, J., 2003, 60. str.)

Obrázek č. 5: Efekt příčného posunutí a stočení kamery



Zdroj: Dial, G., Grodecki, J., 2003, 60. str.

Pro pochopení předcházejícího obrázku je potřeba si vysvětlit, co které hodnoty znamenají a jakých velikostí dosahují. Tedy:

$a$  je polovina zorného pole kamery; pro Ikonos je  $a = 28,53'$

$h$  je výška senzoru nad povrchem Země; pro Ikonos  $h = 680 \text{ km}$

$r$  je úhel otočení kamery;  $r = 2''$

$d$  je velikost posunutí kamery;  $d = h \cdot \tan(r) = 6,593466 \text{ m}$

$X_1$  je pozemní souřadnice bodu na levém okraji snímku z ustálené kamery;

$X_1 = -h \cdot \tan(a) = -5643,477167 \text{ m}$

$X_1'$  je pozemní souřadnice bodu na levém okraji snímku z posunuté a stočené kamery;

$X_1' = d - h \cdot \tan(a+r) = -5643,477621 \text{ m}$

$X_2$  je pozemní souřadnice bodu na pravém okraji snímku z ustálené kamery;

$X_2 = h \cdot \tan(a) = 5643,477167 \text{ m}$

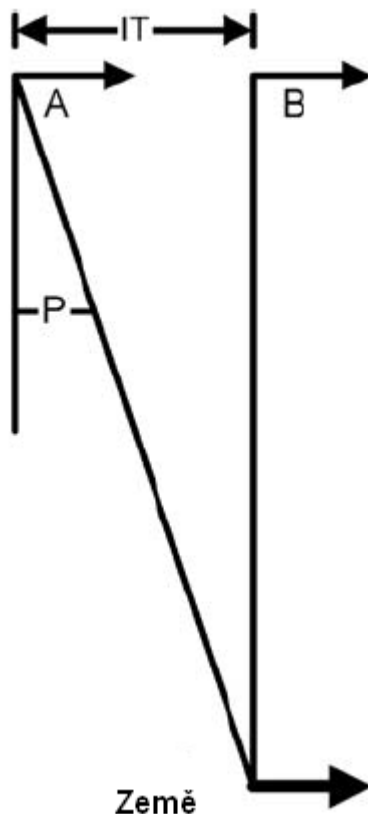
$X_2'$  je pozemní souřadnice bodu na pravém okraji snímku z posunuté a stočené kamery;

$X_2' = d + h \cdot \tan(a-r) = 5643,476713 \text{ m}$

Potom platí:  $X_1 - X_1' = X_2 - X_2' = 0,000454 \text{ m}$

Šestý obrázek demonstruje chyby způsobené změnou sklonu kamery a jejím posunutím ve směru pohybu. Na této ilustraci jsou z bočního pohledu ukázány dva senzory v různých polohách. První se nachází v bodě A s odchylkou sklonu P (z angl. „Pitch“). Druhý pak leží v bodě B s poziční odchylkou ve směru pohybu nosiče IT (z angl. „In-Track“). Šipky představují směry pohybu a snímání senzorů.

Obrázek č. 6: Vliv změny sklonu kamery a její pozice ve směru letu nosiče



Zdroj: Dial, G., Grodecki, J., 2003, 61. str.

Satelit A vykazuje mírně delší vzdálenost ohniska kamery od povrchu Země, ovšem tato odchylka je při změně sklonu dvou úhlových sekund zcela zanedbatelná, stejně tak jako ze stejné příčiny zaviněné drobné odchylky v perspektivě obrazu. Tudíž jsou obě chyby způsobené změnou sklonu kamery nerozlišitelné od chyb způsobených změnou pozice kamery ve směru jejího pohybu a tak se oba tyto efekty zahrnují pod jeden společný parametr.

Radiální chyby, čili chyby způsobené členitostí terénu, se projevují v nesouladu měřítka na snímku (výše položené body na Zemi jsou blíže ohnisku kamery a tudíž pro ně platí větší měřítko). Například radiální odchylka jeden metr při výšce skenování 680 km

způsobí chybu  $1,5 \cdot 10^{-6}$  v měřítkovém faktoru snímku. Tato vada ovšem vede k poziční odchylce pouhých 16 mm napříč 11 km širokého pásu záběru, tudíž ji můžeme považovat za bezvýznamnou.

### ***Drift (chyba časové stálosti)***

Byť jsou nedostatky způsobené změnou polohy či efemerid senzoru jakožto systematické chyby modelovatelné, existuje možnost, že se tyto chyby v průběhu času navíc mění. Takové chyby nazýváme driftem, z anglického termínu „*drift errors*.“ „Pojem drift je definován jako změna v indikaci měřicího systému, která je obvykle pomalá a postupná a která se nevztahuje ani ke změně měřené veličiny, ani ke změně jakékoli ovlivňující veličiny“ (Šafařík, A., 2005, 48. str.). V případě sondy Ikonos byly následky takovýchto chyb odhaleny jakožto velmi malé, řádově jeden až dva pixely na 100 km a tak jsou při snímání ponechány bez významu. Snad vyjma velmi dlouhých pásů území, kde k určité kompenzaci dochází (viz dále).

Jak bylo dříve uvedeno v předcházejících odstavcích věnujícím se systematickým chybám v RPCs, k efektivnímu vyrovnání racionálního funkčního modelu postačí sledovat jen několik parametrů. Pro vyrovnání chyb ve směru řádků (hodnoty  $y$ ), respektive ve směru sloupců (hodnoty  $x$ ) je třeba vzít v úvahu odchylky orbity senzoru, změny jeho polohy a dodatečně prvky jeho vnitřní orientace ve směru řádků, respektive sloupců. Pro dlouhé pásy skenovaného území mohou být navíc do vyrovnání zařazeny i chyby časové stálosti vyjádřené parametrem úměrným k proporčně se měnícím odchylkám.

V předcházejících kapitolách jsou vysvětleny principy na terénu závislého i nezávislého georeferencování snímku metodou RFM. Kromě výše zmíněných výhod racionálního modelu je dalším důvodem pro jeho volbu také fakt, že provozovatelé uvažovaných senzorů neposkytují automaticky informace o jejich vnitřní a vnější orientaci, přičemž je pak zpracovatel nucen použít na terénu závislý přístup.

Nabízí se ovšem otázka: Jak zjistíme prvky vnitřní a vnější orientace kamery, chceme-li jejich prostřednictvím dosáhnout zpřesnění georeferencovaných snímků a zároveň výrobce nám tato data neposkytne? Odpovědí je tzv. rekonstrukce fyzického sensorového modelu z parametrů RFM.

Základem tohoto procesu je výpočet parametrů kolineární transformace z její inverzní formy. Totiž díky RPCs existuje možnost stanovit síť několika kontrolních bodů



o známých pozemních i snímkových souřadnicích. Tyto body jsou různě rozmístěny ve scéně, přičemž vždy reprezentují různé řádky snímku. Snímkové souřadnice těchto bodů nesmí obsahovat žádné optické či jiné nelineární distorze. Další postup je následující; snímkové souřadnice  $(x, y)$  a pozemní souřadnice  $(X, Y, Z)$  každého kontrolního bodu jsou vloženy do následujících rovnic:

$$x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

Rovnice 10a, 10b; (Zdroj: Di, K., Ma, R., Li, R., X., 2003, 36. str.)

Výsledkem těchto výpočtů jsou tzv. koeficienty přímé lineární transformace („*Direct Linear Transformation - DLT*“), z kterých mohou být dále odvozeny prvky vnitřní a vnější orientace k příslušným několika řádkům snímku.

Vlastní vyrovnání RPCs se už pak shoduje jak pro na terénu závislé, tak i nezávislé řešení. Výpočet probíhá na úrovni snímkových souřadnic  $x, y$  (viz rovnice 7a, 7b). Dále jsou do výpočtu zavedeny vyrovnávací funkce  $\Delta s, \Delta l$ , které urovnávají nesoulady, čili rozdíly mezi souřadnicemi kontrolních bodů naměřených mezi ustálenou kamerou a kamerou posunutou plus stočenou - viz rekonstrukce fyzického modelu nahoře. Pro každý  $i$ -tý bod na  $j$ -tém snímku platí následující matematický model jejich vyrovnání:

$$x'_i{}^{(j)} = \Delta s + s^{(j)}(X_k, Y_k, Z_k) + \varepsilon_{x'}$$

$$y'_i{}^{(j)} = \Delta l + l^{(j)}(X_k, Y_k, Z_k) + \varepsilon_{y'}$$

Rovnice 11a, 11b; (Zdroj: Dial, G., Grodecki, J., 2003, 62. str.)

Platí, že  $x'_i{}^{(j)}, y'_i{}^{(j)}$  jsou změřené souřadnice sloupce, resp. řádku  $i$ -tého bodu na snímku, zatímco  $X_k, Y_k, Z_k$  jsou jemu odpovídající souřadnice  $k$ -tého kontrolního bodu v objektovém prostoru.  $\varepsilon_{x'}$  a  $\varepsilon_{y'}$  vyjadřují nahodilé chyby. Funkce  $s^{(j)}, l^{(j)}$  představují denormalizované funkce  $g, h$  souřadnic kontrolního bodu  $X_k, Y_k, Z_k$  (srovnej rovnice 3a, 3b a 7a, 7b). Následující rovnice pak reprezentují obecný předpis výpočtu vyrovnávacích funkcí.

$$\Delta s = a_0 + a_x \cdot x' + a_y \cdot y' + a_{xy} \cdot x' \cdot y' + a_x^2 \cdot x'^2 + a_y^2 \cdot y'^2 + \dots$$

$$\Delta l = b_0 + b_x \cdot x' + b_y \cdot y' + b_{xy} \cdot x' \cdot y' + b_x^2 \cdot x'^2 + b_y^2 \cdot y'^2 + \dots$$

Rovnice 12a, 12b: (Zdroj: Dial, G., Grodecki, J., 2003, 62. str.)

Kde  $a_0, a_x, a_y, \dots, b_0, b_x, b_y, \dots$  jsou parametry vyrovnání obrazu, přičemž  $x', y'$  jsou souřadnice kontrolního bodu. Výběr řádu vyrovnávacích funkcí závisí na míře přesnosti, s jakou chceme obraz korigovat. Pro vyrovnání snímků pořízených z Ikonosu doporučují autoři Grodecki a Dial použít nanejvýš následující polynomický předpis:

$$\Delta s = a_0 + a_x \cdot x + a_y \cdot y \qquad \Delta l = b_0 + b_x \cdot x + b_y \cdot y$$

Rovnice 13a, 13b: (Zdroj: Dial, G., Grodecki, J., 2003, 62. str.)

Výše zmínění autoři toto zjednodušení považují v případě diskutovaných typů kamer s úzkým zorným polem jakožto plně postačující pro vyrovnání. „Parametr  $a_0$  v sobě absorbuje všechny odchylky způsobené při snímání kolmo ke směru pohybu nosiče (ve směru osy  $x$  na snímku), včetně vzniklých efemeridních chyb a chyb z rotace (změny ve sklonu kamery). Dále také absorbuje hodnotu  $x$  souřadnice hlavního bodu a odchylku v pozici CCD detektoru taktéž ve směru osy  $x$ . Obdobně pak platí totéž pro parametr  $b_0$ , který zahrnuje uvedené odchylky ovšem ve směru pohybu nosiče, resp. osy  $y$ “ (Dial, G., Grodecki, J., 2003, 63. str.). Z několika provedených vyrovnání racionálního modelu prezentovaných dalšími autory bylo demonstrováno, že uvedené odchylky těchto fyzických parametrů nabývají v případě uvažovaných senzorů s předem silně stabilní orientací stejného efektu, totiž posunutí ve směrech osy  $x$  („*s - sample*“), nebo osy  $y$  („*l-line*“).

„Poněvadž směr pohybu nosiče je ekvivalentní s časem, parametry  $a_y, b_y$  absorbuji malé odchylky zaviněné změnou ve vlastnostech gyroskopů během skenování“ (Dial, G., Grodecki, J., 2003, 63. str.). Titíž autoři ve své práci také dokázali, že takové chyby jsou patrné až při snímcích delších než 50 km.

„Poslední uvedené parametry  $a_x, b_x$  zohledňují radiální odchylky zaviněné členitostí terénu a chyby v prvcích vnitřní orientace jako jsou ohnisková vzdálenost a optické vady. Jak bylo vysvětleno v části zabývající se efemeridními chybami, tyto odchylky jsou zcela zanedbatelné a tak ani není třeba je zahrnovat do výpočtu“ (Dial, G., Grodecki, J., 2003, 63. str.).

Zevšeobecnění předchozích rovnic tak může nadále pokračovat až k úplnému zjednodušení předpisu vyrovnávacích funkcí platných pro snímky kratší jak 50 km na výrazy:

$$\Delta s = a_0 \qquad \Delta l = b_0$$

Rovnice 14a, 14b: (Zdroj: Dial, G., Grodecki, J., 2003, 63. str.)

Další autoři tuto trivializaci vysvětlují: „Při pořizování snímku kamerou s velmi úzkým zorným polem, zachycují CCD detektory geometrickou změnu těchto bodů jako pouhý posun na snímku ve směru  $x$ ,  $y$ , čímž se zjednoduší výše uvedené rovnice“ (Croitoru, A., Hu, Y., Tao, C., V., Xu, J., Wang, F., Lenson, P., 2004, 2. str.).

Posledním krokem v korekci souřadných hodnot je zapojení vypočtených odchylek bodu  $z$   $i$ -tého snímku a k nim odpovídajícímu  $j$ -tému vlíčovacému bodu do celkového výpočtu transformačního klíče, viz rovnice 3a, 3b a 5 výše:

$$x_{ij} + \Delta s = \frac{P_{i1}(X, Y, Z)_j}{P_{i2}(X, Y, Z)_j} \qquad y_{ij} + \Delta l = \frac{P_{i3}(X, Y, Z)_j}{P_{i4}(X, Y, Z)_j}$$

resp.:

$$x_{ij} = \frac{P_{i1}^C(X, Y, Z)_j}{P_{i2}(X, Y, Z)_j} \qquad y_{ij} = \frac{P_{i3}^C(X, Y, Z)_j}{P_{i4}(X, Y, Z)_j}$$

Rovnice 15a, 15b, 15c, 15d: (Zdroj: Fraser, C., Hanley, B., H., 2003, 57. str.)

Dále platí:

$$P_{i1}^C(X, Y, Z)_j = (a_0 - b_0 \Delta s) + (a_1 - b_1 \Delta s) \cdot X + (a_2 - b_2 \Delta s) \cdot Y \\ + (a_3 - b_3 \Delta s) \cdot Z + \dots + (a_{19} - b_{19} \Delta s) \cdot Z^3$$

$$P_{i3}^C(X, Y, Z)_j = (c_0 - d_0 \Delta l) + (c_1 - d_1 \Delta l) \cdot X + (c_2 - d_2 \Delta l) \cdot Y \\ + (c_3 - d_3 \Delta l) \cdot Z + \dots + (c_{19} - d_{19} \Delta l) \cdot Z^3$$

Rovnice 16a, 16b: (Zdroj: Fraser, C., Hanley, B., H., 2003, 57. str.)

Při srovnání s rovnicí pět je jasně patrná korekce sad RPCs koeficientů, čili že koeficienty  $a_k$ , resp.  $c_k$  byly nahrazeny výrazem  $(a_k - b_k \Delta s)$ , resp.  $(c_k - d_k \Delta l)$ . Veškeré

uvedené výpočty, interakce měřeného bodu na snímku s k němu odpovídajícím bodu na povrchu, stejně tak jako generování odchylek a vylepšení RFM jsou plně zprostředkovány softwarovou aplikací, iniciace těchto kroků ovšem spočívá na straně uživatele.

Pokud byl tedy snímek úspěšně georeferencován, může zpracovatel postoupit k dalším kartografickým operacím. Snímek je možno diferenciálně překreslit (ortorektifikovat), což se provádí pomocí bodů rovnoměrně rozložených ve snímku s různými hodnotami výšek. Postup je již de facto shodný jako při práci s klasickými snímky. Celková škála elevací na snímku je pak rozdělena do několika vrstev a RPCs jsou vypočteny metodou nejmenších čtverců. Pokud jde o získávání relativních výšek budov, může být aplikována klasická stereofotogrammetrie a nebo také jednosnímková metoda, která je podrobněji vysvětlena v následující kapitole.

Samotná procedura výpočtu koeficientů RPCs po vyrovnání ovšem ještě nestačí k tomu, abychom mohli definitivně určit relativní výšku jakékoliv budovy na snímku. Toho se dosáhne až začleněním DEM odpovídajícího území v průběhu zpracování. Digitální model terénu s sebou přináší informace o nadmořských výškách (resp. informace o souřadnici  $Z$  vztaženou k určitému referenčnímu systému). Dále je nutné lokalizovat zvolený bod na snímku, např. roh střechy budovy pomocí kursoru ovládaného zpracovatelem a až teprve poté lze zjistit souřadnice tohoto bodu a tak i jeho relativní výšku, ve které se vůči DEM nachází.

Z výše uvedeného vyplývá, že na přesnost tří-dimenzionálně zpracovaného modelu objektu má zásadní vliv jednak přesnost vtěleného DEM a pak přesnost použité transformace. Nepřesnosti ve výpočtu transformace souřadnic z objektového prostoru do snímkového se dále ještě kompenzují. Nedostatky jsou způsobeny systematickými chybami produkovanými měřicími aparaturami na nosičích (akcelerometry, gyroskopy, GPS přijímače) a pro využití plného potenciálu, které snímky HRSI nabízejí, je třeba je korigovat. K vyrovnání nepřesností, které s sebou tyto systematické chyby přinášejí je nutno do systému začlenit ještě vlíčovací body o známých geografických i snímkových souřadnicích. Metodou přímé lineární transformace a inverzního výpočtu rovnic kolinearity jsou pomocí těchto souřadnic zjištěny prvky vnitřní a vnější orientace kamery během snímání. Díky získaným parametrům jsou konečně odhaleny systematické chyby senzoru na jejichž základě dochází ke korekci původních hodnot RPCs s metrovou až submetrovou přesností.

#### **4.4. Jednosnímková metoda určení výšky budov**

Získávání relativních výšek budov z dat dálkového průzkumu Země je poměrně běžnou činností v oboru kartografie. Způsobů zjišťování těchto hodnot je více, přičemž zásadním dělítkem mezi nimi je druh použitého senzoru. Tato práce se věnuje datům pořízeným ze satelitů se schopností produkovat snímky velmi vysokého rozlišení, potažmo letecké fotogrammetrii. Právě typy senzorů s velmi vysokou rozlišovací schopností totiž přinášejí nové možnosti zpracování jakými je jednosnímková metoda.

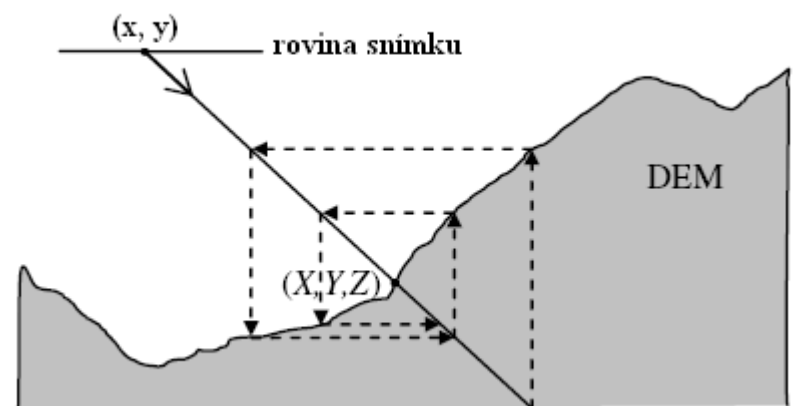
Impulsem, který odstartoval širší diskuzi a vůbec využívání tohoto principu, byla omezení spojená s náročností původních metod, co do množství potřebných dat a vloženého času, ale také finančních nákladech s nimi spojených. Byť metoda stereofotogrammetrie zůstává dosud tou přesnější alternativou, je potřeba myslet na to, že k jejímu použití je třeba pořídit minimálně jednu dvojici snímků (a v některých případech nemusí být k dispozici). Dále pak je ovšem také nutné zakoupit příslušný software na zpracování obrazu, jehož součástí často bývá hardwarový doplněk typu polarizačních či krystalových brýlí. Nakonec je ještě třeba myslet na obsluhu celého systému, čímž zpravidla může být jen školený specialista.

Řada z těchto těžkostí s jednosnímkovou metodou odpadá. Nikoliv proto, že by snad byl její princip jednodušší, ale dosud je tímto způsobem možno pracovat pouze ve dvou odlišných aplikacích, přičemž obě práci uživateli do značné míry automatizují a tím i zjednodušují. V třetí kapitole týkající se rešerše literatury jsou objasněny souvislosti vysvětlující výběr používaného software a dat, proto může rovnou následovat popis principu detekce relativních výšek z jednoho snímku, jak jej zprostředkovává program Silver Eye. Přese všechny potíže zmíněné v části rešerše, k uskutečnění a zkoumání jednosnímkové metody byl poskytnut právě tento program. Nicméně byl i učiněn pokus o získání druhého uvedeného programu - Baristy. Za tímto účelem byli také osloveni příslušní představitelé Melbournské univerzity. Ačkoliv zprvu projevíli ochotu program Baristu na půl roku zdarma zapůjčit (za podmínky čistě vědeckého použití), pokus ztroskotal na nutném doplňku aplikace, totiž hardwarovém klíči. Nicméně pro dostatečné poznání jednosnímkové metody jsem nepovažoval za nezbytně nutné použít dva programy, zvláště při vědomí, že oba pracují na stejném principu. Byť zde nebyla možnost se osobně s prostředím Baristy seznámit, dle literárních pramenů lze nabýt dojmu, že jediný zásadnější rozdíl mezi těmito programy spočívá v tom, že program Silver Eye je doplněn

o knihovnu tvarů střech budov a barev, resp. textur jejich fasád. Navíc umožňuje počítání výšek z délky stínů objektů, o čemž se v případě Baristy není možné v literatuře přesvědčit.

Pro získání prostorových souřadnic určitého bodu na snímku je třeba, aby zpracovatel pohybem kurzoru určil na snímku bod (např. roh horního okraje budovy, jejíž relativní výšku chce zjistit). Poté program dokáže vypočítat výšku nadzemního objektu. Výpočet probíhá tak, že program zjistí bod, který je dán průsečíkem přímky spojující ohnisko kamery a daný bod na snímku (určil zpracovatel) s výškovou bází implementovaného DEM „ležícího pod“ snímkem. Tento výpočet se ovšem zakládá na předpokladu, že se jedná o budovu s kolmými stěnami. Tím je garantováno, že pro každý horní roh budovy existuje jemu odpovídající rohový bod při její základně, jež se od sebe liší jen rozdílnou hodnotou souřadnice Z. Princip tohoto výpočtu odhaluje následující obrázek č. 7.

Obrázek č. 7: Iterace 3D informace bodu s pomocí jednoho snímku a DEM

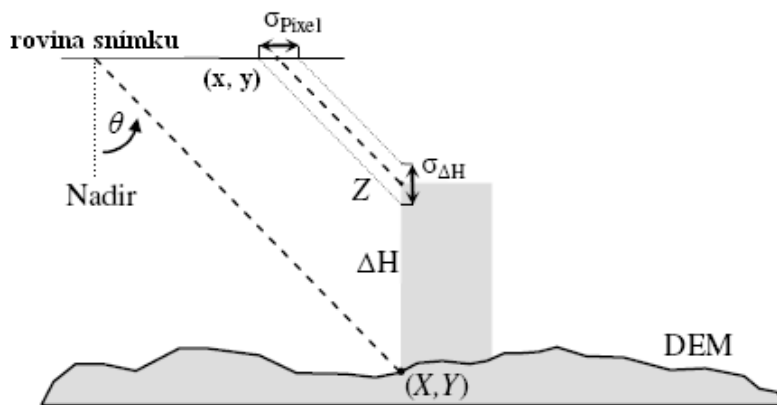


Zdroj: Willneff, J., Poon, J., Fraser, C., 2004, 2. str.

Jak bylo uvedeno výše, určení výšky budovy předpokládá, že k určitému horním rohu budovy je možné bezpečně přiřadit bod - roh při její patě s nímž má společnou hranu. Takový dolní bod leží de facto na úrovni terénu, čili jeho relativní výška se rovná nule. Jsou-li tedy nalezeny ostatní prostorové souřadnice bodu u paty budovy  $X, Y$  (z DEM) a zpracovatel k tomuto bodu kurzorem přiřadí odpovídající bod na střeše (ve snímku  $x, y$ ), systém automaticky vypočte relativní výšku budovy (viz obrázek č. 8 a rovnice č. 17 níže). Tento krok lze provádět i opačně, tj. určením bodu při vrcholu budovy a spuštěním

kolmice směrem k patě. Při vektorizaci budov s jinou než rovnou střechou je tento postup dokonce výhodnější, protože stačí určit rozměry a tvar střechy a do téhož polygonu zahrnout i tělo budovy.

Obrázek č. 8: Princip výpočtu rozdílu výšek ( $\Delta H$ )



Zdroj: Willneff, J., Poon, J., Fraser, C., 2004, 3. str.

Nechť je transformace souřadnic z objektového prostoru do prostoru snímku formulována v obecném předpisu jako  $(x, y) = F(X, Y, Z)$ , kde  $F$  popisuje použitý sensorový model. Ať už by se jednalo o fyzický, afinní či jako v našem případě racionální polynomický sensorový model, transformační klíč je popsán ve dvou oddělených funkcích  $F_1$  a  $F_2$ , jež vedou k následujícímu výpočtu a odvození hodnoty relativní výšky.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Z} \\ \frac{\partial F_2}{\partial Z} \end{pmatrix} \delta Z + \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X} & \frac{\partial F_1}{\partial Y} & \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} \\ \frac{\partial F_2}{\partial X} & \frac{\partial F_2}{\partial Y} & \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = 0$$

Rovnice č. 17: (Zdroj: Willneff, J., Poon, J., Fraser, C., 2004, 3. str.)

Takto získané informace o nadzemních objektech jsou nadále zpřístupněny k dalšímu zpracování, například pro integraci s jiným systémem GIS a produkci mapových děl s vyšší přidanou hodnotou. 3D model budovy je utvořen sítí spojených linií (hran budov) a jako takový je reprojekován do prostoru snímku. Takový model budovy může obsahovat libovolné množství bodů. Vektorová data se zpracovanými modely lze pak uložit, skladovat a třeba v systémech GIS či na internetu prezentovat v různých formách. Jednou z nejvhodnějších cest k uskutečnění tohoto kroku je export dat ve formátu VRML.

Z předchozích odstavců je zřejmé, že celý proces jednosnímkového zpracování snímku vyžaduje, aby scéna zobrazovala budovy šikmo a nikoliv přímo kolmo (tzv. „*off-nadir angle*“, na obr. č. 8 symbol  $\theta$ ). Shrňme-li všechny podmínky kladené na snímek, je třeba aby:

- a) byl k dispozici minimálně jeden viditelný bod u paty budovy,
- b) k tomuto bodu musí být též k dispozici jemu odpovídající bod na vrcholu budovy se známými snímkovými souřadnicemi  $x$ ,  $y$ ,
- c) předpokládá se, že horní hrany budovy (rohové body střechy) leží ve stejné výšce. Systém ovšem počítá i s budovami, jejichž střecha je členěna v několika výškových úrovních,
- d) ke každému bodu střechy lze najít odpovídající bod při základně objektu, který je automaticky odvozen průsečíkem s DEM.

Na konečnou přesnost získaných relativních výšek mají vliv především přesnost DEM, přesnost prvků vnitřní a vnější orientace kamery, resp. blokově vyrovnaný sensorový model. V další krocích se na přesnosti podílí také samotný zpracovatel mírou přesnosti, s jakou prováděl snímková měření a v neposlední řadě svoji roli hraje také úhel, z jakého jsou objekty nasnímány, rozlišení obrazu a možné překrytí jinými prvky ve scéně.

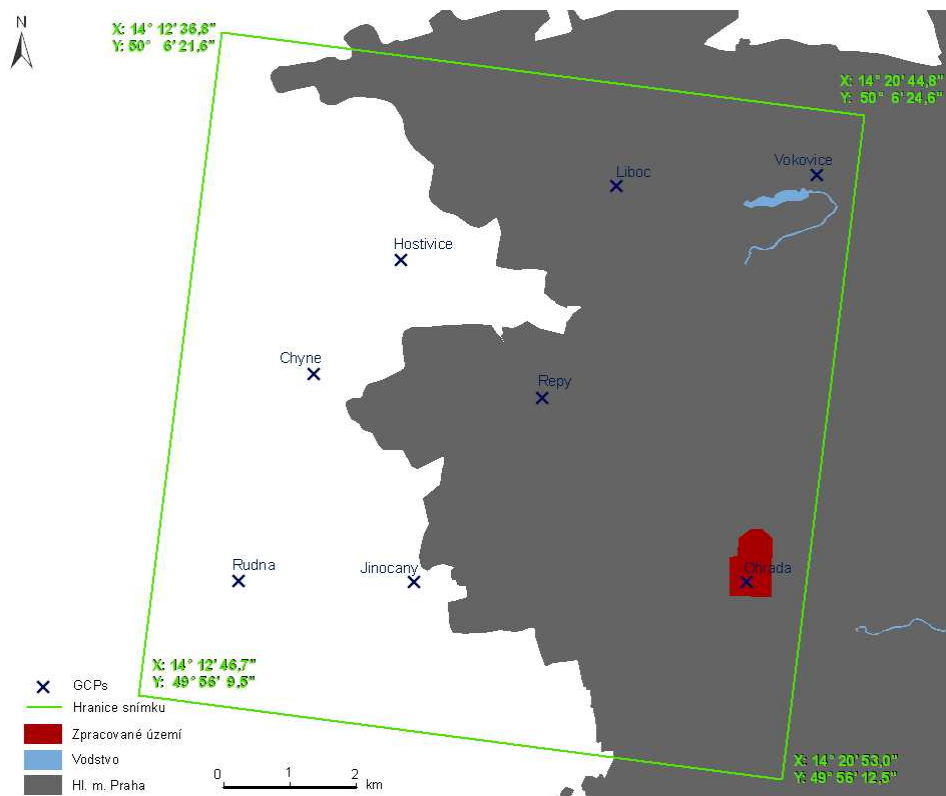


## 5. DATA A VÝSLEDKY JEJICH ZPRACOVÁNÍ

K otestování jednosnímkové metody v praxi byl zpracováván panchromatický snímek pořízený satelitem QuickBird. Snímek zachycuje západní část hlavního města Prahy (viz obrázek č. 9 níže). Hodnoty na obrázku u každého rohu hranice snímku ukazují souřadnice daného bodu. Pro vytvoření trojrozměrných modelů budov byly zvoleny dvě typově odlišné oblasti v pražské části Praha - Stodůlky. Ačkoliv tyto vybrané oblasti spolu sousedí, zásadním charakteristickým dělítkem je druh zástavby, která se na nich nachází.

Pro důslednější ověření metody bylo třeba jednak najít geometricky jednoduchou a pokud možno vertikálně směřovanou architekturu. Pro tento typ bylo vybráno panelové sídliště Velké Ohrada, které má navíc tu výhodu, že na jeho území se i nachází šestý vlíčovací bod pojmenovaný „Ohrada.“ Druhá oblast pracovně nazvaná Malá Ohrada leží hned za silnicí severně od první oblasti. Svým charakterem reprezentuje individuální zástavbu nízkých rodinných domů s různými typy střech. V bezprostřední blízkosti domů se navíc často vyskytuje vzrostlá zeleň a obecně se z geometrického hlediska jedná o komplikovanější objekty, tudíž jejich vektorizace je také obtížnější.

Obrázek č. 9: Schématická mapa snímaného území, lokace zvolené oblasti a GCPs



Zdroj: vlastní

### 5.1. Zpracovávaný satelitní snímek

Pořízení celé obrazové scény snímku sestávající se z 14336 řádků a 13852 sloupců bylo uskutečněno 20. července 2007 v dopoledních hodinách. Odchylna osy od svislice čili již dříve zmiňovaný tzv. „*off-nadir angle*“ činil  $23,4^\circ$ . Průměrný azimut satelitu činil přibližně  $189^\circ$ , tedy zemský povrch je nasnímán z jižního pohledu<sup>2</sup>. Provozovatel sondy QuickBird společnost Digital Globe poskytla snímek vztažený ke globálnímu souřadnému systému WGS-84 v zobrazení UTM. Součástí snímku jsou doprovodné soubory nesoucí informace o hodnotách všech parametrů potřebných k odvození racionálního funkčního modelu. Z těchto souborů je patrné, že normalizace souřadnic, jak ji popisují rovnice 4a, 4b a 4c, byla provedena s tzv. „*offset values*“  $X_o = 14,2791$ ,  $Y_o = 50,0214$  a  $Z_o = 394$  pro přibližný střed snímku a měřítkovými hodnotami  $X_s = 0,0690$ ,  $Y_s = 0,0855$  a  $Z_s = 501$ . Takto normalizované souřadnice byly zařazeny do výpočtu RFM spolu s 80 racionálními polynomickými koeficienty, jež jsou rovněž obsahem přílohy. Závěrečný přechod na původní souřadnice (viz rovnice 7a, 7b) se uskutečnil s hodnotami  $x_o = 6933$  a  $y_o = 13509$  přibližného středu snímku a příslušných měřítkových hodnot  $x_s = 6989$  a  $y_s = 13839$ . S těmito hodnotami tedy došlo k odvození racionálního funkčního modelu metodou na terénu nezávislého přístupu a slícování snímkového prostoru s objektovým.

Další podstatné informace z průběhu snímání scény jsou data o postavení a rotaci satelitu. Průměrný úhel kamery ve směru snímání („*in-track angle*“) činil  $-23,4^\circ$  zatímco její úhel kolmo na tento směr („*cross-track angle*“) byl  $0,9^\circ$ . Tyto hodnoty jsou v programu automaticky zařazeny do korekce systematických chyb senzoru, dodá-li zpracovatel informace o vlíčovacích bodech.

### 5.2. Digitální model terénu

Digitální model terénu použitý v této práci byl získán transformací vrstevnic ze ZABAGEDu. Pro zvolené zájmové území byly opatřeny výškopisné vrstvy vrstevnic s intervalem 10 metrů ve formátu \*.dgn z listů 12-23-25, 12-24-21, 12-41-05 a 12-42-01 dle kladu základní mapy 1:10 000. V programu ArcGIS 9.2 byly tyto vrstvy nejdříve spojeny v jednu ve formátu \*.shp, ta byla následně konvertována do Merkatorova příčného válcového zobrazení a nakonec převedena do rastrové podoby ve formátu \*.tif. Takto

---

<sup>2</sup> V příloze č. 1 jsou uvedena metadata, racionální koeficienty, parametry projekce a ostatní atributy, které producent spolu se snímek poskytl.

vytvořený digitální model terénu byl vložen do započatého projektu (viz soubor *demUTM.tif* v digitální příloze).

### 5.3. Program Silver Eye

Počet aplikací, které jsou použitelné k otestování jednosnímkové metody získávání relativních výšek budov a popřípadě dalších nadzemních objektů, se doposud rovná pouhým dvěma. Ke zpracování této magisterské práce byl použit program nazvaný Silver Eye vyvinutý kanadskou společností GeoTango na počátku tohoto století a který již není dále v distribuci, z důvodu obchodní politiky firmy Microsoft, která v roce 2005 koupila podnik GeoTango včetně autorských práv na tento produkt.

Pro uživatele, kteří už mají zkušenost s aplikacemi na zpracování dat dálkového průzkumu Země, nebude uživatelské rozhraní nijak zvlášť cizí, program navíc dává relativně volné ruce v jeho nastavení. Zpracovatel může pracovat v mono nebo stereo režimu, přičemž do pracovního okna je možné vložit řadu rastrových formátů, jmenovitě NITF, TIFF, GeoTIFF, GIF, IMG, JPG a BMP. Dále aplikace podporuje standardní formáty digitálního modelu terénu (\*.dem, \*.tif a \*.txt) a soubory s racionálními koeficienty Ikonosu (\*.rpc) a QuickBirdu (\*.rpb). Je umožněna vzájemná konverze rastrových formátů, volba mezi více než 1100 souřadnými systémy, elipsoidy a vztažnými výškovými systémy. Snímky lze ortorektifikaci a skládat je do mozaiky. Pro práci s obrazem se uživateli nabízí možnost modifikace histogramu a filtrace (*Gaussian*, *Laplacian*, *Edge*, *High Pass* a *Low Pass*).

Postup práce s touto aplikací spočívá v editaci vektorových vrstev bodů, linií, oblouků a polygonů na základě podkladové rastrové vrstvy. Takto vytvořené vektory jsou ukládány ve formátu \*.shp v pracovním adresáři. Dále má zpracovatel možnost vkládat do scény text, ale také anotace ve formě například kótovaných linií označujících například výsledky určitého měření. Posledním stavebním kamenem práce je založení projektu s příponou \*.rpj, který v sobě nese informace o cestách k vytvořeným souborům, importovaných datech, použitém souřadnicovém systému a také nastavení vlastního uživatelského rozhraní.

Dalšími součástmi programu Silver Eye je GCP Manager a prohlížeč Silver Eye Viewer. GCP Manager je nástroj pro vytvoření souboru s příponou \*.gcp, který je nezbytnou součástí při procesu vyrovnání RFM. V tomto souboru jsou v náležité struktuře

zaevidovány souřadnice vložených vlíčovacích bodů, informace o jejich souřadnicovém systému a použité projekci.

Silver Eye Viewer je nástrojem pro 3D vizualizaci a prohlížení vytvořených vektorů. Prohlížeč nabízí možnost rotace, přiblížení či oddálení a změny úhlu pohledu modelu vytvořených objektů. Prostřednictvím tohoto nástroje jsou objektům přiřazeny textury fasád na základě podkladové rastrové vrstvy nebo se nabízí zpracovateli vlastní manuální dosazení textur jednotlivým plochám. Silver Eye Viewer ukládá 3D model jednak do vlastního formátu s příponou \*.sev nebo do formátu \*.x, který je kompatibilní také s jinými prohlížeči.

Aplikace pracuje v prostředí operačního systému Windows NT 4.0, 2000 a XP, požaduje minimální operační paměť 128 MB RAM a alespoň 700 MB volného místa na disku.

#### **5.4. Sběr vlíčovacích bodů**

Pro zpřesnění racionálního funkčního modelu je zapotřebí do celého procesu georeference zahrnout ještě body, o nichž máme přesnou informaci o jejich pozici v daném souřadnicovém systému. Byť autoři programu Silver Eye oznamují, že k vyrovnání RFM postačuje dodat pouze jeden takový bod, obecně se doporučuje jich dodat několik, pokud možno rovnoměrně rozložených. Z tohoto důvodu bylo ve scéně zvoleno osm zřetelně rozpoznatelných bodů<sup>3</sup>. K změření pozice zvolených vlíčovacích bodů posloužil integrovaný GPS systém Topcon. Toto zařízení se sestává z GPS přijímače HiPer, jenž je tvořen integrací GPS antény, desky GPS přijímače, komunikační desky, baterie a stativu, na který se upevňují.

Přístrojem naměřené souřadnice jsou vyhodnoceny a zpřesněny na základě údajů získaných z CZEPOSu čili České sítě permanentních stanic pro určování polohy, spravované a provozované Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním. CZEPOS poskytuje uživatelům GPS korekční data pro přesné určení pozice na území České republiky, v tomto případě hlavního města Prahy.

Tento princip získávání pozemních souřadnic spočívá v tom, že po stabilizaci GPS stanice na příslušném místě je přijímačem antény po dobu několika minut opakovaně detekován signál v krátkých časových intervalech. Z takto nasbíraného souboru souřadnic obdrží zpracovatel od CZEPOSu střední hodnotu, s níž poté pracuje. Dále obdrží také

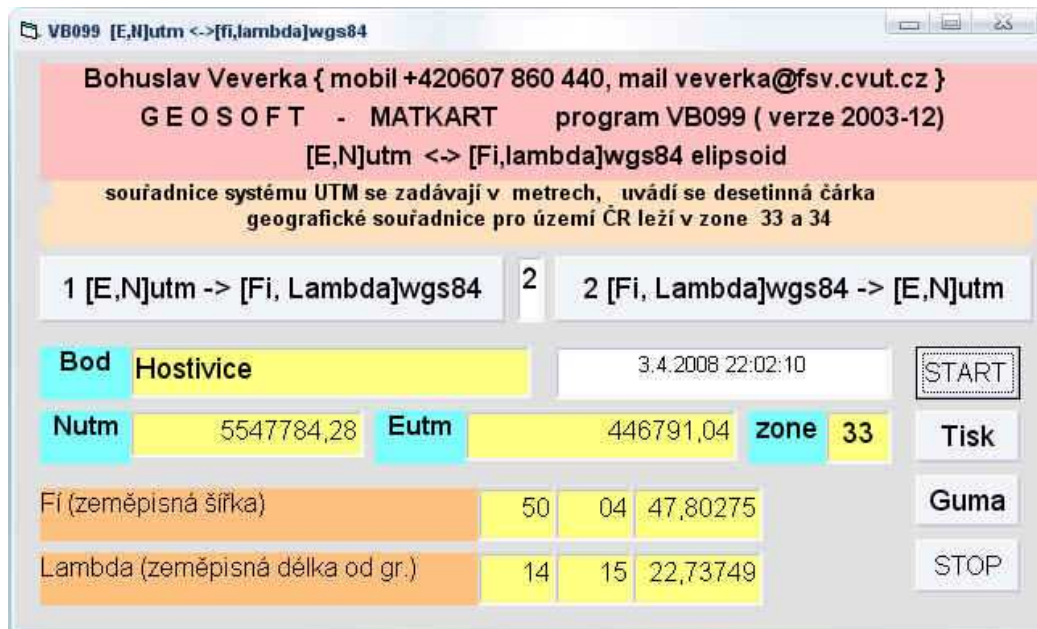
---

<sup>3</sup> Podrobná dokumentace o každém stanovišti a měření je součástí přílohy č. 2.

střední odchylku, s jakou je daný bod určen. Z původního souboru deseti zvolených bodů bylo nevyhnutelné dva vynechat, protože jejich střední chyba byla větší než jeden metr. Taková odchylka byla způsobena nižším počtem detekovaných družic GPS při záznamu. Zbývajících osm bodů bylo určeno s přesností maximálně několika centimetrů.

Zmíněný přístroj a CZEPOS ovšem poskytují geografické souřadnice v systému WGS-84, zatímco zpracováváný snímek je navíc projektován do Merkatorova transverzálního zobrazení. Z tohoto důvodu bylo nutné souřadnice všech bodů s pomocí nástroje pro konverzi souřadnic Matkart ještě přepočítat pro zobrazení UTM (viz obrázek č. 10 níže).

Obrázek č. 10: Převod souřadnic v prostředí programu Matkart



Zdroj: vlastní

### 5.5. Zpřesnění RFM

Jak bylo popsáno v kapitole věnující se metodice, zpřesnění racionálního modelu se provádí nad sadou vlíčovacích bodů jasně identifikovatelných ve scéně o známých souřadnicích. Toto vyrovnání kompenzuje chyby způsobené vychýlením senzoru z nominální pozice, distorze objektivu a podobně. Ve výsledku se projevuje pouze posunutím ve směru os  $x$ ,  $y$  a není tak třeba do výpočtu zahrnovat hodnotu souřadnice  $Z$ .

Pro úspěšné zařazení sebraných GCPs do vyrovnání (již převedených do UTM) je nejprve nutné skrze už dříve uvedenou součást GCP Manager vytvořit ASCII soubor \*.gcp, který v sobě nese informaci o všech vlíčovacích bodech v požadované struktuře

s dodatečnými informacemi o typu zobrazení. Tento soubor je poté třeba vložit do zpracovávaného projektu a je možné postoupit k identifikaci každého vlíčovacího bodu. Na jedenáctém obrázku dále je příklad pátého vlíčovacího bodu v obci Chýně umístěného ve středu betonového soklu, jež je na snímku rozpoznatelný jakožto shluk tří až čtyř světlých pixelů obklopených tmavými, které značí okolní travnatý porost.

Průběh identifikace GCPs je takový: v jednom z přepínatelných panelů programu je seznam vložených vlíčovacích bodů, jejichž přesnou polohu na snímku chce zpracovatel určit. Po aktivaci vybraného bodu program Silver Eye automaticky přesune obrazovou scénu do okolí tohoto bodu, přičemž zobrazí kružnici, na jejímž území očekává správnou polohu bodu. Správné umístění tzv. registraci bodu provede zpracovatel poklepáním na

Obrázek č. 11: Vlíčovací bod Chýně

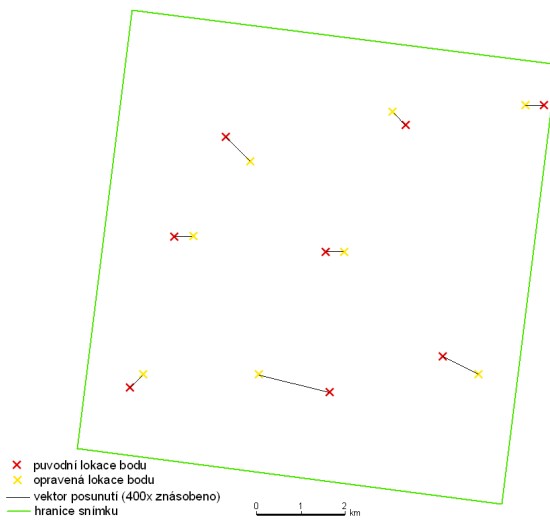


místo, které je jeho správnou lokací (žlutý křížek na obrázcích 11 a 12). Program následně vypočte velikost posunutí  $v_x$  ve směru osy  $x$  a  $v_y$  ve směru osy  $y$  udávanou v metrech od místa, které před registrací příslušného vlíčovacího bodu neslo jeho souřadnice (červený křížek na obrázcích č. 11 a 12).

Zdroj: vlastní

Na sousedním obrázku číslo 13 je demonstrována velikost a směr celkového posunutí mezi vektory (zelené linie) s již opravenými souřadnicemi a mezi příslušnými budovami na původním neopraveném snímku. Průměrná velikost posunu po opravení georeference činila 5,6 metrů, ve směru osy  $x$  tato hodnota dosáhla 4,88 m a ve směru osy  $y$  pak -2,53 m. Ve všech osmi případech vložených vlíčovacích bodů dosáhla přesnost identifikace submetrových velikostí a tudíž ji lze hodnotit jako zdařilou. Tuto skutečnost také potvrzují hodnoty horizontálních odchylek od referenčních souřadnic (viz kapitola diskuze).

Obrázek č. 12: Vektory posunutí po zpřesnění RFM



Obrázek č. 13: Detail posunutí



Zdroj: vlastní

Na ilustraci výše jsou demonstrovány vektory posunutí GCPs od původních lokací se čtyřsetnásobným zvětšením. Střední kvadratická chyba posunutí ve směru osy  $x$  činí 0,19 m a ve směru osy  $y$  0,10 m. Systém Silver Eye vypočetl celkové zbytkové chyby (tzv. „*R.M.S. residuals*“) pro posunutí ve směru osy  $x$   $m_x = 0,20$  m a osy  $y$   $m_y = 0,08$  m, které taktéž vypovídají o relativně úspěšně provedeném vyrovnání.

## 5.6. Modelování a vizualizace zástavby

Vytváření prostorového modelu zástavby v prostředí programu Silver Eye se zakládá na editaci vrstvy polygonů s pomocí nástrojů určených k vektorizaci. Tyto polygony, stejně jako ostatní vrstvy editované mapy - linie, body a text - jsou ukládány ve formátu ESRI shapefile do vybraného adresáře. V tomto formátu také mohou být vloženy do jiných aplikací jako například ArcGIS, kde se zobrazí vztahené k souřadnicovému systému a přístupné dalšímu zpracování. Nicméně v této podobě v sobě nenesou informaci o své výšce a zobrazují se pouze jako půdorysy budov. Jiným příkazem pro export výšek namodelovaných objektů je možnost exportovat jiný soubor shapefile polygonů s informací o jejich výšce, nicméně tato hodnota informuje pouze o výšce těla budovy bez výšky střechy nad ním.

Výška at' už budovy, sloupu vysokého napětí nebo jiného objektu může být změřena a zaznamenána na snímku pomocí několika nástrojů pro editaci mapové vrstvy. Ty pak v takové vrstvě figurují jako anotace, tzn. text, body, linie apod. Ovšem evidence

výšek objektů se vždy provádí současně s jejich vektorizací, kdy jsou tyto hodnoty zaznamenávány do atributové tabulky vrstvy polygonů. Pokud cílem práce v programu Silver Eye již není samotná vizualizace 3D modelu objektů, ale pouze export prostorových hodnot, zpracovatel se neobejde bez náročnějšího kroku vektorizace.

Jak bylo již uvedeno v úvodu této kapitoly, došlo k vytvoření prostorových modelů dvou oblastí nazvaných Velká Ohrada a Malá Ohrada, které se od sebe liší typem zástavby a její hustotou. Obě oblasti leží hned u sebe, na spíše rovinatém terénu a šestý vlíčovací bod je součástí této oblasti. Z hlediska jednosnímkové metody získávání výšek budov reprezentují téměř ideální objekty s kolmými hranami, patami stěn a vrcholy střech ve stejné rovině. Problémy a nesrovnalosti při vektorizaci objektů a jejich vizualizaci jsou tedy zaviněny spíše nedostatečným rozlišením obrazu, zastíněním objektu nebo jeho zakrytím jinou budovou popřípadě vegetací.

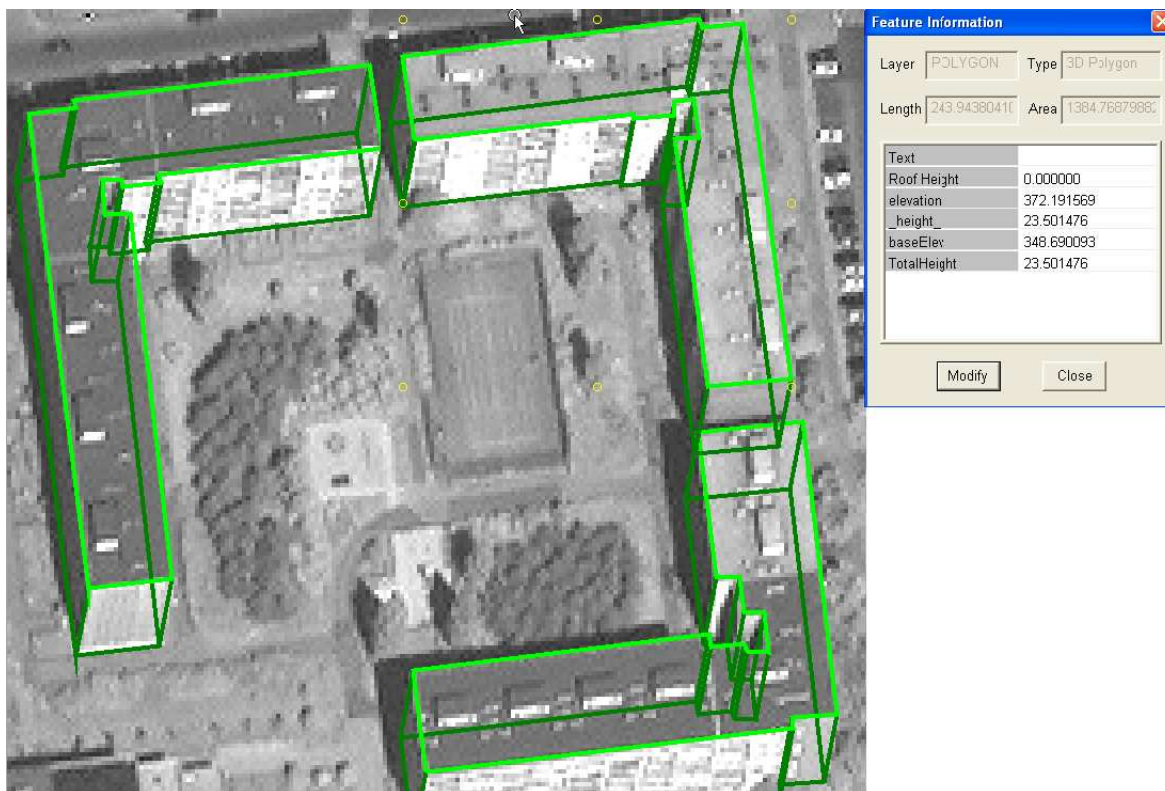
### ***oblast Velká Ohrada***

První zájmová oblast, jak již její název napovídá, představuje sídliště Velká Ohrada v městské části Prahy - Stodůlky. Modelované objekty na tomto území reprezentují typickou panelovou zástavbu z konce 80. let minulého století rozmístěnou do pravidelných útvarů. Nejvyšší budovy mají jedenáct pater, nejnižších vertikálních hodnot pak dosahují přilehlé doplňující budovy pro občanskou vybavenost. Oblast je řídce pokryta vyšší vegetací, která zakrývá hrany objektů. Dominující obytné budovy se vzájemně příliš nepřekrývají ani nezastiňují.

Při detekování hran jednotlivých objektů a jejich vektorizaci (viz obrázek č. 14) nastal největší problém v přesném odlišení paty budov od terénu. To je způsobeno tím, že v určitých místech po obvodu objektu je na zemi položen totožný materiál, z jakého jsou utvořeny tyto budovy. Tento materiál se pak projevuje shodným stupněm šedi a texturou. Hranici mezi objektem a terénem je pak obtížné přesně určit.



Obrázek č. 14: Typické objekty v oblasti Velká Ohrada



Zdroj: vlastní

Jak je možné si povšimnout na předchozím obrázku v tabulce vedle jsou prezentovány informace o vybraném objektu (na tomto příkladě pravý horní dům), jak je podává program Silver Eye. Na čtvrtém řádku lze přečíst naměřenou výšku objektu v metrech, jakožto rozdíl nadmořských výšek paty budovy (pátý řádek) a horní hrany budovy (třetí řádek). Na posledním řádku tabulky je pak zaznamenána celková výška budovy včetně její střešy. V případě panelových domů horní hrana objektů definuje i její celkovou výšku, ačkoliv na střeše jsou ještě další elevace. Totiž objekty výtahových šachet majících výšku přibližně tři a půl metru. Použitá aplikace sice podporuje dvou-etážové střešy, nicméně takový horní přístavek musí splňovat jisté podmínky. Jeho půdorys musí jednak tvarem (počet vrcholů a vnitřní úhly) odpovídat střeše, na které stojí a za druhé na jednu střešu může připadat vždy pouze jeden. V případě panelových domů je takovýto přístavek na jedné střeše vždy několik, tvar jejich půdorysu je odlišný a tak není možno je namodelovat jako součást těchto objektů (stejných polygonů).

Finálním výstupem zpracování vybrané oblasti v této práci je prostorový model zástavby. Ten se získá spuštěním doplňkové aplikace, již dříve zmíněného prohlížeče Silver Eye Viewer. Před jejím otevřením je zpracovatel dotázán, zdá má program automaticky vytvořit textury fasád a přiřadit je jednotlivým stěnám objektů modelu dle

textury plochy, jakou zabírají na snímku. Takto vytvořený model je prezentován na následujícím obrázku č. 15.

Obrázek č. 15: 3D model Velké Ohrady s automaticky vytvořenými fasádami



Zdroj: vlastní

Výhodou modelu s automaticky vytvořenými texturami je, že působí značně realisticky, poněvadž zachovává tmavší zastíněné a světlé osluněné plochy. Dále také, že zpracovateli urychlí práci a nevyžaduje zvláštní knihovnu obrázků textur a jejich manuální přiřazování jednotlivým fasádám ploch. Nicméně vizuální kvalita takového modelu je odkázána na vlastnosti původního panchromatického snímku, tj. zůstává vždy ve stupních šedi a původním rozlišení. Jelikož v prohlížeči může zpracovatel otáčet s modelem kolem středu a měnit úhel pohledu, odvrácené strany objektů na snímku se při vizualizaci zobrazí bez textur jako tmavé plochy. Pro tento případ se hodí využít nástroj pro vlastní definování textur a použít vhodnou fasádu k danému objektu.

### ***oblast Malá Ohrada***

Druhá zvolená oblast byla z hlediska vektorizace objektů budov podstatně náročnější. Na tomto území se zástavba sestává z rodinných domů o jednom až dvou patrech plus střecha, s různými přístavky jako jsou garáže a terasy. V těsné blízkosti objektů se často vyskytuje vyšší vegetace, která brání v jasném detekování hran a pat budov (viz obrázek č. 16).

Obrázek č. 16: Oblast Malá Ohrada s individuální výstavbou



Zdroj: vlastní

Kromě faktu, že stromy mohou zakrývat části budovy, v některých případech vykazuje odstín pixelů koruny stromu velmi blízký stupeň šedi jako sousední střecha. Díky větším parcelám náležícím k jednotlivým objektům v tomto případě nedochází často k vzájemnému zákrytu jednotlivých domů. Terén při jejich patách je zpravidla travnatý, popřípadě se jedná o komunikaci, tudíž je-li pohled na objekt nezakrytý, poměrně snadno lze rozlišit hranici, kde končí budova a začíná terén.

Mezi hlavní obtíže, které nastaly při detekci hran objektů a odečítání jejich výšek, bylo nedostatečné rozlišení snímku. Totiž odpovídá-li jeden obrazový bod scény přibližně

sedmdesáti centimetrům ve skutečnosti, pak hrana rodinného domu o dvou nadzemních podlažích je na snímku zřetelná pouze jako linie několika pixelů.

Dalším problémem při vektorizaci tohoto typu zástavby je nejasná detekce vrcholu těla objektu. Ten totiž bývá často zakryt střechou budovy, která přesahuje půdorys obvodových stěn. Horní hranici objektu mezi jeho střechou a tělem je sice mnohdy možné odhalit pomocí textury a odstínu stěn, potom ale vždy neodpovídá vektorizovaná střecha skutečnosti.

Detekování výšek střech objektů, jejich vektorizace a následná vizualizace je v aplikaci Silver Eye vyřešena prostřednictvím nástrojů knihovny tvarů střech. V té je obsaženo kromě střechy rovné dalších šest různých tvarů. Jejich použití spočívá v určení jejich dolních okrajů, v místě kde se střecha dotýká těla budovy. Jistým nedostatkem je, že kromě střechy rovné a kopulovité je nutné, aby půdorys ostatních typů byl pravidelným čtyřúhelníkem. Navíc stejně jako při určování výšky těla budovy, také vektorizace střechy vychází z předpokladu, že všechny body při její základně leží ve stejné nadmořské výšce. Tímto je vyloučeno zpracování pultového typu střechy, který si lze představit jako nakloněnou rovinu.

Z vyznačeného půdorysu střechy jsou pak ve vertikálním směru vykresleny vektory ve tvaru zvolené střechy s přednastavenou výškou a sklonem. Zpracovatel poté tyto délky a sklony vektorů střechy upraví podle jejich hran viditelných na snímku. Tím je ukončen záznam o výšce střechy a celkově tak celé budovy.

#### *a) sedlová střecha*

Nejčastějším typem střechy, se kterým se lze na snímku setkat, hned po rovné je tak zvaný typ sedlový. Z celé palety dostupných tvarů střech je tato zřejmě nejnadhěji modelovatelná se snadno rozpoznatelnými hranami. Nevezmou-li se v úvahu doplňky střechy jako vikýře, komíny, vystupující okna a podobně, o které stejně není možno přednastavený tvar doplnit, jediným úskalím, které se při jejím detekování objevuje, je kombinace s další střechou. Takovým příkladem jsou objekty s půdorysem ve tvaru **L**, **T** a podobně. V takovém případě zpracovatel zvlášť zvektorizuje každou část objektu, ovšem výsledné napojení jednotlivých částí střech není zcela přesné a při vizualizaci se vyskytují jisté nespojitosti modelu. Na obrázcích níže je demonstrována vektorizace sedlového typu střechy a ukázka vizualizace takových budov ve tvaru **L** s manuálně zpracovanými texturami střech a fasád.

Obrázek č. 17: Objekty se sedlovou střechou:

a) nesrovnaný tvar,

b) srovnaný tvar,

c) vizualizace



Zdroj: vlastní

### b) mansardová střecha

Dalším z typů střech, které jsou v nabídce knihovny programu Silver Eye, je mansardový typ. Standardní tvar tohoto typu střechy si lze představit jako komolý jehlan (se čtvercovou či obdélníkovou základnou) a zpravidla se vyskytuje velmi vzácně a spíše na historických budovách. Tímto předdefinovaným typem střechy lze ovšem vektorizovat mnohem častěji se vyskytující tvar - střechu valbovou. Dosažení věrného tvaru se dosáhne úplným zúžením horizontální roviny na vrcholu do pouhé úsečky, jak je prezentováno na ilustracích obrázku číslo 18.

Obrázek č. 18: Dům s valbovou střechou:

a) nesrovnaný tvar,

b) srovnaný tvar,

c) vizualizace



Zdroj: vlastní

Problémem, který nastává při zpracování takového tvaru, je, že vektorizace je velmi citlivá na vedení půdorysných linií v pravých úhlech. Pokud nepřesnost překročí určitou mez, pak vektory definující skloněné hrany střechy nezaujmou pravidelný tvar a nebudou zcela odpovídat skutečné předloze.

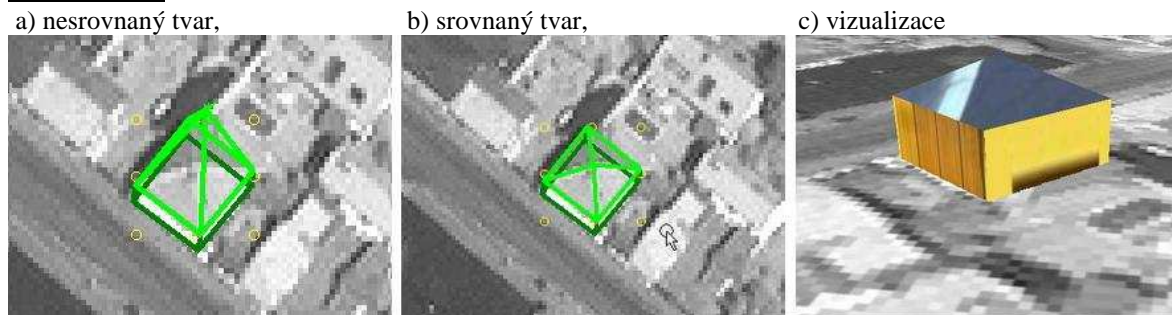
### c) stanová střecha

Jak již název tohoto typu napovídá, stanová střecha je z geometrického hlediska jednoduché těleso ve tvaru pyramidy (se čtvercovou či obdélníkovou základnou) posazené

na tělu budovy. V případě, že se jedná čistě o stanový tvar, vektorizace je snadná a na snímku jsou obrysy takové střechy lehce rozpoznatelné (viz obrázek č. 19).

V mnoha případech je ovšem tento typ střechy doplněn o vikýře, část střechy bývá „vykrojena“ terasou nebo již od základu je budova obohacena o přístavky, které deformují jinak pravidelný pyramidový tvar. Zpracovatel poté musí volit kompromis, posadí na tělo objektu stanovou střechu, která svým tvarem sice neodpovídá přesně realitě, nicméně její výška s danou přesností již ano.

Obrázek č. 19: Dům se stanovou střechou:

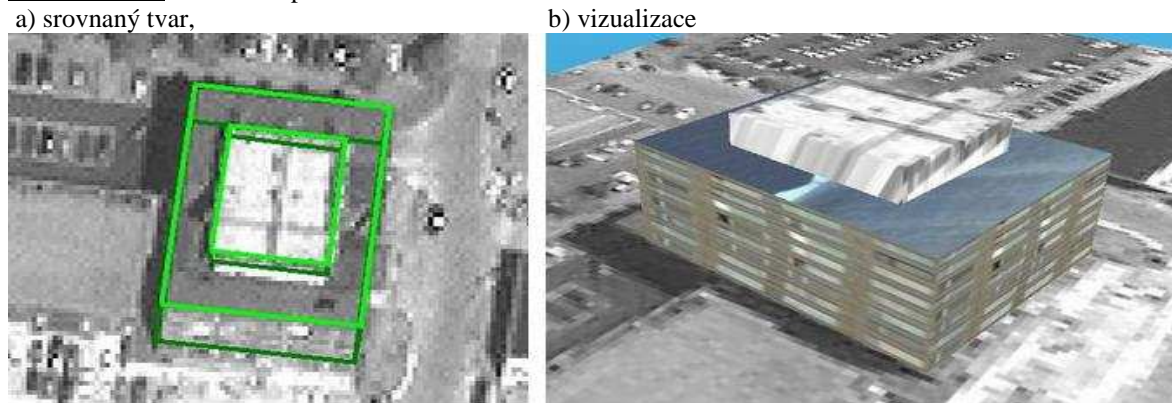


Zdroj: vlastní

d) *stupňovitá střecha*

Dvou-etážový typ střech byl již zmíněn v části týkající se panelové výstavby v předchozí oblasti Velká Ohrada. V tomto případě nemohlo dojít k vektorizaci výtahových šachet, protože aplikace umožňuje u každého objektu znázornit maximálně jeden střešní přístavek. Stěny takového přístavku mohou být pouze kolmé a počet vrcholů jeho půdorysu musí být navíc shodný s počtem vrcholů půdorysu objektu. Aplikace navíc neumožňuje vektorizovat více než dvou stupňové střechy. Ideální typ takové budovy je prezentován na následujícím obrázku číslo 20.

Obrázek č. 20: Dům se stupňovitou střechou:

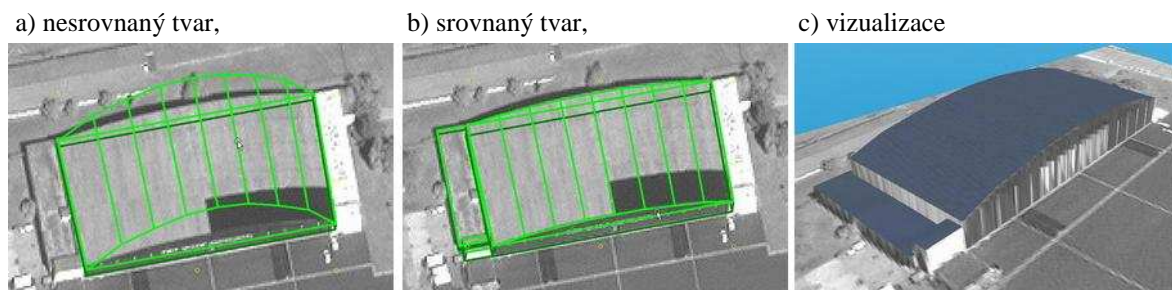


Zdroj: vlastní

*e) oblouková střecha*

Tento tvar střechy je častým architektonickým řešením sportovních hal a moderních industriálních budov jako jsou například sklady či depa dopravních prostředků. Vektorizace zahnuté střešní klenby je vyřešena jejím rozdělením do několika menších ploch s rozdílným sklonem, které na sebe navazují. Na rozdíl od předchozích typů střech je v tomto případě přesnost zpracování více závislá na velikosti úhlu osy záběru kamery při pořízení snímku. Totiž oblouková střecha se na snímku jeví jako souvislá plocha, na které se nevyskytují zlomy oddělující jednotlivé šikmé plochy, podle kterých může zpracovatel určit vrchol střechy. Ten lze určit jen z klenutého obrysu krajní hrany, který je tím patrnější, čím je pohled na něj šikmější. Na jednotlivých částech obrázku č. 21 níže je demonstrována vektorizace budovy opravny letadel v areálu Ruzyňského letiště a její konečná vizualizace s manuálně upravenou texturou střechy.

Obrázek č. 21: Objekt s obloukovou střechou:



Zdroj: vlastní

*f) kopulovitá střecha*

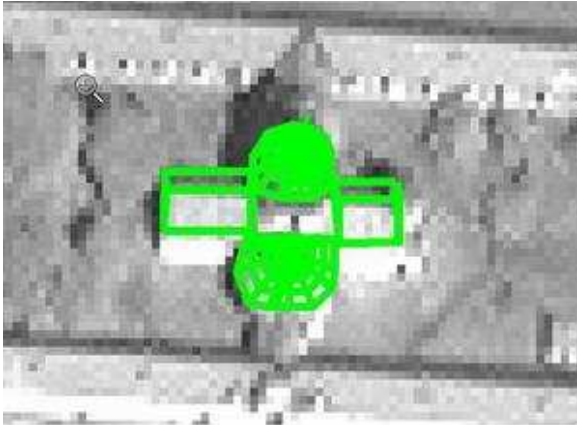
Posledním podporovaným typem střechy z výběru knihovny programu Silver Eye je kopulovitá střecha. Ta se nejčastěji vyskytuje na sakrálních stavbách, budovách palácového typu či jako ozdobný doplněk střech honosnějších městských domů. Při snaze o věrohodnou vektorizaci a následnou vizualizaci těchto objektů zpracovatel naráží v zásadě na dva problémy.

Za prvé se ve většině případů jedná o historické budovy, u nichž je tělo objektu osazené kopulí součástí širší zástavby, která na něj přímo navazuje. Takto komplikovaná architektonická struktura brání v přesném určení paty objektu a tak i celé jeho výšky. Navíc jedna část objektu může překrývat druhou, kterou pak není možné zpracovat, jako tomu je na ilustracích obrázku č. 22. Tam je možné se povšimnout, že nejvyšší část chrámu ukončená kopulí nad centrální lodí na snímku zakrývá nižší levou boční loď a objekt tak

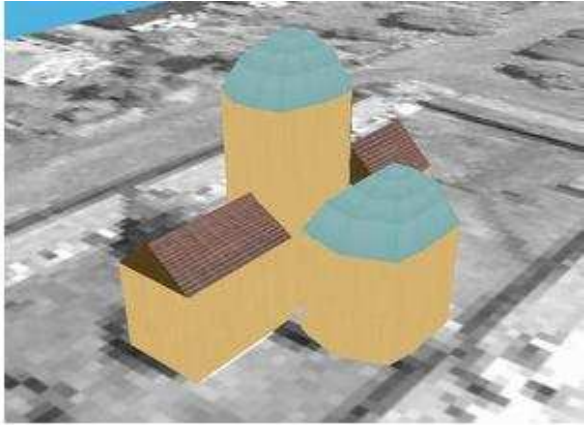
není kompletní. Hladké spojení jednotlivých objektů s kruhovým půdorysem není možné přesně vektorizovat a v prohlížeči jsou potom zřejmé diskontinuity.

Obrázek č. 22: Objekt s kopulovitou střechou:

a) srovnaný tvar,



b) vizualizace



Zdroj: vlastní

Dalším problémem při zpracování těchto tvarů je, že v převážné většině bývá vrchol kupole zakončen věžičkou či zvonící, která ovšem v úhrnu o několik metrů zvyšuje celý objekt. V relativní míře se nejedná o zanedbatelnou hodnotu, leč pro tento útvar neexistuje nástroj, jímž by bylo možné jej zpracovat. Další obtíží při zpracování historických budov je nedostatečné rozlišení snímku.

g) *vegetace*

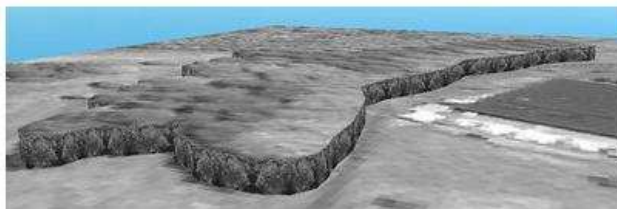
Vektorizace zalesněných ploch je určitě přínosným prvkem aplikace. Tento proces je svým principem totožný s vektorizací budov s rovnými střechami. Z toho ovšem vyplývá, že vyhotovený model bloku lesa dosahuje ve všech místech stejné relativní výšky, což realitě málo odpovídá. Smysl tohoto prvku, je spíš v detekci rozlohy a tvaru zalesněné plochy a jejímu dalšímu použití v 3D modelu pro dosažení lepší věrohodnosti a orientaci celkové scény.

Společným prvkem s vizualizací budov je možnost přiřadit stěnám polygonu lesa vlastní texturu. V jiném případě prohlížeč automaticky přiřadí texturu svislým stěnám, jejíž vzor má uložený v kořenovém adresáři a automaticky dosazuje texturu z obrazu snímku pouze pro korunu stromů. Na další ilustraci č. 23 jsou příklady 3D bloku lesa automaticky znázorněného prohlížečem a se zpracovatelem iniciovanou texturou.

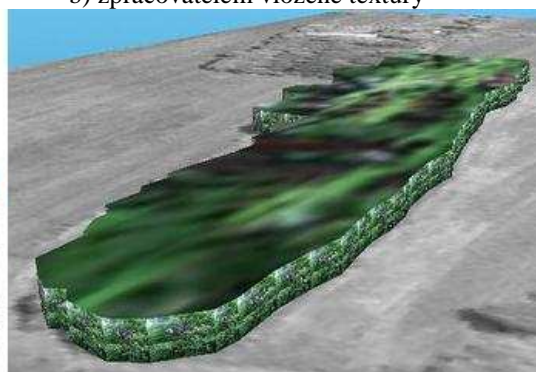


Obrázek č. 23: 3D model bloku lesa:

a) automatické textury,



b) zpracovatelem vložené textury



Zdroj: vlastní

Dodatečným prvkem aplikace je možnost využití již připravených 3D modelů stromů. Zpracovatel může zvolit z dvou odlišných druhů - jabloně nebo javoru - a zasadit je libovolně do scény 3D modelu.

Samostatnou kapitolou při práci s programem Silver Eye je vizuální zpracování namodelovaných objektů. Po definování rozsahu oblasti, z jejíhož území má být zobrazen prostorový model, přichází na řadu krok dosazení fasád budovám. Prohlížeč Silver Eye Viewer dokáže automaticky vytvářet textury fasád a střech na základě části snímku, kterou zabírají jednotlivé polygony, z nichž je 3D objekt složen. Jelikož má ale prohlížeč obrazové informace o objektech pouze na základě vloženého šikmého snímku, při rozložení textury na rozlohu celé plochy polygonu, změně měřítka a úhlu pohledu na objekt, dojde k několika násobnému zhoršení rozlišení fasády. V případě klasických panelových budov s pravidelným vzorem, monotónní fasádou a rovnou střechou neubírá takové poškození příliš na věrohodném znázornění (viz obrázek č. 15 a digitální příloha). V druhém případě, individuální bytové výstavby, může být již role fasád mnohem významnější. Při využití vyhotoveného 3D modelu například v dopravních navigačních systémech může být tímto prostředkem značně usnadněna orientace.

Konečný výsledek zpracování modelu zástavby rodinných domů s blízkou vegetací může vypadat například jako na ilustracích obrázku číslo 24. Na části vlevo je možné vidět pohled na celou zpracovanou oblast s automaticky vytvořenými texturami fasád a střech. Na rozdíl od předchozí oblasti s vysokými pravidelnými objekty tady jednotlivé budovy lehce zanikají v rámci monotónního zbarvení celé scény. Automatické textury jsou generovány z velmi malého počtu obrazových bodů připadajících na každý ohraničený polygon objektů a nemohou tak dostatečně zastoupit skutečnou podobu. Na sousední části

je pak příklad detailu této oblasti s manuálně vloženými fasádami, které orientaci v 3D modelu výrazně usnadňují<sup>4</sup>.

Obrázek č. 24: 3D model oblasti Malá Ohrada:

a) automatické textury,



b) zpracovatelem vložené textury



Zdroj: vlastní

---

<sup>4</sup> Veškeré vytvořené vizualizace 3D modelů a další grafické přílohy jsou obsahem digitální přílohy.

## 6. DISKUZE

Získávání relativních výšek budov a popřípadě dalších nadzemních objektů z dat DPZ je prováděno několika různými formami, v zásadě se odvíjejícími od metody sběru dat. Princip jednosnímkové metody spočívá ve zpracování obrazových dat pořízených satelitním snímáním zemského povrchu a jako takovou ji lze těžko porovávat s metodami laserového nebo radarového skenování. Nabízí se ovšem srovnání s postupy a výsledky jiných metod taktéž založených na zpracování snímků – satelitních či leteckých.

Satelitní snímky, byť v dnešní době ty nejkvalitnější dostupné na trhu, se svým rozlišením stále zdaleka nevyrovnejí obrazovým datům pořízených leteckou fotogrammetrií. Navíc v rámci metod zjišťování výšek nadzemních objektů je použitelné rozlišení snímků omezeno pouze na data vyhotovená v panchromatickém režimu, zatímco letecké snímky podávají reálný barevný obraz povrchu a usnadňují jeho identifikaci. Na druhou stranu produkce snímků družicemi Ikonos či QuickBird je do velké míry automatickou záležitostí s globálním pokrytím, zatímco při plošně omezené letecké fotogrammetrii je třeba řešit dráhy přeletů a obsluhu nosiče. Zásadním prvkem v technologii zpracování obrazových dat je ovšem způsob ustálení funkčních vazeb mezi snímkovým a objektovým prostorem. V kapitole metodika široce popsany racionální funkční model tuto problematiku řeší dvěma způsoby. První, tak zvané na terénu závislé řešení, vyžaduje k provedení georeference identifikaci v terénu změřených vlícovacích bodů o známých souřadnicích a tímto se z hlediska zpracovatele příliš neliší od standardního zpracování leteckých snímků metodou kolineární transformace. Navíc tento postup nepřináší zřetelně lepší výsledky, je velmi citlivý na rozložení GCPs a časově ani technologicky neusnadňuje práci.

Druhý způsob označovaný jako na terénu nezávislý přístup funguje na základě vložení racionálních polynomických koeficientů poskytnutých producentem snímku do výpočtu transformačního klíče. Za předpokladu, že má zpracovatel dostupná všechna potřebná data včetně kvalitního digitálního modelu terénu, s využitím vhodného software se mu tímto postupem otevírá možnost rychlé, přesné a především téměř automatické georeference. Právě vysoká míra automatizace s jakou je tento krok uskutečněn, je velkou předností RFM a stal se standardem při zpracování satelitních dat vysokého rozlišení. Metodou na terénu nezávislého řešení RFM byla také v této práci provedena georeference panchromatického snímku družice QuickBird, jejíž provozovatel poskytl kromě obrazových dat i soubor s racionálními koeficienty. Tento soubor je při vložení snímku do

programu Silver Eye automaticky načten spolu s přiloženým snímkem. Následně zpracovatel zadá cestu k uloženému digitálnímu modelu terénu a prakticky bez velké vlastní iniciativy zpracovatele dojde k přiřazení souřadného systému snímku. Právě rychlost provedení tohoto kroku a minimální požadavky kladené na stranu zpracovatele předčily očekávání. V porovnání s časem a s množstvím vlastní vložené práce, kterou stojí dosažení stejného cíle při práci s leteckými snímky, je výhodnost RFM zřejmá.

Do procesu výpočtu transformačního klíče má přesto zpracovatel možnost vstoupit a to zpřesněním geografické pozice snímku vyrovnáním RFM. Práce se satelitním snímkem tím ztratí nad prací s leteckým výhodu úplné automatizace, nicméně k provedení tohoto kroku postačuje i pouze jeden známý vlíčovací bod (na rozdíl od kolineární transformace) a získaná přesnost může dosáhnout srovnatelných hodnot.

Bez použití vlíčovacích bodů dosahují průměrné odchylky ve směru osy  $x$  pěti metrů a ve směru osy  $y$  více než šesti metrů. Při vložení jednoho GCP již tyto odchylky dosahují velikostí 2,40 m pro  $x$  a 0,50 m pro  $y$ . V případě použití čtyř GCP byly odchylky ještě více korigovány na hodnoty 0,20 m ve směru osy  $x$  a 0,30 m ve směru osy  $y$  (Dial, G., Grodecki, J., 2003). V této práci bylo vyrovnání RFM provedeno s osmi vlíčovacími body a dosažená průměrná odchylka posunutí obrazu ve směru osy  $x$  činila 0,16 m a ve směru osy  $y$  dokonce jen 0,08 m. Vyhotovením měření souřadnic 20 kontrolních bodů na snímku neopraveného o systematické chyby a stejných bodů na snímku s již opravenou georeferencí bylo zjištěno, že průměrná absolutní velikost posunutí činí **5,60 m**, přičemž ve směru osy  $x$  dosáhla korekce průměrné hodnoty **4,88 m** a ve směru osy  $y$  **-2,53 m**. Ve směru osy  $x$  dosahuje deviace, tj. průměrná absolutní odchylka posunutí od průměru, výše  $\pm 0,46$  m a ve směru osy  $y$   $\pm 0,76$  m. Toto měření bylo získáno vložím původního neopraveného snímku a vektorů zpracovaných objektů s již vyrovnaným RFM ve formátu shapefile (viz obrázek č. 13) do aplikace Silver Eye. Na srovnání těchto výsledků je patrné, že vyšší počet vlíčovacích bodů už nepřináší signifikantní zlepšení, přesto je lepší použít při vyrovnání více než jeden vlíčovací bod.

Hlavní devizou na terénu nezávislého přístupu je možnost připravit snímek pro vektorizaci, měření, stereofotogrammetrii a nakonec i jednosnímkovou metodu aniž by zpracovatel musel mít širší znalosti a transformačním procesu. Tento fakt přináší RFM potenciál širokého využití i mimo obory DPZ, GIS či kartografie, protože významně snižuje nároky na odborné znalosti obsluhy systému. Možnost jeho využití v komerční sféře byla jistě také jednou z hlavních příčin, proč se společnost Microsoft rozhodla koupit firmu GeoTango právě s programem Silver Eye.

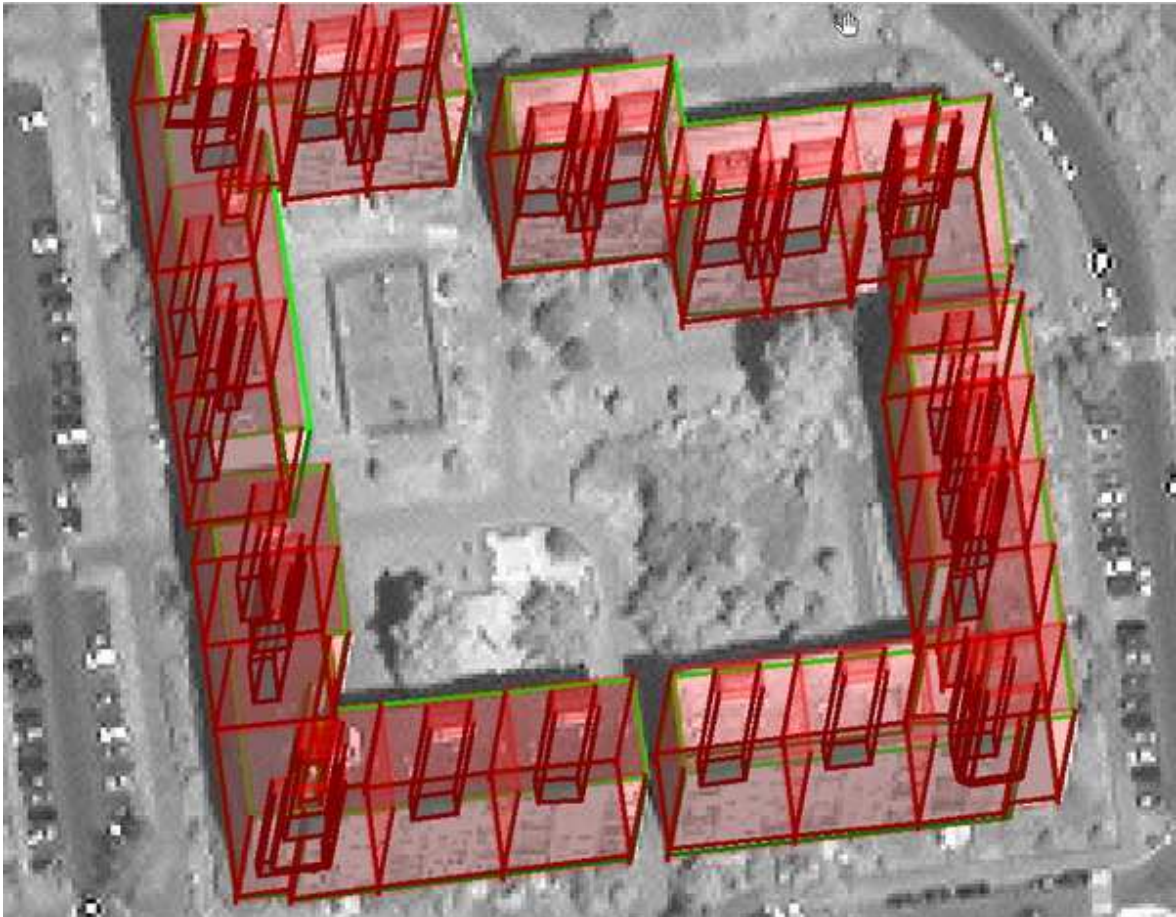
Následujícím krokem po ustálení geometrických vztahů mezi snímkem, DEM a přidávanými GCPs je již samotná detekce relativních výšek budov. Ta je pochopitelně plně ponechána na zpracovateli, jehož úkolem je s pomocí kurzoru vektorizovat půdorysné linie či linie lemující vrchní hrany budovy. Z hlediska požadovaných znalostí se jedná o velmi nenáročnou techniku. Hlavními, „primárními“, faktory majícími vliv na výslednou přesnost naměřených hodnot jsou především rozlišení obrazu, úhel pod jakým jsou viditelné obvodní hrany objektů a nakonec také preciznost, s jakou uživatel tyto hrany identifikuje. „Sekundárními“ faktory pak mohou být velikosti vržených stínů zakrývajících jiné objekty, zakrytí části území oblačností a zakrytí částí objektů vegetací či sněhovou pokrývkou. V ideálním případě se ovšem těmto faktorům předchází při snímání vhodným stanovením roční i denní doby přeletu s ohledem na aktuální klimatické podmínky. Pro srovnání jednosnímkové metody se stereofotogrammetrií a kvalitou leteckých dat tedy nejsou tyto sekundární faktory uvažovány.

V této práci je pozornost věnována výhradně jednosnímkové metodě, která byla rovněž v tomto procesu použita. Pro srovnání dosažených výsledků, jak tedy zjištěných relativních výšek objektů tak i horizontální přesnosti identifikovaných souřadnic jejich půdorysů, byl použit výřez z digitálního modelu zástavby a zeleně (DMZZ) Prahy. Jeho tvorba byla zahájena v roce 2001 ve spolupráci Institutu městské informatiky Praha (IMIP) a Útvaru rozvoje města (ÚRM), který jej dnes spravuje. 3D modely zástavby a významné zeleně jsou zpracovány metodou stereofotogrammetrického vyhodnocení barevných leteckých snímků transformovaných dle rovnic kolinearity. Každá budova je samostatný objekt doplněný komíny a vikýři s velikostí přesahující dva metry. Udávaná přesnost výšek dosahuje odchylky cca 25 cm a půdorysy budov odpovídají ploše základny jejich střech.

Pro srovnání dosažené horizontální přesnosti vektorizace budov bylo v programu Silver Eye provedeno kontrolní měření 15 horizontálních vzdáleností mezi stejným počtem rovnoměrně rozložených bodů - pat jednotlivých zvektorizovaných objektů. Stejně vzdálenosti a body byly identifikovány v DMZZ Prahy. Průměrná absolutní odchylka mezi velikostmi těchto dvou sad délek dosáhla **0,86 m**. Nejvyšší odchylka činila 2,91 m, nejnižší hodnoty se pak pohybovaly v řádu několika centimetrů. Deviace absolutních odchylek od průměru činí  $\pm 0,67$  m. Vzhledem k danému rozlišení satelitního snímku předčily dosažené výsledky měření v horizontální rovině očekávání. Vektorizaci půdorysných linií jednosnímkovou metodou lze tak považovat za poměrně úspěšnou. O velikostech horizontálních nepřesností se dá přesvědčit z následujícího obrázku číslo 25. Červené linie

a transparentní červené plochy označují budovy z dat DMZZ, zelené linie značí hrany budov zpracovaných jednosnímkovou metodou.

Obrázek č. 25: Srovnání polohy zpracovaných budov vůči DMZZ



Zdroj: vlastní

Další etapou této práce bylo zjišťování relativních výšek nadzemních objektů, zejména budov ale v malé míře i vegetace. Provedení tohoto kroku zpracováním pouze jednoho snímku zůstává doposud metodou velmi zřídka používanou a také velmi málo známou. Zásadní vliv na úspěšné vyhodnocení zájmového území má kvalita digitálního modelu terénu, který determinuje nominální hodnotu nadmořské výšky při patě každé budovy. Dalším stejně významným faktorem jsou vlastnosti snímku dané postavením senzoru během snímání, zejména pak sklon osy záběru vůči zemskému povrchu. Tento sklon, čili „*off-nadir*“ úhel ( $\theta$ ) činil v případě snímku používaného v této práci  $23,4^\circ$ . Na obrázku č. 8 v kapitole metodika je znázorněn princip výpočtu rozdílu výšek objektu (nadmořských výšek při patě a vrcholu). Symbol  $\sigma_{pixel}$  označuje přesnost v pixlech, s jakou

je zpracovatel schopný identifikovat vrchol objektu, čili zpracovatelova preciznost. Bude-li se uvažovat, že vrchol objektu je identifikován s přesností jednoho pixelu, pak dle rovnice číslo 18 je možno odvodit přibližnou odchylku v určení výšky  $\Delta h = 1,53 \text{ pixelu}$ . Střední chyba  $\sigma_{\Delta h}$  vyjadřuje přesnost rovněž v pixelech s jakou je určen rozdíl měřených nadmořských výšek při patě a při vrcholu objektu. V případě přesnosti opět jednoho pixelu bude naměřený rozdíl přesný na **2,16 pixelu**. V případě měření s přesností dvou pixelů se hodnota odchylek  $\Delta h$  i  $\sigma_{\Delta h}$  zdvojnásobuje, v případě tří ztrojnásobuje a tak dále.

$$\Delta h = \tan^{-1} \theta \cdot \sigma_{\text{pixel}} \qquad \sigma_{\Delta h} = \sqrt{2} \cdot \tan^{-1} \theta \cdot \sigma_{\text{pixel}}$$

Rovnice č. 18, 19: (Zdroj: Willneff, J., Poon, J., Fraser, C., 2004, 4. str.)

Předpokladem před začátkem této práce bylo, že paty a vrcholy objektů bude možné identifikovat právě s přesností jednoho pixelu. Je ovšem jisté, že tento limit nebyl ve všech případech naplněn. Při patách některých budov, především panelových, se v těsné blízkosti nacházel obdobný povrch vykazující na panchromatickém snímku velmi blízký odstín šedé jaký měla budova. U zástavby rodinných domů často způsobovala stejný problém vegetace. Další obtíž znesnadňující jasné identifikování hrany, resp. vrcholu objektu byl převis okraje střechy nad tělem budovy, popřípadě střechou vržený stín. Tyto nedostatky do velké míry odpadají při práci s leteckými snímky, které kromě vyššího rozlišení poskytují i barevný pohled na scénu. V případě vyhodnocování stejných snímků metodou stereofotogrammetrie, je sice rozlišení stejné, nicméně právě pohled ze dvou různých úhlů na jeden bod, může eliminovat překryvy a usnadnit tak jeho identifikaci.

Pro zhodnocení přesnosti zjištěných výšek byly vzájemně srovnávány délky svislých hran vybraných čtyřiceti budov zvektorizovaných při vlastní práci v Silver Eye s výškami příslušných budov v DMZZ. Srovnání bylo provedeno ve dvou úrovních. Polovinu, tedy dvacet hodnocených budov, tvořila vysoká a pravidelná zástavba v oblasti Velká Ohrada s průměrnou relativní výškou 24,14 m (naměřeno jednosnímkovou metodou), resp. 25,54 m (naměřeno v DMZZ). Druhá polovina budov pak pocházela z oblasti Malá Ohrada se složitější, nízkou a nepravidelně rozmístěnou zástavbou o průměrné výšce 7,28 m (monoplotting), respektive 10,05 m (DMZZ).

V první oblasti zastavěné panelovými budovami činila průměrná odchylka výšek zjištěných jednosnímkovou metodou od DMZZ **-1,40 m**, přičemž pouze jediná budova

vyhodnocená jednosnímkovou metodou přesáhla výšku budovy z DMZZ a to o jeden metr. Nejvyšší rozdíl činil -4,50 m (15% výšky budovy dle DMZZ) a průměrná nepřesnost v detekci výšky dosahovala **5,58%** její velikosti (dle DMZZ). Z těchto výsledků plyne, že měření výšek vysokých a geometricky jednoduchých budov jednosnímkovou metodou je relativně úspěšný způsob. Zjištěná odchylka 1,40 m je nižší než stanovené kritérium přesnosti určení relativní výšky objektu. S uvažovaným rozlišením 0,70 m/ 1 pixel činí toto kritérium  $\sigma_{Ah} = 1,51 \text{ m}$ .

V oblasti Malá Ohrada dosáhly tyto ukazatele výrazně závažnějších hodnot. Již z pohledu na rozdíl průměrných výšek totožného souboru budov je patrné, že zjišťování relativních výšek menších objektů jednosnímkovou metodou může být problematické. Všechny výšky naměřené jednosnímkovou metodou byly nižší než výšky v DMZZ a jejich průměrná odchylka činila **-2,78 m** a tedy překročila míru přesnosti. Zjištěná odchylka sice není v porovnání se stanovenou přesností 2,16 m dramaticky vysoká, ale vzhledem k tomu, že se jedná o budovy s nízkou relativní výškou, činí tato průměrná odchylka velmi neuspokojivých **27,2%** průměrné výšky budov (dle DMZZ). Vyloučí-li se hrubé chyby typu nedbalost na straně zpracovatele, pak jako hlavní příčiny takto vysoké odchylky při detekci hran objektů lze považovat nedostatečné rozlišení snímku a možná záměna vrcholu/ paty objektu s okolním reliéfem z důvodu minimálního rozdílu v odstínu šedé barvy pixelu. Oba tyto faktory navíc umocňuje nedostatečně skloněná osa kamery vůči objektům snižující množství obrazových bodů připadajících na svislé hrany.

Ačkoliv dosažené výsledky ve zjišťování relativních výšek v případě některých objektů nemusejí být uspokojivé, přesto může přinést práce touto metodou v aplikaci Silver Eye poměrně velký užitek. Program totiž nabízí prostřednictvím prohlížeče Silver Eye Viewer velmi rychlé a snadné vytváření pohledových 3D modelů a pokud je konečným cílem zpracovatele získat spíše atraktivní vizualizace vyhotovené v krátkém čase bez speciálního vybavení typu fotogrammetrické stanice a v neposlední řadě s nižšími náklady za pořízená data, pak může být jednosnímková metoda správnou volbou. Automatické generování textur objektů na základě panchromatického snímku se skloněnou osou kamery sice nedokáže vytvořit vyrovnaný obraz fasád v 3D modelu, nicméně dokáže udržet jejich strukturu, jedná-li se o vyšší budovy pravidelných tvarů (viz obrázek č. 15). Vlastní dosazování fasád a textur střech je v prohlížeči vyřešeno jednoduchým postupem, při němž se vybere obrázek odpovídající dané ploše ve formátu \*.jpg a definuje se jeho



rozsah. Tyto vzorky fasád si ovšem musí zpracovatel pořídit sám, nejlépe terénním monitorováním a fotografováním příslušných objektů pro opravdu věrohodné znázornění oblasti. Nabízí se také možnost stejnou metodou vytvořit prostorový model porostu. Vektorizace zalesněné plochy se provádí obdobně jako budovy s rovnou střechou. Na rozdíl od budovy je ovšem svrchní patro lesa ve skutečnosti členité a každý jeden zpracovaný blok vegetace může mít jen jednu výšku. Na přesvědčivosti mu tedy přidá výběr vhodného vzorku fasády. Pozitivním doplněk je možnost zasadit do 3D modelu předem připravené modely stromů, ovšem jen dvou druhů, přičemž nelze změnit jejich velikost

V prohlížeči lze přidělit vlastní texturu každé ploše ve zpracované oblasti tudíž i terénu. Zpravidla se ale jedná o rozlehlou a složitou plochu, tudíž není-li k dispozici podkladový barevný letecký snímek (multispektrální nemají dostatečné rozlišení a program nepodporuje funkci *pan-sharpening*) stejného rozsahu, je lépe ponechat podklad generovaný automaticky. Pro konečné vyjádření se k vhodnosti jednosnímkové metody pro zjišťování relativních výšek je nutné zvážit klady a zápory, které obnáší postup práce a jím dosažené výsledky.

### ***pozitiva***

- K práci je potřeba jen jednoho snímku, čímž se mohou významně snížit náklady, obzvlášť nachází-li se zpracovávaná oblast na více snímcích.
- Potřebné hardwarové vybavení odpovídá běžné počítačové sestavě a na obsluhu nejsou kladeny vysoké nároky co do odborných znalostí ani zvláštních schopností při práci s výpočetní technikou.
- Ustálení vztahu souřadnicového systému mezi snímkem a terénem použitím RFM je velmi rychlý proces, který navíc nutně nevyžaduje vstup terénních měření v podobě vlíčovacích bodů. S jejich užitím ovšem průměrná absolutní odchylka přesnosti georeference dosahuje submetrových hodnot.
- Nástroje a způsob vektorizace objektů jsou vyřešeny velmi příznivě s ohledem na pohodlí uživatele programu Silver Eye. Program navíc nabízí knihovnu šesti předdefinovaných tvarů střech s modifikovatelnými rozměry a sklony. Vektory jsou ukládány do souborů ve formátu shapefile
- Metoda je vhodná pro zpracování území s vysokou a pravidelnou architekturou budov a poskytuje poměrně dobré výsledky vertikální přesnosti.

- Vizualizace zpracovaných objektů je lehce proveditelná spuštěním prohlížeče Silver Eye Viewer, v kterém zpracovatel může měnit úhly i výšky pohledu a přiblížit či oddálit scénu. Prohlížeč navíc umožňuje přiřadit všem plochám v 3D modelu vlastní textury.
- Vyhotovený model je možné exportovat do souboru \*.x či rychle exportovat jeho snímek v běžných obrazových formátech.

### **negativa**

- Dostupné satelitní snímky se svým rozlišením nevyrovnejí kvalitě leteckých snímků. Navíc použitelné rozlišení k přesné detekci hran objektů nabízí pouze panchromatické snímky, zatímco letecká fotografie je plně barevná. Použité metody filtrace nevedly k dostatečnému zvýraznění hran a techniky spojení obrazových panchromatických dat s multispektrálními („*pan-sharpening*, *image fusion*“) nejsou v Silver Eye implementovány.
- Významný vliv na dosaženou přesnost zjištěných výšek má úhel osy kamery vůči objektům. Použitím jednoho snímku navíc není možnost vidět daný objekt z jiného úhlu.
- Při vektorizaci budov dochází k nespojitostem způsobených částečným překrytím objektů. Svislé stěny nelze doplnit o prvky jako jsou balkóny, terasy či jiné výklenky, pokud nesahají až k terénu. Některé předdefinované tvary střech jsou omezeny na půdorysy se čtyřmi vrcholy, což brání v přesném provedení vektorizace střech složitých budov s více trakty. Střechy navíc není možné doplnit o běžné součásti jako jsou komíny, vikýře či vnořené terasy.
- Podobně jako u DMZZ, i zde mají půdorysy budov na terénu stejný tvar a velikost jako základny jejich střech. Není tedy možné zohlednit převis střechy. Na rozdíl od DMZZ navíc není možnost znázornit případná atria budov.
- Metoda nedosahuje zcela uspokojivých výsledků zjištěných relativních výšek při zpracování nízkých a komplikovaných budov.
- Vyhotovené soubory 3D polygonů ve formátu shapefile nevykazovaly prvky 3D rozměrů při jejich použití v jiné aplikaci ArcGIS 9.2, ale zobrazovaly pouze půdorysy zpracovaných budov. Jako příčinu lze spíše označit chybu v programu/ instalaci Silver Eye.
- V prohlížeči nelze vytvářet průlety a není k dispozici funkce pan

## 7. ZÁVĚR

V této diplomové práci je popsán způsob zjišťování relativních výšek budov jednosnímkovou metodou a postupů vedoucích k jejímu úspěšnému provedení. V praktické části byly takto zpracovány objekty na satelitním snímku družice QuickBird. Nejdříve je vysvětlen způsob ustálení funkčních vazeb mezi objektovým prostorem a prostorem snímku, pro který se používá racionální funkční model (RFM). Jsou objasněny rozdíly mezi na terénu závislým a nezávislým přístupem RFM, přičemž na terénu nezávislé řešení bylo použito k transformaci souřadnic v praktické části práce. Transformace je umožněna zpracováním racionálních polynomických koeficientů (RPCs), které jsou poskytovány producentem satelitního snímku na místo fyzického sensorového modelu, tj. datech o vnitřních a vnějších prvcích kamery. RFM je jednoduchá, rychlá a přesná metoda georeferencování scény, navíc je umožněno její další zpřesnění po zařazení a identifikaci vlíčovacích bodů (GCPs). Tento proces se nazývá vyrovnání RFM a jeho provedení může výrazně zpřesnit geografické vazby mezi snímkem, DEM a GCPs. Úspěšnost tohoto procesu byla testována na sadě horizontálních vzdáleností naměřených mezi objekty z digitálního modelu zástavby a zeleně (DMZZ) a objekty zpracovanými jednosnímkovou metodou. Toto kontrolní měření dokázalo, že na terénu nezávislé řešení RFM zpřesněné sadou GCPs dostatečně zastupuje fyzický sensorový model.

V další části práce byly v programu Silver Eye zpracovány budovy v typově dvou odlišných oblastech. První oblast tvořily vysoké, kvadratické budovy s rovnými střechami, s minimálními vzájemnými překryty a zastíněním. Tyto objekty vykazují jednoduchou pravidelnou texturu fasád a jsou pravidelně rozloženy na spíše rovinném terénu. Druhá zpracovaná oblast se sestávala z nízké zástavby rodinných domů se složitější architekturou a různými typy střech. Jednotlivé objekty jsou nepravidelně rozmístěny ve svažujícím se terénu, častěji se zde vyskytuje vzrostlá vegetace a vzájemné zakrytí objektů způsobené jejich těsným kontaktem. Detekce obvodových hran objektů je silně závislá na sklonu osy kamery a rozlišení obrazu. Srovnávacím měřením s výškami stejných objektů v DMZZ bylo dokázáno, že v případě vysokých a geometricky jednoduchých budov v první oblasti poskytuje jednosnímková metoda poměrně přesné výsledky vertikálních hodnot. Rovněž vytvořený 3D model této zástavby s automaticky vytvořenými texturami byl věrohodný. V druhém případě nízké individuální zástavby nacházející se v první oblasti stejné měření prokázalo, že dosažené odchylky byly téměř 2x větší než u vysokých budov. Navíc vzhledem k jejich skutečné výšce tyto odchylky v průměru činily více než čtvrtinu jejich

relativní výšky. Protože svislé stěny nízkých budov jsou na snímku malé, prohlížečem automaticky vytvořené fasády nedostatečně ilustrují jejich skutečnou podobu. Nicméně osazování jednotlivých ploch budov vlastními texturami je programem velmi příznivě vyřešeno. Na zástavbě v této oblasti bylo také vyzkoušeno zpracování různých tvarů střech, pro které aplikace nabízí knihovnu předdefinovaných tvarů. Postup vektorizace střech těmito nástroji je poměrně jednoduchý a rychlý, avšak nastavené tvary nejsou schopny vystihnout geometrii střech doplněných vikýři, komíny či terasami. Jejich základna navíc musí být často ve tvaru pravidelného čtyřúhelníku o stejných rozměrech jako půdorys budovy. K diskontinuitám také dochází při napojení několika částí budov na sebe. V programu je možné zpracovat také zalesněné plochy a vkládat 3D modely solitérních stromů.

Z hlediska získávání relativních výšek budov s požadavkem dosáhnout co nejvyšší přesnosti může být jednosnímková metoda úspěšná zejména v prostředí s vysokou a jednoduchou zástavbou a alternovat tak častěji používané stereofotogrammetrii. Pokud je hlavním cílem získat obraz 3D modelu zástavby pro běžnou orientaci v co nejrychlejším čase a s minimálními náklady, přičemž zpracovatel sleduje především konečnou ilustraci než přesnost, pak lze jednosnímkovou metodu obecně doporučit jako správnou volbu.

## **8. LITERATURA**

- Croitoru, A., Tao, V., C., Hu, Y., Xu, J., Wang, F., Lenson, P. (2004):** The rational functions model: A unified 2D and 3D spatial data generation scheme. *ASPRS - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Denver, USA, 11 str.
- Di, K., Ma, R., Li, R., X. (2003):** Rational functions and potential for rigorous sensor model recovery. *ASPRS - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Washington, DC, USA, Vol. 69, No. 1, 33-41, 9 str.
- Dial, G., Grodecki, J. (2003):** Block adjustment of high resolution satellite images described by rational polynomials. *ASPRS - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Washington, DC, USA, Vol. 69, No. 1, 59-68, 10 str.
- Fraser, C., S. (2005):** Prospects for mapping from high-resolution satellite imagery. Department of Geomatics, University of Melbourne, Melbourne, Australia, 8 str.
- Fraser, C., S., Hanley, H.,B., (2003):** Bias compensation in rational functions for Ikonos satellite imagery. *ASPRS - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Washington, DC, USA, Vol. 69, No. 1, 53-57, 5 str.
- Halounová, L., Pavelka, K. (2005):** Dálkový průzkum Země. Vydavatelství ČVUT, Praha 2005, 192 str.
- Hu, Y., Tao, V., C., Croitoru, A., (2004):** Understanding the rational function model: methods and applications. *Proceedings of the ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, 6 str.
- Šafařík, A. (2005):** Sborníky technické harmonizace 2005; Termíny z oblasti metrologie. ÚNMZ (Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví), Praha 2005, Q-Art Praha, 81 str.
- Tao, V., C., Hu, Y., (2001):** A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing, *ASPRS - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, The University of Calgary. Calgary, Canada, 2001, Vol. 67, No. 12, 1347–1357, 11 str.
- Willneff, J., Poon, J., Fraser, C., S., (2004):** Single Image High-Resolution Satellite Data for 3D Information Extraction. University of Melbourne, Melbourne, Australia, 6 str.
- Zhang, L., Baltsavias, E., (2006):** Automated and semi-automated object extraction (mainly roads and buildings). *ISPRS - Technical Commission IV Symposium „Geospatial Databases for Sustainable Development“*, Goa, India, 38 str.

**Prameny:**

*<http://www.geom.unimelb.edu.au/cfraser/451332.htm>*

*<http://geotango.com/>*

**Použitý software:**

*Silver Eye*

*ArcGIS 9.2*

*Matkart VB099*

*MS Word*

*MS Excel*

**PŘÍLOHA Č. 1: METADATA KE ZPRACOVANÉMU SNÍMKU**

K této magisterské práci byl získán panchromatický snímek západního území města Prahy a část okresu Praha - západ. Snímek je produktem společnosti Digital Globe provozující satelit QuickBird. Provoz této sondy byl zahájen v roce 2001 a její oběžná dráha leží ve výšce přibližně 450 km nad zemským povrchem. Kamerové vybavení družice je schopné produkovat panchromatické snímky s rozlišením 0,61 - 0,72 metrů/ 1 pixel, horší rozlišení vykazují snímky pořízené s větším sklonem osy záběru vůči zemskému povrchu tzv. „*off-nadir*“ úhlu, který v případě družice QuickBird dosahuje maximálně 25°, Optické zařízení je ale také schopné snímat Zemi v multispektrálním režimu, ovšem rozlišení takových snímků je výrazně horší a pro detekci hran budov s požadovanou přesností nedostatečné. Velikost pixelu v tomto případě dosahuje hodnot 2,44 - 2,88 metru. Velikost snímku, jak je společností Digital Globe standardně dodáván, zabírá plochu přibližně 16,5 x 16,5 km. V případě této práce byl k dispozici výřez o rozsahu 14336 řádků pixelů a 13852 sloupců pixelů pořízený pod „*off- nadir*“ úhlem 23,4°.

metadata snímku:

počet pixelů na ose x: 13852

počet pixelů na ose y: 14336

čas začátku snímání: 10:27:08,308288; 20. červenec 2007

doba expozice: 0,00188403

„offset values:“

$x_0$	$y_0$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
6933	13509	14,2791	50,0214	394

„scale factors:“

$x_s$	$y_s$	$X_s$	$Y_s$	$Z_s$
6989	13839	0,0690	0,0855	501

souřadnice snímku: roh	zem. délka (UTM E)		zem. šířka (UTM N)	
	X (WGS 84)		Y (WGS 84)	

horní levý:	14,21021332	50,10599119	443523,14999997	5550714,04999989
horní pravý:	14,34579012	50,10683425	453218,84999999	5550714,04999992
dolní pravý:	14,34701631	50,01659027	453218,84999999	5540679,54999992
dolní levý:	14,21169356	50,01574988	443523,14999997	5540679,54999989

Racionální koeficienty:

Pro souřadnice sloupců (x) pro souřadnice řádku (y)

$a_{ij}$	$b_{ij}$	$c_{ij}$	$d_{ij}$
-3,666258E-03,	+1,000000E+00	-9,118080E-05	+1,000000E+00
+1,010307E+00,	+1,837455E-03	+4,919384E-03	-7,872799E-07
+1,873296E-02,	+9,161134E-04	-9,813043E-01	-4,631935E-05
+8,132500E-03,	-5,874292E-04	-2,418421E-02	+2,137927E-04
-8,331354E-04,	+1,992868E-07	-2,162778E-06	+1,437063E-08
+6,280957E-04,	-3,719686E-06	-9,113623E-06	+3,154164E-07
-7,756210E-04,	+2,163814E-07	+2,198586E-04	+1,909857E-06
+1,857917E-03,	+2,864740E-06	-2,357531E-04	-1,208653E-07
+2,917403E-05,	+1,009227E-06	+3,845596E-05	-1,780396E-07
-1,544772E-05,	-1,050886E-06	+7,507908E-06	+3,035292E-07
-1,968752E-06,	+7,801940E-07	+3,092588E-07	+5,808490E-07
+2,658378E-06,	+1,670354E-07	+3,555357E-07	-1,161595E-07
-1,761985E-06,	+1,582863E-07	+4,676941E-08	+3,117533E-07
-4,569203E-07,	-1,343742E-07	-7,575212E-08	-1,358892E-07
-2,923752E-06,	+1,918617E-07	+8,232845E-08	+2,763522E-07
+1,848582E-07,	+1,689652E-07	-2,090655E-07	-2,531290E-07
-2,387261E-07,	-7,867735E-08	-1,033575E-07	-2,991771E-07
+3,342498E-06,	-7,998901E-06	-1,005690E-05	+2,175078E-06
-1,872535E-06,	+2,791748E-07	+1,425394E-06	-1,029112E-06
-1,368914E-08	+0,000000E+00	-2,153436E-08	+2,954862E-08

nadmořská výška: 394,81 m n, m,

min azimut slunce: 160,2°

max azimut slunce: 160,3°

průměrný azimut slunce: 160,3°

min výška slunce: 59,6°

max výška slunce: 59,8°

průměrná výška slunce: 59,7°

min azimut satelitu: 188,8°

max azimut satelitu: 189,4°

průměrný azimut satelitu: 189,1°

min výška satelitu: 63,1°

max výška satelitu: 66,1°

průměrná výška satelitu: 64,6°



min „in-track“ úhel:  $-23,8^{\circ}$

max „in-track“ úhel:  $-23,0^{\circ}$

průměrný „in-track“ úhel:  $-23,4^{\circ}$

min „cross-track“ úhel:  $0,6^{\circ}$

max „cross-track“ úhel:  $1,2^{\circ}$

průměrný „cross-track“ úhel:  $0,9^{\circ}$

min „off-nadir“ úhel:  $23,4^{\circ}$

max „off-nadir“ úhel:  $23,4^{\circ}$

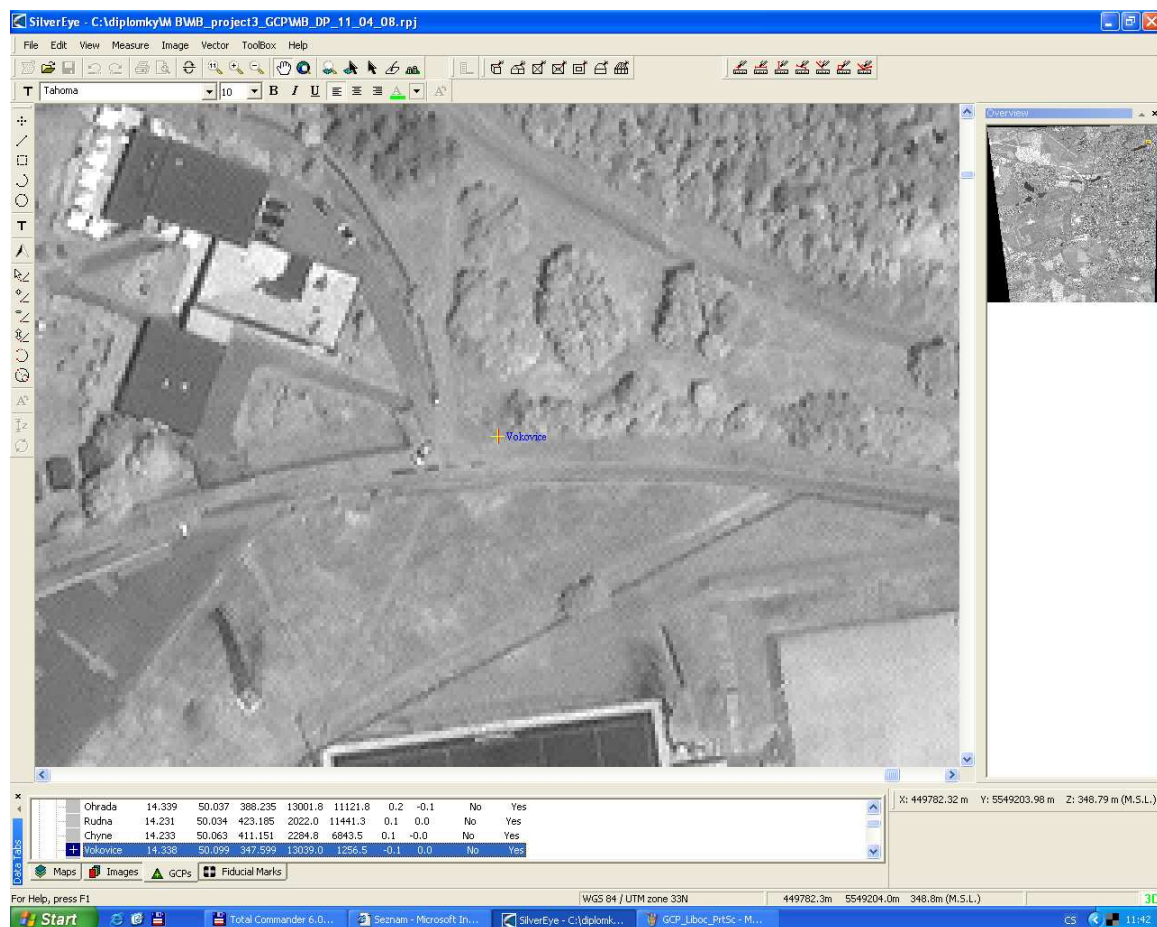
průměrný „off-nadir“ úhel:  $23,4^{\circ}$

## PŘÍLOHA Č. 2: ÚDAJE O GCPS

### *Vlčovací bod č. 1 „Vokovice“*

Vlčovací bod číslo jedna byl zvolen na zděné hraně lávky přes strouhu lemující přilehlou příjezdovou komunikaci. Lávka spojuje tuto komunikaci s pěší cestou do chráněné oblasti Divoká Šárka v městské části Praha 6 - Vokovice.

Obrázek č. 26: GCP Vokovice



Zdroj: vlastní

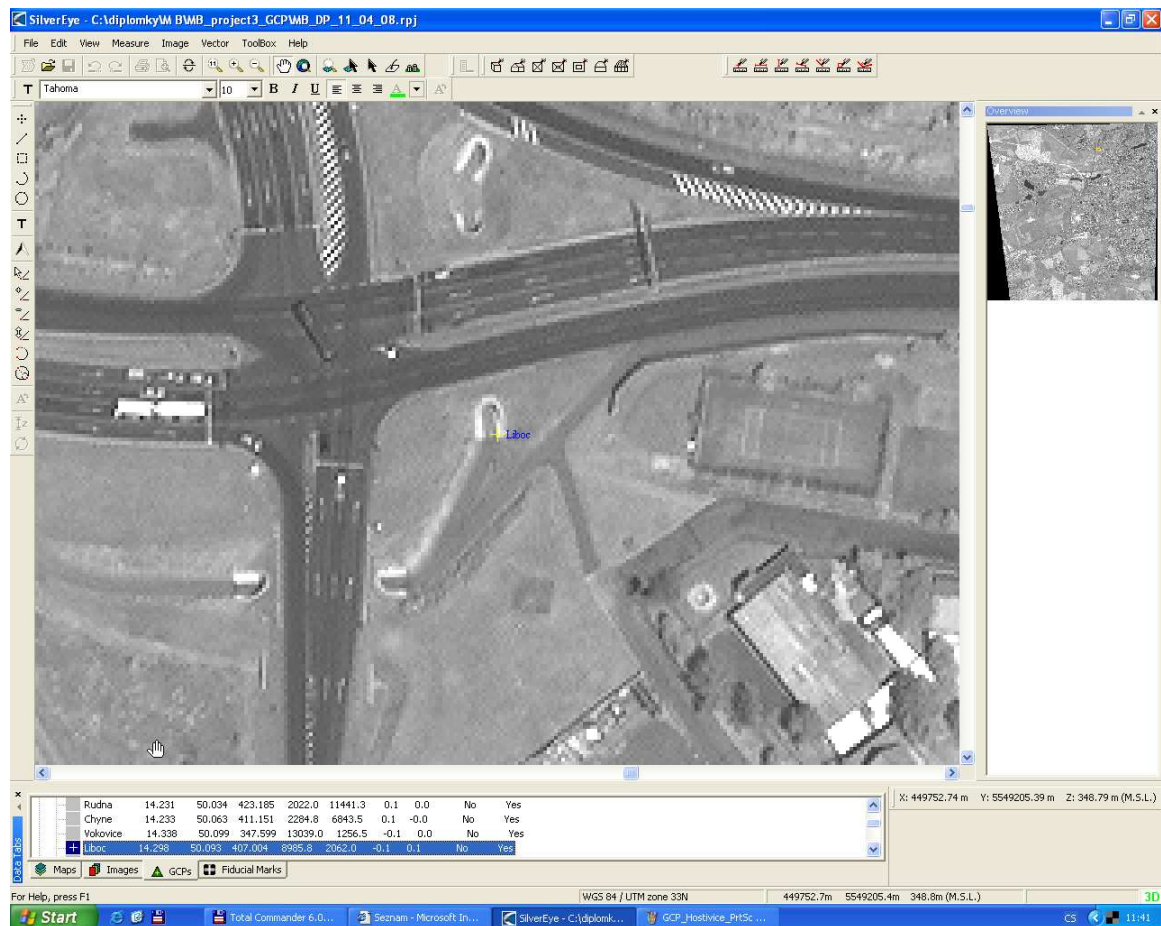
	X (E)	Y (N)	σ	Vx	Vy
WGS 84	14°20'17,11479"	50°05'56,49921"	0,077m		
UTM (N33)	452660,36	5549850,91		-0,1m	0,0m

Doba měření trvala 8 minut 30 vteřin a souřadnice u tohoto bodu dosáhly z celého souboru měření nejhorší přesnosti  $\pm 7,7$  cm. Ve směru osy  $x$  došlo k posunutí o  $-0,10$  m a ve směru osy  $y$  o  $0,10$  m od původní lokace.

## Vlčovací bod č. 2 „Liboc“

Druhý vlčovací bod byl umístěn na pravé (východní) dolní hraně betonového rámu vstupu do podchodu pro pěší vedoucím pod Evropskou ulicí při jejím napojení na pražský západní okruh a Drnovskou ulici v městské části Praha 6 - Liboc.

Obrázek č. 27: GCP Liboc



Zdroj: vlastní

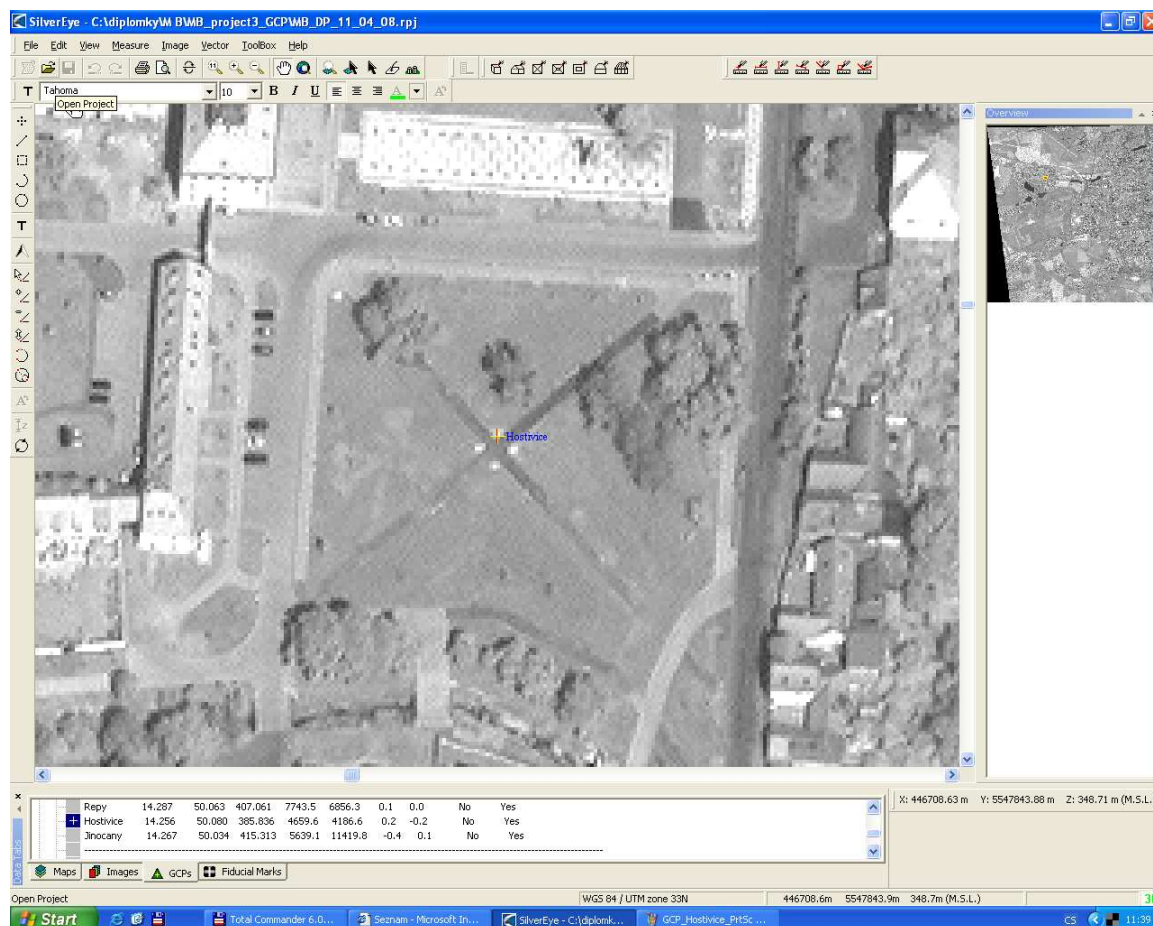
	X (E)	Y (N)	σ	VX	VY
WGS 84	14°17'54,34083"	50°05'36,55036"	0,077m		
UTM (N33)	449818,17	5549260,69		-0,1m	0,1m

Doba měření trvala 8 minut a 25 vteřin a souřadnice u tohoto bodu dosáhly stejné přesnosti jako bod první  $\pm 7,7$  cm. Ve směru osy x došlo k posunutí o -0,10 m a ve směru osy y o 0,10 m od původní lokace.

### Vlčovací bod č. 3 „Hostivice“

V obci Hostivice byl v místním parku sousedícím s zdejší zámek alokován třetí vlčovací bod. Přesné umístění bylo na hraně horního (severního) betonového květináče.

Obrázek č. 28: GCP Hostivice



Zdroj: vlastní

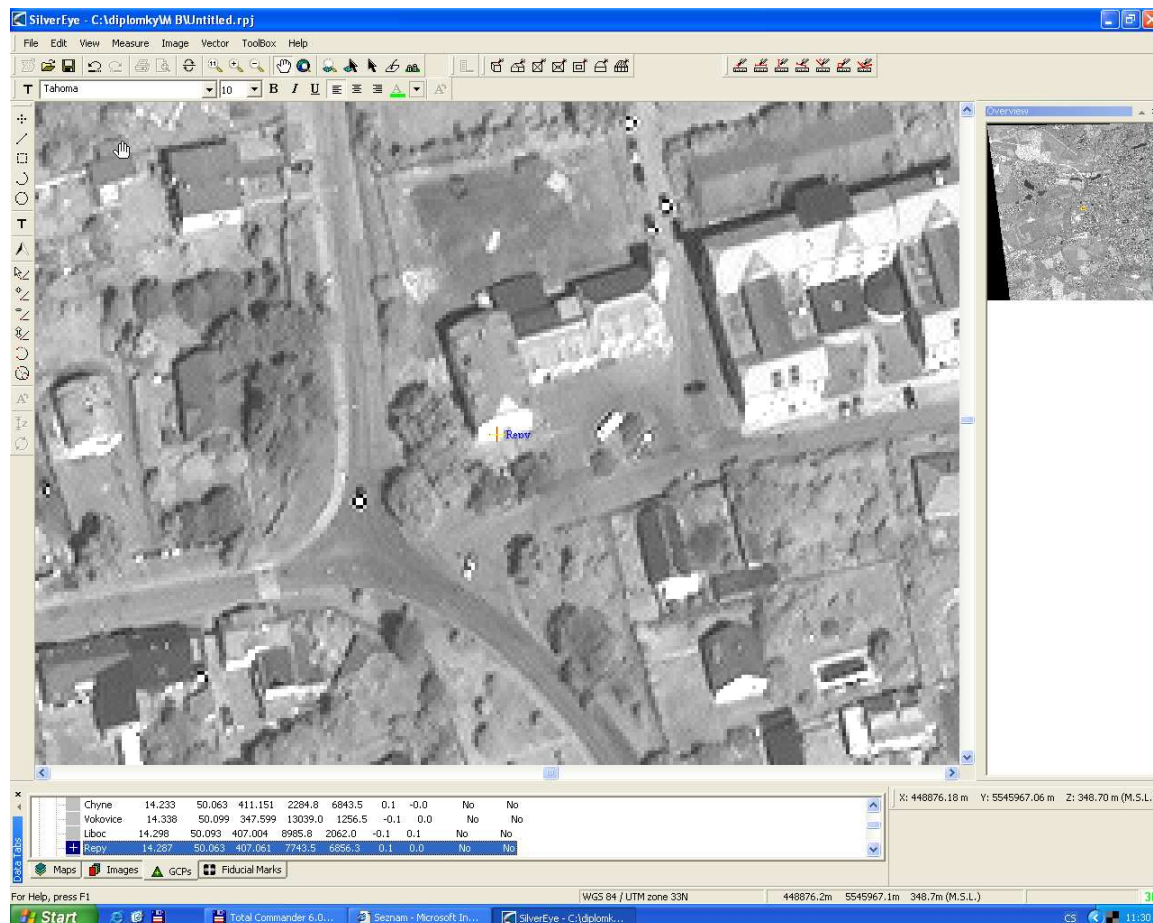
	$X (E)$	$Y (N)$	$\sigma$	$VX$	$VY$
WGS 84	14°15'22,73749"	50°04'47,80275"	0,009m		
UTM (N33)	446791,04	5547784,28		0,2m	-0,2m

Doba měření trvala dle záznamu 8 minut 20 vteřin a získané souřadnice u tohoto bodu dosáhly nejvyšší přesnosti  $\pm 0,9$  cm. Ve směru osy  $x$  došlo k posunutí o 0,20 m a ve směru osy  $y$  o -0,20 m od původní lokace,

### Vlčovací bod č. 4 „Řepy“

Čtvrtý vlčovací bod se nachází při vstupu do budovy obecního zastupitelstva a městské policie v ulici Křivatcová, pražské městské části Zličín.

Obrázek č. 29: GCP Řepy



Zdroj: vlastní

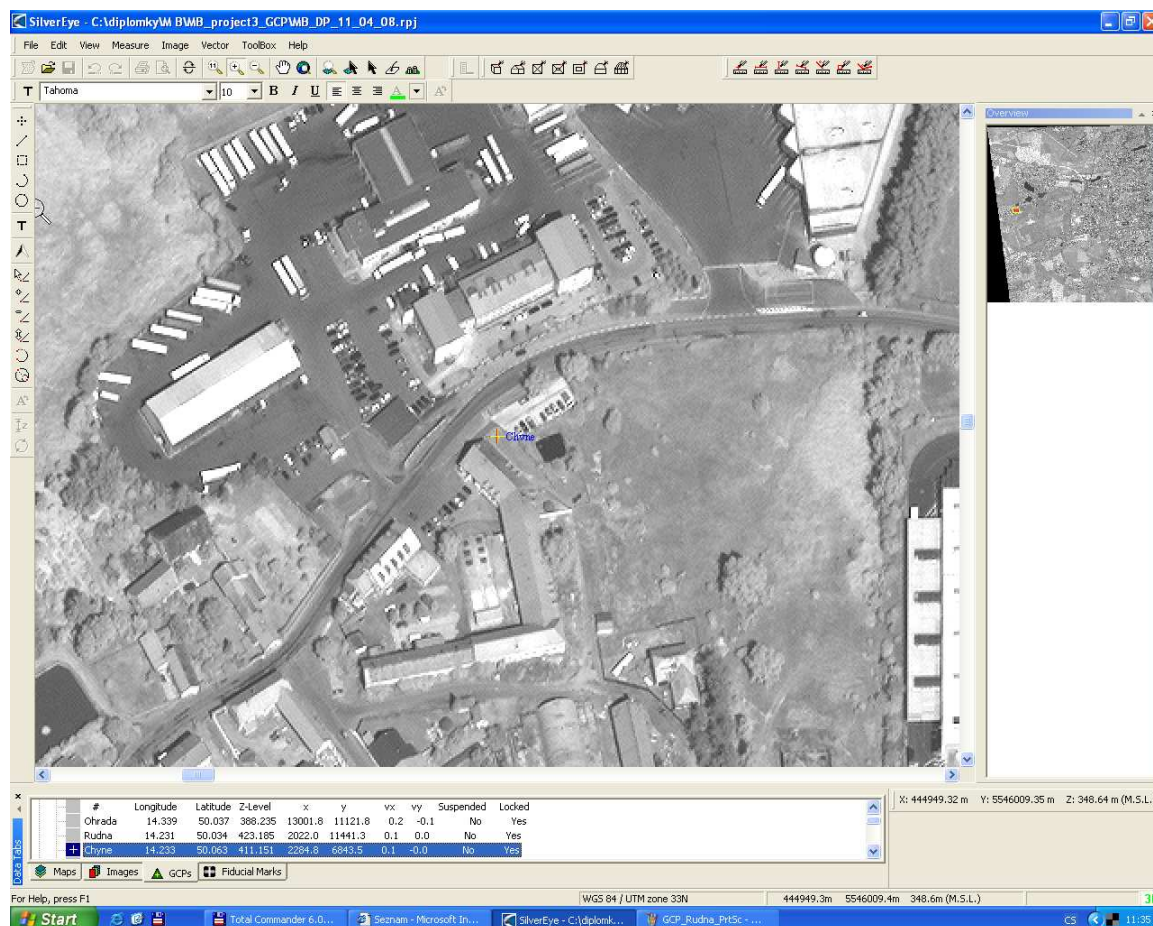
	$X (E)$	$Y (N)$	$\sigma$	$v_x$	$v_y$
WGS 84	14°17'12,16237"	50°03'47,66944"	0,036m		
UTM (N33)	448948,04	5545905,89		0,1m	0,0m

Doba měření trvala přibližně 5 minut 10 vteřin a souřadnice jsou přesné na  $\pm 3,6$  cm. Ve směru osy  $x$  došlo k posunutí o 0,10 m a ve směru osy  $y$  zůstal bod zachován v původní lokaci.

### Vlčovací bod č. 5 „Chýně“

V obci Chýně byl zvolen pátý vlčovací bod. Umístěný byl ve středu betonové desky zakrývající zdroj elektrického vedení.

Obrázek č. 30: GCP Chýně



Zdroj: vlastní

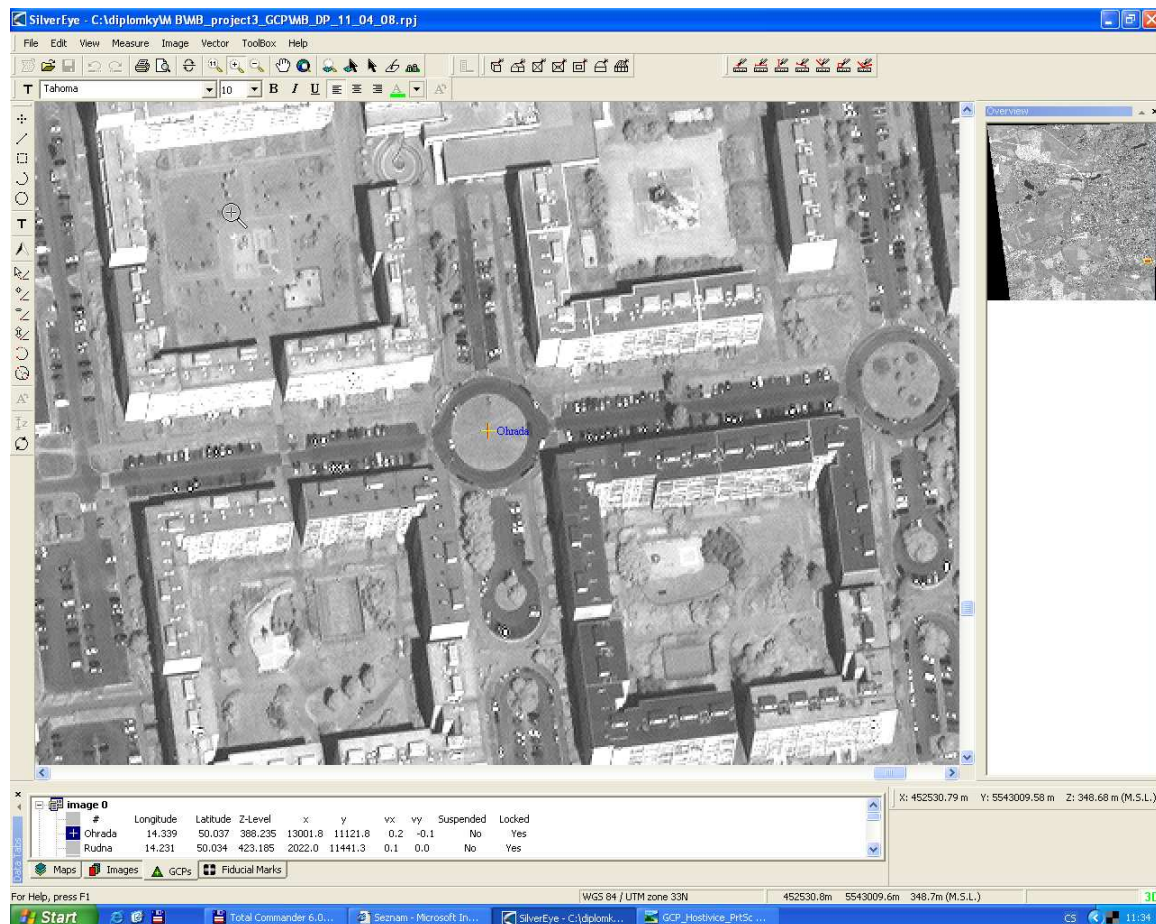
	$X (E)$	$Y (N)$	$\sigma$	$VX$	$VY$
WGS 84	14°13'59,97274"	50°03'46,70268"	0,013m		
UTM (N33)	445126,79	5545913,87		0,1m	0,0m

Doba měření trvala rovných 9 minut a souřadnice jsou přesné na  $\pm 1,3$  cm. Parametry posunutí jsou shodné jako u předchozího bodu, totiž 0,10 m ve směru osy  $x$  a k nulovému posunutí ve směru osy  $y$ .

### Vlčovací bod č. 6 „Ohrada“

Šestý vlčovací bod byl zvolen ve středu první kruhové křižovatky spojující ulici Přecechtělovu s ulicí Prusíkovou na pražském sídlišti Velká Ohrada.

Obrázek č. 31: GCP Ohrada



Zdroj: vlastní

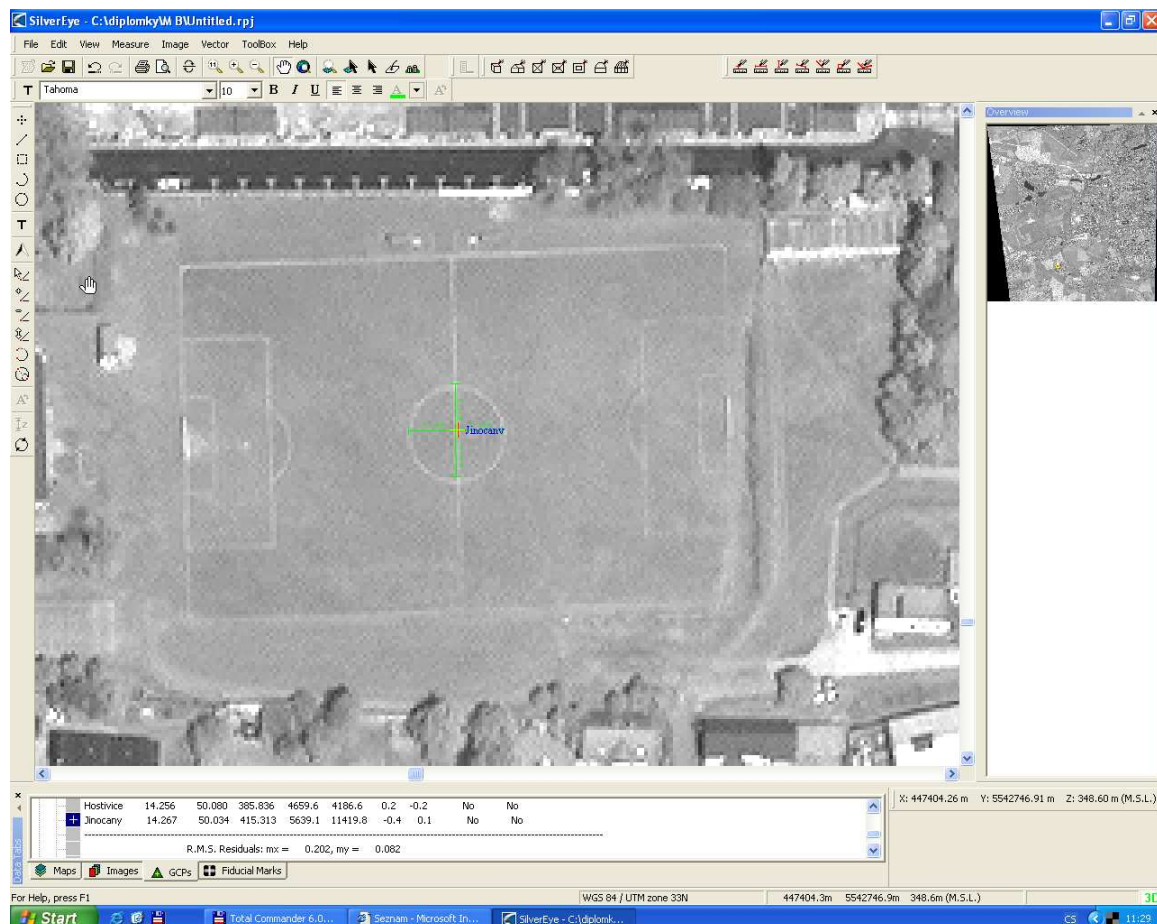
	$X (E)$	$Y (N)$	$\sigma$	$vx$	$vy$
WGS 84	14°20'18,67183"	50°02'12,37794"	0,054m		
UTM (N33)	452630,01	5542928,74		0,2m	-0,1m

Doba měření trvala 7 minut 25 vteřin a souřadnice jsou přesné na  $\pm 5,4$  cm. Ve směru osy  $x$  došlo k posunutí o 0,20 m a ve směru osy  $y$  o -0,10 m od původní lokace.

### Vlčovací bod č. 7 „Jinočany“

Měření tohoto bodu bylo provedeno nad středovou značkou centrální kružnice fotbalového hřiště v obci Jinočany.

Obrázek č. 32: GCP Jinočany



Zdroj: vlastní

	X (E)	Y (N)	$\sigma$	$v_x$	$v_y$
WGS 84	14°15'59,62595"	50°02'03,70648"	0,012m		
UTM (N33)	447474,42	5542709,01		-0,4m	0,1m

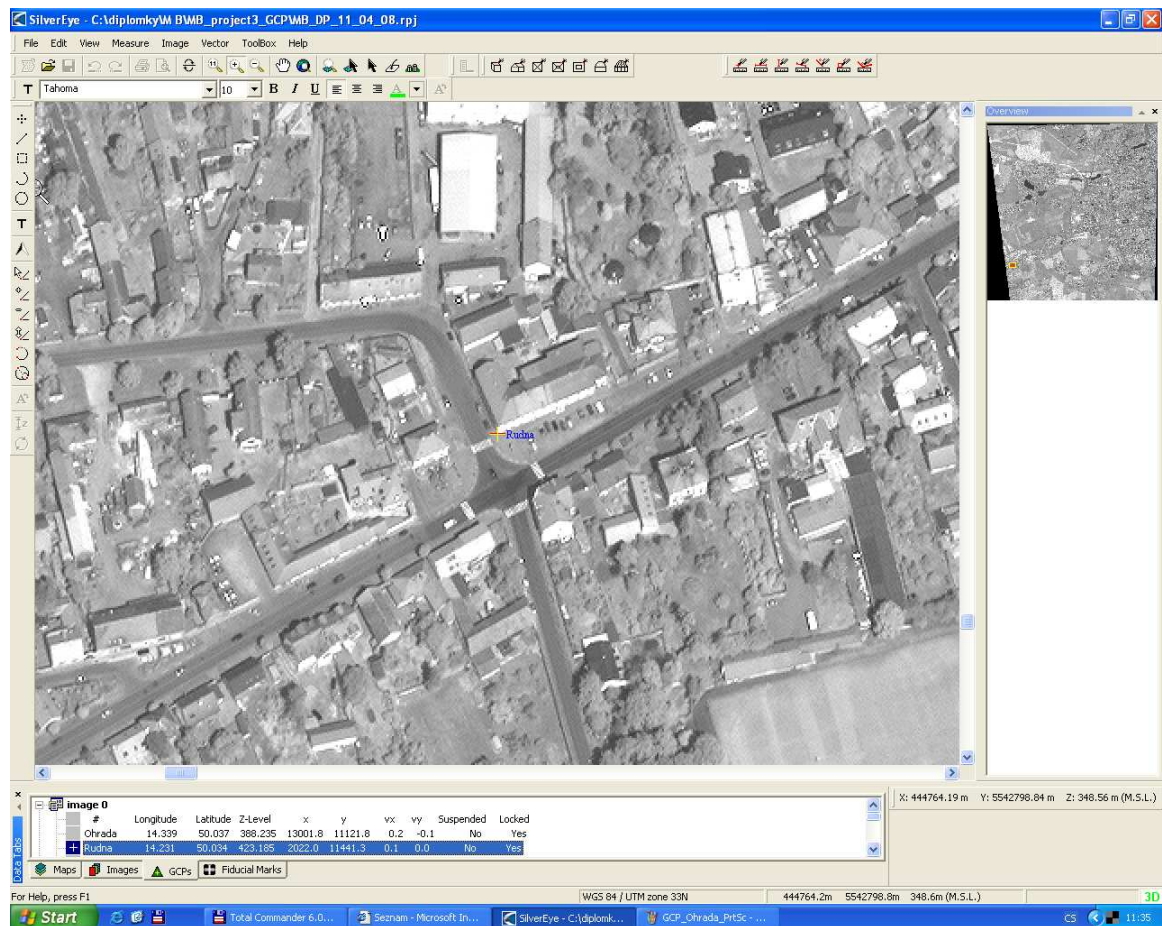
Doba měření trvala rovněž 7 minut 25 vteřin a souřadnice jsou přesné na  $\pm 1,2$  cm. Ve směru osy  $x$  došlo k posunutí o  $-0,40$  m a ve směru osy  $y$  o  $+0,10$  m od původní lokace.



### Vlčovací bod č. 8 „Rudná“

Měření posledního vlčovacího bodu bylo provedeno u paty rohu budovy na severní straně křižovatky ulic Karlovotýnská a Masarykova v obci Rudná.

Obrázek č. 33: GCP Rudná



Zdroj: vlastní

	$X (E)$	$Y (N)$	$\sigma$	$vx$	$vy$
WGS 84	14°13'52,32880"	50°02'02,29689"	0,024m		
UTM (N33)	444941,65	5542690,92		0,1m	0,1m

Doba měření trvala přesně 8 minut a souřadnice jsou přesné na  $\pm 2,4$  cm. Ve směru osy  $x$  došlo ke stejnému posunutí jako ve směru osy  $y$  a to o 0,10 m od původní lokace.

### **PŘÍLOHA Č. 3: SENZORY PRO JEDNOSNÍMKOVOU METODU**

<i>senzor</i>	<i>rozlíšení (PAN)</i>	<i>rozlíšení (MS)</i>	<i>Off-Nadir úhel</i>	<i>šířka pásu</i>	<i>výška letu</i>	<i>v provozu od</i>
<b>IKONOS</b>	0,82 - 1,0 m	3,2 - 4 m	26°	11,3 x 11,3 km	681 km	1999
<b>QuickBird</b>	0,61 - 0,72 m	2,44 - 2,88 m	25°	16,5 x 16,5 km	450 km	2001
<b>OrbView-3</b>	1 m	4m	45°	11 x 11 km	470 km	2003
<b>EROS B</b>	0,7 m	x		7 x 7 km	500 km	2006
<b>Kompsat-2</b>	1 m	4m		15 x 15 km	685 km	2006
<b>WorldView-1</b>	0,5 m	x	20°	17,6 x 14 km	496 km	2007
<b>GeoEye-1*</b>	0,41 m	1,64m	35°	15,2 x 15,2 km	684 km	?

\* předpokládané spuštění družice GeoEye-1 v roce 2008