

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE
Přírodovědecká fakulta
Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie



KOREGISTRACE DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ A LETECKÝCH MĚŘICKÝCH SNÍMKŮ

Coregistration of airborne laser scanning data and aerial images

Diplomová práce

Tomáš Pokorný

srpen 2013

Vedoucí diplomové práce: Ing. Markéta 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 Českých Budějovicích dne 25. srpna 2013

.....
Tomáš Pokorný

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D. za cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Arcdata Praha, s.r.o., se svolením společnosti Exelis Visual Information Solution, za zapůjčení software Envi 5, Zeměměřickému úřadu za zapůjčená data a Petri Rönnholmovi za poskytnutí dat z projektu EuroSDR.

Koregistrace dat leteckého laserového skenování a leteckých měřicích snímků

Abstrakt

Tato práce se věnuje koregistraci dat leteckého laserového skenování a leteckých měřicích snímků, porovnává využitelnost koregistračních metod v praxi. Teoretická část rozebírá koregistrační metody obrazových dat se zaměřením na data DPZ. Část práce se věnuje předzpracování dat před samotnou koregistrací a tvorbě DMP. Na základě teoretické části jsou dále vybrány vhodné metody pro koregistraci dat DPZ a následně aplikovány na datové sady poskytnuté z projektu EuroSDR a od ČÚZK. Aplikace je řešena formou programových skriptů v prostředí Matlab, kdy jsou realizovány jednotlivé fáze koregistračního procesu pomocí naprogramovaných funkcí. Možnosti využití, výhody a nevýhody metod jsou zmiňovány v dalších částech práce a to s důrazem na poměr odchylek vzhledem k potřebnému času pro výpočet. Porovnání koregistračních metod probíhá tvorbou vlastní komparační funkce, která umožňuje uživatelům zjednodušit volbu koregistrační metody. V diskuzní část je věnována možnostem rozšíření a problematickým částem v rámci celého procesu.

Klíčová slova: koregistrace, laser, skenování, snímky, fotogrammetrie, dálkový průzkum Země, souřadnice, sjednocení obrazu.

Coregistration of airborne laser scanning data and aerial images

Abstract

This thesis is dealing with the co-registration of aerial laser scanning and aerial images. Theoretical part with research of current methods puts emphasis on methods suitable for remote sensing datasets. Part of the thesis is about pre-processing data for co-registration and DSM production. Selection of co-registration methods for remote sensing is based on previous researches. Selected co-registration methods are applied on datasets from EuroSDR research project and ČÚZK dataset. Application is realised by programming codes and functions that were created for this purpose in Matlab. Possibilities of usage, advantages and disadvantages of methods are being mentioned in the next parts of the thesis with emphasis on time of the computation and final accuracy. The function programmed in Matlab allows comparison of co-registration methods and allows the user to decide which of the co-registration methods to use on input datasets. Discussion section describes the possibilities of method extensions and problematic parts across the whole co-registration process.

Keywords: co-registration, laser, scanning, images, photogrammetry, remote sensing, coordinate, image matching.

OBSAH

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK.....	8
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
1. ÚVOD	10
2. CÍLE PRÁCE	12
3. TEORETICKÝ RÁMEC.....	13
3.1 POUŽITÉ TECHNOLOGIE	13
3.1.1 <i>Letecké laserové skenování</i>	13
3.1.2 <i>Letecké měřické snímky</i>	14
3.2 SJEDNOCENÍ OBRAZU (IMAGE MATCHING).....	15
3.2.1 <i>Detekce prvků (feature detection/extraction)</i>	16
3.2.1.1 <i>Shodné oblasti (Area based methods)</i>	16
3.2.1.2 <i>Shodné prvky (Feature based methods)</i>	16
3.2.2 <i>Ztotožnění shodných prvků</i>	18
3.2.2.1 <i>Shodné oblasti (Area based methods)</i>	18
3.2.2.2 <i>Shodné prvky (Feature based methods)</i>	20
3.3.3 <i>Shrnutí metod</i>	22
3.4 HELMERTOVA TRANSFORMACE	23
4. PODKLADOVÁ DATA.....	25
4.1 DATA EUROSDR.....	25
4.1.1 <i>LLS</i>	25
4.1.2 <i>LMS</i>	25
4.2 DATA ČÚZK.....	26
4.2.1 <i>DMP1G</i>	26
4.2.2 <i>LMS</i>	26
4.3 PŘEDZPRACOVÁNÍ PODKLADOVÝCH DAT	26
5. METODIKA	30
5.1 OBRAZOVÁ KORELACE – IMAGE CORRELATION	30
5.2 SDÍLENÁ INFORMACE – MUTUAL INFORMATION	34
5.3 HAUSDORFFOVA VZDÁLENOST – HAUSDORFF DISTANCE	37
5.4 KOMPARAČNÍ FUNKCE.....	41
5.5 SUB-PIXELOVÁ PŘESNOST.....	41
5.6 HELMERTOVA TRANSFORMACE.....	44
6. VÝSLEDKY.....	46
7. DISKUZE.....	51
8. ZÁVĚR.....	56
SEZNAM ZDROJŮ DAT A INFORMACÍ.....	58
SEZNAM PŘÍLOH A TABULEK.....	63

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

ASCII – American Standard Code for Information Interchange

ČÚZK – Český úřad zeměměřický a katastrální

DMP – Digitální model povrchu

DMR – Digitální model reliéfu

DPZ – Dálkový průzkum Země

GNSS – Global navigation satellite system

IMU – Inertial measurement unit

LiDAR – Light detection and ranging

LLS – Letecké laserové skenování

LMS – Letecké měřické snímky

NIR – Near infrared

RGB – Red green blue color model

RMSE – Root mean square error

S-JTSK – Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální

UAV – Unmanned aerial vehicle

UTM – Universal transverse Mercator

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Příklad konverze části prvků vnější orientace v prostředí IDL	27
Obr. 2. Schéma tvorby DMP z dat LMS	27
Obr. 3. DMP z dat LMS v oblasti Českých Budějovic a Espoonlahti	28
Obr. 4. Schéma tvorby DMP z dat LLS	29
Obr. 5. DMP z dat LLS v oblasti Českých Budějovic	29
Obr. 6. DMP z dat LLS Leica a Optech v oblasti Espoonlahti	29
Obr. 7. Způsob ukládání výřezů sekundárního obrazu ve 3 dimenzionální matici	31
Obr. 8. Schéma ztotožnění pomocí korelačního koeficientu (Correlation-like method)	33
Obr. 9. Normalizovaný histogram z identických vstupů a z rozdílných vstupů	34
Obr. 10. Schéma ztotožnění pomocí sdílené informace (Mutual Information)	36
Obr. 11. Aplikace Cannyho hranového operátoru na DMP vytvořený z LLS s prahovými hodnotami 0.1, 0.4, 0.9	38
Obr. 12. Aplikace Cannyho hranového operátoru na DMP vytvořený z LMS s prahovými hodnotami 0.1, 0.2, 0.3	38
Obr. 13. Schéma ztotožnění pomocí Hausdorffovy vzdálenosti (Hausdorff distance)	40
Obr. 14. Schéma souřadnicového systému v obrazech	42
Obr. 15. Schéma lokálního souřadnicového systému ve výpočtu subpixelové přesnosti	43
Obr. 16. Schéma výpočtu subpixelové přesnosti v prostředí MATLAB	43
Obr. 17. Schéma výpočtu parametrů a reziduí Helmertovy transformace	45
Obr. 18. Aplikace interest operatorů [Jazayeri, 2008]	52
Obr. 19. Porovnání hranové filtrace u LMS a LLS Leica	53
Obr. 20. Problémová místa detekce u metody využívající korelační koeficient	54

KAPITOLA 1

Úvod

Tématem předkládané diplomové práce je koregistrace dat leteckého laserového skenování (LLS) a leteckých měřických snímků (LMS). Jelikož se v dnešní době velice rychle rozvíjí využívání dat z leteckého laserového skenování, je tedy přirozené kombinovat tato poměrně kvalitní, primárně neobrazová, data s daty obrazovými. Na druhou stranu se již příliš nezohledňuje kvalita fúze dvou diametrálně odlišných datových sad. Z dostupné literatury je patrné, že této otázce je v současné době věnováno značné úsilí a nebyla zatím nalezena optimální nebo univerzální metoda, která by poskytovala kvalitní výsledky fúze obecně. V roce 2011 proběhlo testování třinácti různých metod koregistrace v několika vědeckých institucích napříč Evropou. Ve výsledné zprávě se zmiňují u každé metody její výhody a nevýhody, což potvrzuje již výše uváděnou neuniverzálnost metod (Rönholm, 2011).

Hlavním cílem této práce je zjistit využitelnost koregistračních metod v praxi na základě fúze zvolených metod tvorbou programového skriptu s ohledem zejména na výkon, rychlost, polohovou přesnost a nenáročnost implementace.

Koregistrace dat leteckého laserového skenování a leteckých měřických snímků se obecně může provádět v třidimenzionálním prostoru. Další variantu představuje koregistrace v třidimenzionálním prostoru u bodového mračka a ve dvojdimenzionálním prostoru u leteckých měřických snímků. Poslední možností je koregistrace syntetických snímků vytvořených z bodového mračka s leteckými měřickými snímky pouze ve dvojdimenzionálním prostoru.

Je nutno brát v potaz, že v praxi většina institucí nebo soukromých společností nevlastní sálové superpočítače, tudíž je nutno uvažovat výkonovou náročnost výpočtů. U metody koregistrace v třidimenzionálním prostoru dochází k vysokým nárokům na výpočetní výkon a čas jelikož se zpracovávají poměrně rozsáhlá množství dat bodových mraček a měřických snímků. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno ke tvorbě koregistrační metody ve dvojdimenzionálním prostoru ze syntetických snímků. Mezi hlavní výhody dvojdimenzionální koregistrace můžeme zařadit zpracování algoritmy pro konvenční zpracování obrazu, což nabízí nepřeborné množství možností, jak dosáhnout požadovaných výsledků. V části věnující se rešerši koregistračních metod se nachází i další často používané metody se zhodnocením a vhodností jejich použití.

Koregistrace probíhá na několika datových sadách a to jak ze zahraniční oblasti, tak i z Česka. Data pro Finsko byla získána z projektu EuroSDR - High density image matching a zahrnují pobřežní

oblast obce Espoonlahti v blízkosti Helsinek. Data pro Českou republiku zapůjčil Český úřad zeměměřický a katastrální. Data pokrývají městskou zástavbu Českých Budějovic, jakožto komparativní prvek proti datovému souboru z obce Espoonlahti. Obě datové sady sestávají z mračna bodů získaného pomocí LLS a dále z panchromatických měřických snímků daných oblastí a barevných ortofot.

Výsledky porovnání koregistračních metod zajišťuje skript vytvořený v prostředí MATLAB. Zpracování vstupních dat zajišťuje softwarové vybavení společnosti ESRI a to v podobě programového balíku ArcGIS for Desktop 10.1 SP1, dále bylo pro zpracování leteckých měřických snímků využito nástrojů software ENVI 5.0 a PCI Geomatics. Pro konverzi laserových bodových mračen byl využit nástroj LasUtility a pro hlavní část práce, naprogramování veškerých koregistračních metod, sloužilo vývojové prostředí MATLAB.

KAPITOLA 2

Cíle práce

V této práci byly stanoveny dva hlavní cíle, kdy první z cílů představuje teoretický rozbor stávajících metod pro koregistraci obrazových dat. Přehled koregistračních metod pokrývá obecně různé datové typy a dále je přihlédnuto ke koregistračním metodám s využitím u dat získaných pomocí metod DPZ. Předkládané metody jsou pro lepší názornost rozloženy na tři samostatné části a to detekce, ztotožnění a transformace. Části věnující se detekci a ztotožnění představují hlavní část koregistrace jako celkového procesu. Transformační část je představována rozbohem nejpoužívanější transformace a to transformací podobnostní, též zvanou Helmertovou, kde jsou podrobněji uvedeny důvody jejího použití.

Druhý cíl spočívá v praktické ukázce vybraných koregistračních metod na různých datových sadách z domácí i zahraniční produkce. Zvolené metody budou uvedeny v praxi pomocí tvorby programového kódu v prostředí MATLAB. Jejich testování proběhne na datových sadách z projektu EuroSDR a to s různými vstupy z LLS. Metody budou též aplikovány na data získaná od ČÚZK pro následnou komparaci výsledků při různých datových vstupech. Využita bude metoda syntetických snímků vytvořených z digitálních modelů povrchu. První digitální model povrchu je vytvořen z panchromatických měřických leteckých snímků, respektive z upravených snímků v RGB spektru a druhý z bodových mračen z leteckého laserového skenování. Výhodou využití koregistrace pouze ve dvojrozměrném prostoru je nenáročnost na dobu zpracování a výkon hardware. Zároveň do koregistračního procesu vstupují data ve stejném formátu, v podobě obrazových dat, což eliminuje možnost zhoršení výsledků při použití vstupních dat ve špatném formátu. Výsledky metod budou porovnány z hlediska časové náročnosti na výpočet, výsledné polohové přesnosti po transformaci a jejich komplexního využití pro data DPZ. Důraz bude kladen na výsledky jednotlivých metrik ztotožňovací fáze před samotnou transformací dat. Diskuzní část práce se bude věnovat optimalizačním možnostem v rámci celého koregistračního procesu, které vyžadují hlubší zaměření na optimalizaci programového kódu jako takového. Přílohou část doplňují tabulky s výsledky a okomentované kódy jednotlivých koregistračních metod a doplňkových funkcí, které byly při testování vytvořeny a použity.

KAPITOLA 3

Teoretický rámec

3.1 Použité technologie

3.1.1 Letecké laserové skenování

Letecké laserové skenování (*Aerial laser scanning*) představuje metodu sběru dat v dálkovém průzkumu Země (DPZ), která využívá aktivního senzoru. Oproti pozemnímu skenování zde dochází k pohybu skenovací jednotky nad zájmovým územím či objektem. Pohyb zajišťují ve většině případů letadla či helikoptéry a v posledních letech dochází, vzhledem ke značnému snížení finanční náročnosti, k rychlému rozšiřování dálkově řízených bezpilotních skenovacích systémů (UAV) [Pavelka, 2011].

Aktivní prvek představuje emitor záření o vlnových délkách infračerveného spektra (1064 – 1540 nm) nebo v případě batymetrických aplikací modro-zeleného spektra (cca 530 nm). [Baltsavias, 1999]. Vlastnost aktivního snímání v sobě nese další z ne příliš vyzdvihovaných vlastností a to možnost měření i v nočních hodinách. Laserové skenery, které využívají principu přímého měření vzdálenosti (*Ranging scanner*) lze dělit v zásadě na tři základní typy. První možnost pro určení vzdálenosti využívá měření času letu laserového pulsu, kdy je vzdálenost vypočtena na základě rozdílu času vyslání a příjmu pulsu při známé rychlosti světla (*Time of flight*). Druhou variantu představuje výpočet pomocí hodnoty posunu fáze vyslané a přijaté vlny (*Phase-shift*). Poslední variantu tvoří využití interferometrie, kde je využíváno spíše měření změn vzdálenosti, než měření absolutní vzdálenosti (*Interferometry*) [Piatti, 2010]. Dalším možným dělením skenerů může být princip vychylování paprsku laseru, kdy je využíváno rotujícího hranolu či klopného zrcadla anebo spolehlivějšího a zároveň složitějšího řešení pomocí svazku optických vláken [Dolanský, 2004].

Výstup tvoří mračno bodů znázorňující zájmové území i se všemi objekty, které v čase skenování byly přítomny. V souvislosti s přijatým pulsem rozlišujeme body prvního a posledního odrazu nebo full-waveform variantu. Varianta full-waveform umožňuje detekci veškerých objektů, se kterými se laserový paprsek po vyslání střetne, což se dá následně využít při filtraci digitálního modelu povrchu (DMP) na digitální model reliéfu (DMR).

Co se týče polohové a výškové přesnosti, zde LLS naráží na hustotu skenovaných bodů na metr čtvereční. Hustota bodů je závislá na typu skeneru, výšce letu a též na využití bodového mračka. U LLS se pohybuje 5 – 120 bodů / m² zatímco u pozemních skenerů se jedná o několik řádů vyšší a to kolem 1 000 000 bodů / m² [Pirotti, 2013]. Nižší hodnota u LLS je zapříčiněna následným objemem dat a zejména složitějším post-processingem oproti terestrickému skenování, neboť se musí brát do úvahy proměnná pozice v rámci pohybu skenující jednotky a to v prostorových souřadnicích tak i v osách rotací. Výsledná polohová přesnost u LLS se tedy pohybuje v hodnotách jednotek až desítek cm [Csanyi, 2007], i když je samozřejmě závislá na mnoha dalších faktorech jako kalibrace, použití GNSS, IMU a použitím softwaru apod. Největší nevýhodou LLS z hlediska sjednocení obrazu (*image matching*) tvoří problematika hran naskenovaných objektů. Jelikož výstup tvoří mračno diskretních bodů a ne kontinuální obraz, je problém detekovat správně ostré hrany například u budov. Možností je doplnění terénních hran z pozemního měření anebo předdefinované modely budov [Hofman, 2008].

3.1.2 Letecké měřické snímky

Letecké měřické snímky představují tradiční metodu dálkového průzkumu Země a to jako součást širších metod fotogrammetrie, neboť tyto metody jsou využívány v menší míře i v pozemních aplikacích v podobě pozemních měřických snímků [Váňová, 2009] [Böhm, 2002]. Hlavní prostředek pro získávání dat tvoří letecké měřické komory, které v minulosti využívaly jako záznamového média filmového pásu. S rozvojem digitální fotografie se v dnešní době využívají převážně letecké měřické komory digitální, neboť odpadá zdoluhavý a finančně náročný proces chemického zpracování filmových pásů [Schenk, 2005].

Vzhledem k nutnosti přiřazení prostorové složky získaným snímkům, je nutno u každé letecké měřické komory získat informace o jejích prvcích vnitřní a vnější orientace. Prvky vnitřní orientace tvoří charakteristiku geometrie paprsků uvnitř komory a definují vztah mezi rovinou obrazu a středem promítání. Jsou tvořeny souřadnicemi hlavního snímkového bodu, který je průmětem středu promítání na rovinu obrazu a v idealizované situaci by se nacházel ve středu obrazu. Další prvek tvoří parametry distorze objektivu, kdy u LMS je uvažována vždy radiální. Tangenciální distorze se do zpracování přidává spíše u pozemních fotogrammetrických aplikací. Distorze a další vady objektivů jsou způsobeny použitím více optických členů, přičemž se jejich drobné vady kumulují. Poslední prvek tvoří tzv. konstanta komory, která představuje vzdálenost mezi středem promítání a rovinou obrazu. Zjištění těchto parametrů zajišťuje kalibrace komor. Prvky vnější orientace určují polohu kamery v referenčním souřadnicovém systému a jsou tvořeny třemi objektovými souřadnicemi středu promítání a třemi hodnotami rotací [Grussenmeyer, 2008]. Rovnice kolinearity definují potřebný vztah mezi snímkovými a objektovými souřadnicemi [Potůčková, 2004].

Rovnice kolinearity

$$x' = x'_0 - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)}$$

$$y' = y'_0 - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)}$$

$$X = X_0 - (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{11} \cdot (x' - x'_0) + r_{12} \cdot (y' - y'_0) + r_{13} \cdot c}{r_{31} \cdot (x' - x'_0) + r_{32} \cdot (y' - y'_0) + r_{33} \cdot c}$$

$$Y = Y_0 - (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{21} \cdot (x' - x'_0) + r_{22} \cdot (y' - y'_0) + r_{23} \cdot c}{r_{31} \cdot (x' - x'_0) + r_{32} \cdot (y' - y'_0) + r_{33} \cdot c}$$

Matice rotace

$$R_{\omega\phi\kappa} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cdot \cos \kappa & -\cos \phi \cdot \sin \kappa & \sin \phi \\ \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa & -\sin \omega \cdot \cos \phi \\ \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \sin \phi \end{pmatrix}$$

Vzhledem k využívání pasivního senzoru dochází k omezení snímání povrchu pouze na denní dobu. Na druhou stranu, oproti LLS, je možné využít více spekter záření pro získání různorodějších informací. LMS nachází své využití zejména ve stereofotogrametrii, kdy při současném pozorování snímků, nenulové horizontální paralaxe a nulové vertikální paralaxe dochází ke stereoskopickému vjemu. U stereodvojic snímků je možnost získat prvky vnější orientace pomocí rovnic kolinearity anebo víceřadovým způsobem, pomocí získání relativní a poté absolutní orientace na základě vlíčovacích a spojovacích bodů. Relativní orientace má za úkol odstranit vertikální paralaxy a vytvořit tak stereomodel, který následně za pomoci absolutní orientace bude umístěn v geodetickém souřadnicovém systému. Je vhodné dodržet rovnoměrné rozmístění vlíčovacích bodů, aby nedošlo k chybnému určení rotací. Další možností určení prvků vnější orientace představuje přímé měření při snímání, kdy se kombinuje záznam dat z letecké měřické komory, GNSS a IMU a následně dochází k transformaci lokálních souřadnicových systémů do námi požadovaného geodetického [Wegmann, 2004].

3.2 Sjednocení obrazu (Image matching)

Pojem sjednocení obrazu, častěji nazývaný anglickým termínem *image matching*, představuje soubor několika fází zpracování obrazu. Cílem tohoto procesu je ve výsledku přímá polohová komparace různých obrazových vstupů za pomoci automatizovaných metod. Respektive úprava jedné datové sady tak, aby její poloha následně odpovídala stejným prvkům v datové sadě druhé. Proces sjednocení obrazu můžeme rozdělit v podstatě na tři základní fáze, kdy každá z nich může probíhat automaticky a je podmíněna vlastnostem vstupních datových sad. Tyto fáze tvoří:

- detekce
- ztotožnění
- transformace

V části detekce dochází k nalezení shodných prvků v obrazech, kdy je snaha o co největší automatizaci procesu, zejména při detekci většího množství prvků. Fáze ztotožnění si klade za cíl nalezení vztahů mezi shodnými prvky, kdy je možné konstatovat, že dochází obecně k výpočtu metriky, která určuje míru shodnosti mezi nalezenými prvky. Poslední fáze zajišťuje, na základě vypočtených parametrů, samotnou transformaci dat, tak aby byly všechny datové sady umístěny polohově ve shodném místě.

3.2.1 Detekce prvků (feature detection/extraction)

Nejčastěji je využíváno manuálního výběru prvků, avšak tato činnost se při vysokém objemu dat a hledaných prvků stává časově neúnosnou. Je tedy přikročeno k automatizaci, kdy se vyhledávají shodné oblasti anebo konkrétní prvky. Zpravidla bývají vyhledávány významné plochy (*areas*), homogenní objekty (*region features*), hrany (*edge features*), linie (*line features*), body (*point features*) a rohy (*corner features*).

3.2.1.1 Shodné oblasti (Area based methods)

Při využití shodných oblastí se krok, kdy jsou detekovány jednotlivé oblasti, zpravidla integruje do samotného ztotožnění. Detekce je tedy podrobněji popsána až v části věnující se ztotožnění prvků.

3.2.1.2 Shodné prvky (Feature based methods)

V těchto metodách se uplatňuje vyhledávání shodných prvků na základě jejich jedinečnosti. U jednotlivých prvků se předpokládá jejich časová invariance, neboť čím vyšší invariance, tím i vyšší výsledná přesnost ztotožnění a vyšší robustnost celého procesu. Též se bere v potaz rozlišitelnost prvků na referenčním i referencovaném obraze a jejich rozptýlení. Obecně se při vyhledávání prvků neberou v potaz samotné hodnoty intenzity a barvy v pixelech, neboť při vzniku dvou obrazů většinou panují jiné podmínky, tudíž i výsledné hodnoty intenzity záření se liší.

Oblasti (Region features)

Využívají se v případě neměnných ploch s výraznou hranicí, kdy vlastnosti pixelů uvnitř této plochy se nemění. Základní myšlenka těchto metod tkví v segmentaci obrazu na ucelené regiony, kdy se využívají jak šedotónové obrazy, tak barevné kompozity. Vysegmentované regiony podléhají dalšímu zpracování a to selekci požadovaných regionů a dále vyhledání konkrétních detailů. Selekcce požadovaných regionů může probíhat na základě zjišťování pravoúhlosti, sklonu, či hustotě vnitřních linií. Oproti konvenčním hranovým filtracím zde nedochází ke vzniku trhlin apod. [Jia, 2007].

Hrany (Edge features)

Před použitím jakékoliv metody je nutné si uvědomit, co představuje linii, či hranu. V šedotónovém obraze se jako hrana vnímá velká změna intenzity záření, což si při převodu do trojdimenzionálního prostoru můžeme představit jako vysoký nárůst či pokles sklonu [Szeliski, 2011].

a) Při vyhledávání linií se v prostorové doméně uplatňují konvenční metody pomocí hranových operátorů, které využívají hledání maxima první derivace. Sobelův operátor, kde se vypočítává derivace z centrálního a okolních bodů.

$$h = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Využívá se zejména pro detekci vodorovných a svislých hran. Cannyho operátor na vstupu eliminuje šum v obraze pomocí Gaussova filtru, dále využívá konvenční hranové filtry (Sobelův, Robertsův, Prewittové), kdy se zjišťuje gradient a směr hrany. Následuje vyhledání nejvyšší hodnoty gradientu a odfiltrování přebývajících hodnot. Robertsův operátor využívá detekci pouze v jednom bodě.

$$h = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Náchylnost na šum jest extrémní, tudíž se v dnešní době téměř nevyužívá [Janda, 2008] [Szeliski, 2011].

b) průchod druhých derivací nulou

Laplaceův operátor díky využití druhé derivace jasně definuje hrany, avšak často právě dochází k detekci falešných hran. Pro odstranění tohoto jevu se doporučuje rozostření obrazu před samotnou filtrací.

Marr-Hildreth operátor se využívá u obrazu s velkými a častými změnami hodnot jasu. Vyhledávání hran probíhá ve všech směrech. Citlivost na šum se redukuje kombinací s vyhlazovacími filtry, kdy nesmí dojít k přílišnému vyhlazení, aby byly zachovány hrany a na druhou stranu ani k příliš jemnému vyhlazení, aby došlo k odstranění šumu. Výsledné hrany vždy tvoří uzavřené polygony [Szeliski, 2011].

Linie (Line features)

V reálném světě reprezentují hrany spíše přírodní jevy, zatímco čisté linie jsou přiřazeny antropogenním prvkům. Detekce přímých linií tak může být nápomocna například při detekci budov nebo analýze tištěného písma. Základ tvoří simplifikace rozložitelností křivky na jednotlivé liniové úseky. Mezi metody pro detekci linií patří Houghova transformace, která pracuje s hranami, které obsahují podobné úběžnicové body. Další metoda algoritmus Random Sample Consensus (RANSAC)

v principu náhodně vybírá páry hran pro vytvoření hypotézy, zda tvoří linii, či nikoliv a testuje na základě geometrické podobnosti, kolik a jaké další hrany do této linie spadají [Szeliski, 2011].

Body (Point features)

Bodové prvky patří mezi nejčastěji využívané v metodách ztotožnění obrazu. Standardně se definují pomocí maxim funkcí ve frekvenční doméně, průsečíků linií (například v cestní síti), inflexních bodů křivek, centroidů polygonů či rohů. Využívá se dvojího přístupu k vyhledávání, kdy se vyhledají v referenčním obraze prvky, které mohou být vyhledány pomocí korelace či metody nejmenších čtverců anebo se vyhledají prvky v obou obrazech a poté na základě jejich vlastností dochází k jejich ztotožnění [Szeliski, 2011].

Rohy (Corner detection)

Detekce rohů se svojí složitostí de facto může vyčleňovat jako samostatná skupina v detekci bodových prvků. Mezi nejrozšířenější operátory pro detekci rohů můžeme zařadit Moravcův, Harris & Stephens, SUSAN a Förstnerův operátor. Moravcův operátor definuje rohový bod jako bod, kdy se v jeho okolí výrazně mění hodnota intenzity v každém směru. Problém při použití tohoto operátoru tkví v detekci malých ploch jako rohů. Harris & Stephens na rozdíl od Moravcova operátoru rozlišuje jak rohové body, tak i hrany, čímž zvyšuje pravděpodobnost správného určení rohu. Na druhou stranu je tato metoda více náročná na výpočetní výkon. Algoritmus Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus (SUSAN) vypočítává jas v okolí bodu a porovnává s jasným zkoumaného bodu, kdy není použito klasické čtvercové masky, ale kruhové. Rozhodnutí o klasifikaci bodu jako rohu probíhá na základě porovnání jasu ve vypočtené oblasti (USAN), kdy nejmenší plocha oblasti USAN je definována jako okolí rohového bodu, který tvoří centroid této oblasti. Förstnerův operátor využívá podobné měření rohů jako Harris & Stephens a dosahuje i lepších výsledků, na druhou stranu se ještě více zvyšují nároky na výpočetní výkon. Rohových operátorů existuje nepřehledné množství, které se často liší jen detaily, vždy je však nutné volit kompromis mezi přesností a náročností na výpočetní výkon [Jazayeri, 2008] [Ryba, 2008] [Hýna, 2007] [Kaněčka, 2007].

3.2.2 Ztotožnění shodných prvků

3.2.2.1 Shodné oblasti (Area based methods)

Základ těchto metod tkví v použití plovoucího vyhledávacího okna nad hlavním obrazem, kdy se využívá různých metod pro vyhledání podobných objektů v obraze. Samotné využití vyhledávacího okna zabraňuje možnosti vyhledání shodných objektů při složitější deformaci obrazu, než je translace. Taktéž se vedou diskuze nad tvarem použitého okna, mezi nejčastěji používanými patří čtverec či kruh.

K mnohým problémům dochází při ztotožnění hladkých povrchů, kdy tyto metody nemají možnost zaznamenat nějaký záchytný prvek. Mezi hlavní výhody patří snadná implementace do softwarového řešení a možnosti modifikace.

Korelace (Correlation-like methods)

Tyto metody jsou založeny na výpočtu korelačního koeficientu (normalized cross correlation) hodnot pixelů, kdy je v referenčním (base, reference, primary) a referencovaném (warp, sensed, secondary) obraze vytvořeno čtvercové okno, pro které je korelační koeficient počítán.

$$C(A, B) = \frac{\sum_{ij} (a_{ij} - \text{průměr}(A)) \cdot (b_{ij} - \text{průměr}(B))}{\sqrt{\sum_{ij} (a_{ij} - \text{průměr}(A))^2 \cdot \sum_{ij} (b_{ij} - \text{průměr}(B))^2}}$$

Výsledné pixely s největší hodnotou korelačního koeficientu jsou považovány za shodné prvky. Dosažení sub-pixelové přesnosti zajišťuje interpolace vypočtených hodnot korelačního koeficientu. Při větších deformacích obrazu se využívá výpočtu korelačního koeficientu pro každou geometrickou transformaci. Sequential similarity detection algorithm (SSDA) jakožto metoda podobná Correlation-like, využívá výpočtu sumy vzdáleností mezi hledaným a referenčním pixelem ve vyhledávacím prostoru. Při dobré shodě nabývá suma minimálních hodnot, zatímco se zvyšujícími se odchylkami dochází k výraznému nárůstu. Pro přijetí nebo zamítnutí shody se využívá prahové hodnoty, která se volí buď konstantní anebo proměnná [Zítová, 2003] [Le Moigne, 2011] [Majumdar, 2000] [Pratt, 1973].

Sdílená informace (Mutual information methods)

Tato skupina metod se nejčastěji využívá k registraci multimodálních dat. De facto se měří statistická závislost mezi dvěma daty. MI mezi 2 náhodnými veličinami X a Y je zjištěna dle vztahu:

$$MI(X, Y) = H(Y) - H(Y|X) = H(X) + H(Y) - H(X, Y),$$

kde $H(X) = -E_X(\log(P(X)))$ reprezentuje entropii náhodné veličiny a $P(X)$ reprezentuje pravděpodobnost statistického rozdělení veličiny X. Všechny metody z této skupiny se snaží docílit maximalizace MI(X,Y) za použití různých přístupů. Díky automatické registraci bez zásahu operátora našly tyto metody využití zejména v oblasti medicíny a to především u snímků z magnetické rezonance [Zítová, 2003] [Pluim, 2003].

Fourierův rozvoj (Fourier methods)

Základ tvoří Fourierova transformace, kde se jedná o transformaci z prostorové domény do domény frekvenční a to za pomoci vztahu:

$$F(u, v) = \frac{1}{mn} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{m} + \frac{vy}{n})}$$

V praxi se ve frekvenční doméně, na základě korelace, vypočtou hodnoty translace, rotace a měřítka a následně pomocí metody nejmenších čtverců dochází k minimalizaci odchylek (Mean square differences) ve fázové složce obrazu. Následuje inverzní transformace do prostorové domény za pomoci vztahu:

$$f(x, y) = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} F(u, v) e^{j2\pi(\frac{ux}{m} + \frac{vy}{n})}$$

Uplatnění této metody tkví zejména při ztotožňování obrazů o větším datovém objemu, neboť oproti konvenční korelaci dosahuje metoda výsledků mnohem rychleji [Zítová, 2003] [Tseng, 1997] [Potůčková, 2012] [Fitch, 2005] [El-Bakry, 2009].

3.2.2.2 Shodné prvky (Feature based methods)

Pro přesnější ztotožnění obrazu může být využito kromě částí obrazu i konkrétní prvky. Zpravidla se využívají body (samostatné, koncové, středové (polygonů, linií, shluků)), kdy se na základě prostorových vztahů či deskriptorů vyhledávají shodné prvky v obou obrazech.

Prostorové vztahy (Methods using spatial relations)

Mezi nejčastěji využívané metody z této skupiny můžeme zařadit metodu shluků. Základní myšlenku představuje snaha ztotožnění bodů, které jsou propojeny abstraktními liniemi, přičemž pro každý pár bodů z referenčního a referencovaného snímku jsou vypočteny parametry transformace a reprezentovány v podobě bodů, které se následně vizualizují ve čtyř-dimenzionálním prostoru (měřítka, rotace, translace v ose x, translace v ose y), kdy body, které představují nejvyšší počet prvků, se zformují do clusteru. Centroid clusteru představuje nejpravděpodobnější vektor parametrů shody. Pro urychlení této poměrně časově náročné metody je možné provádět vyhledání shodných bodů pouze ve dvojdimenzionálním prostoru, za použití pouze měřítka a rotace [Zítová, 2003] [Chang, 1997].

Neměnné deskriptory (Methods using invariant descriptors)

K dalším možnostem nalezení vztahů mezi jednotlivými prvky patří vyhledávání deskriptorů jednotlivých prvků, kde je důležité, aby byly dodrženy podmínky neměnnosti, jedinečnosti, stability a nezávislosti. Dvojice prvků z referencovaného a referenčního obrazu, které vykazují nejvíce podobných neměnných deskriptorů, jsou vyhodnoceny jako korespondující si páry. Volba deskriptorů závisí na charakteristice vybraných prvků a geometrické deformace. Jakožto nejjednodušší možnost volby deskriptoru se nabízí samotná hodnota intenzity pixelů, kdy spočteme korelační koeficient, který

bude omezen na blízké okolí prvku. Nejčastěji se jako prvky používají uzavřené polygony (closed boundary regions), v menší míře se přechází na řetězcové reprezentace kontur, vektory apod. Použití nejintuitivnějších deskriptorů však často nesplňuje některé z podmínek invariance. V exaktnějších metodách se využívá například výpočtů úhlů mezi jednotlivými prvky, rozostření snímků a následná registrace, metody SIFT a MSOP využívající algoritmu RANSAC [Bartoli, 2007] [Brown, 2005].

Pyramidy (Pyramid & wavelets methods)

Pyramidální přístup je aplikován zejména při zpracovávání datově objemnějších snímků. Princip spočívá ve vyhledávání prvků v sub-oknech, které prostorově zabírají menší místo, než full-size okna. Mezi hlavní výhody těchto metod patří snížení hardwarové zátěže při následné korelaci. Postupuje se vždy od nižšího rozlišení k vyššímu, kdy ke zhoršení rozlišení bývají často využívány Gaussovo pyramidy (Gaussian pyramids). Mezi další výhody těchto metod patří fakt, že v prvotních fázích při horším rozlišení dojde k rozpoznání větších objektů a následné korelaci, a při zvyšování rozlišení se již pouze doladují detaily na základě rozeznání menších objektů. Nevýhodou může být, pokud se nenalezne shoda prvků na vyšší úrovni, nepokračuje se ve hledání shody ani na nižších úrovních. Pro další úsporu výpočetního výkonu mohou být tyto metody doplněny o metody wavelet, kdy se jedná o filtraci frekvenčních složek v časo-frekvenční doméně obrazu. V základu dochází k rozložení obrazu na jednotlivé funkce, kdy jsou ponechány pouze frekvence v okolí hlavní nosné frekvence, čímž dojde de facto ke kompresi obrazu, avšak při zachování důležitých informací [Brown, 2005] [Smutný, 1999] [Walker, 2006].

Bodové vzorky (Point pattern matching methods)

Tyto metody jsou využívány zejména v algoritmech pro zjištění shody otisků prstů či v detekci nových objektů na hvězdné obloze, jak bylo naznačeno v literatuře [Mount, 1998], je možné využít těchto přístupů i v dálkovém průzkumu Země. V těchto metodách se používají dva přístupy, kdy při prvním je využíváno Delaunayovy triangulace. Při využití Delaunayovy triangulace dochází po extrakci významných neměnných bodů k výpočtu Voronoiovy teselace, která rozdělí prostor roviny množiny bodů na polygony, které splňují podmínku minimální vzdálenosti v celé ploše polygonu k centrálnímu bodu. Dále se vytvoří trojúhelníkový grid, kdy je nutné eliminovat trojúhelníky s příliš ostrými úhly, neboť by zde mohlo docházet při sjednocení obrazu k zvětšení chyb. Za pomoci indexování jsou shodné body vyhledány v druhém obraze a verifikace probíhá výpočtem překryvu triangulační sítě [Bebis, 1999]. Druhý přístup je založen na výpočtu Hausdorffovy vzdálenosti, která představuje míru podobnosti mezi dvěma množinami P a Q . Vzdálenost $h(P, Q)$ bude malá, pokud každý prvek P_i bude podoben prvku Q_i .

$$h(P, Q) = \max \min \|pq\|$$

Kdy $\|pq\|$ představuje Euklidovskou vzdálenost mezi body p a q . Cílem tedy je spočítat parametry transformace, která bude minimalizovat $h(P, Q)$. Již z této definice je patrná náchylnost na odlehlá měření, je tedy vhodné upravit použití Hausdorffovy vzdálenosti například o f -kvantil, kdy není vyhledáváno 100 % minimální vzdálenosti, ale dochází zde k redukci vyhledáním f -kvantilu ze souboru minimálních vzdáleností.

$$h^f(P, Q) = f \min \|pq\|$$

Hausdorffova vzdálenost je též orientovaná.

$$h(P, Q) \neq h(Q, P)$$

Obecně standardní Hausdorffova vzdálenost není v praxi příliš využívána, ve většině případů dochází k její modifikaci například tvorbou vlastních funkcí využívajících Hausdorffovu vzdálenost [Mount, 1998] [Cho, 2005] [Horák, 2010].

3.3.3 Shrnutí metod

Z uvedené rešerše vyplývá vhodnost použití několika metod a to konkrétně: metody využívající korelaci, jakožto zástupce tradičního přístupu ve ztotožnění obrazu. Metody využívající sdílené informace z důvodu nutnosti nezasahovat do procesu a vhodnosti pro snímky z různých senzorů. Tato vlastnost činí tuto metodu vhodnou pro širší spektrum uživatelů, kteří mnohdy využívají koregistraci pouze jako dílčí část v řešení komplexnějších problémů. Též kvůli dosahované polohové přesnosti. *Point pattern – f-quantile Hausdorff distance* jakožto alternativní metody, která se v DPZ příliš často neuplatňuje a jejíž časová a hardwarová náročnost by měla být nejmenší. Vzhledem k náchylnosti Hausdorffovy vzdálenosti na šum v datech, je vhodné tuto metriku modifikovat například výpočtem kvantilů.

Co se týče aktuálního využívání těchto metod ve zpracování obrazu z dat dálkového průzkumu Země, nejrozšířenějšími metodami jsou metody s pomocí korelace, kdy v praxi většina metod ztotožnění využívá nesčetného množství variant, využívajících této myšlenky. Na druhou stranu při přímém porovnání korelačních metod s metodami sdílené informace je tento fakt značně zářející, neboť metody sdílené informace obecně dosahují lepších výsledků v oblasti ztotožnění, což potvrzuje i Wang, Zhang, 2008. Zde je kladen důraz i na typ povrchu při ztotožnění, nicméně u rurálních oblastí jsou obecně výsledky koregistrace horší. Metody využívající sdílené informace dosahují správných výsledků u 70 – 80 % pixelů, zatímco u korelační metody pouze 60 %. V úvodu byla zmiňována data a metodiky z projektu EuroSDR, kde byla testovací data z oblasti městské zástavby. Při porovnání předchozích dvou metod v urbanizovaných oblastech je rozdíl správného ztotožnění pixelů též vysoký a to konkrétně 95 % pro metody využívající sdílené informace a 85 % pro korelační metody. Metoda využívající Hausdorffovu vzdálenost (*Point pattern matching method*), kterou zmiňuje Mount, Netanyahu, 1998 vykazovala maximálně 10 % chybných hodnot a to pouze v několika případech, většinou se chybovost pohybovala pod hranicí 2 %. Na druhou stranu implementace této metody je ze

zmiňovaných tří nejobtížnější, je tedy otázka, zda volit jednodušší metody s menším procentuálním úspěchem ztotožnění, nebo metodu s relativně lepší polohovou přesností. Taktéž je zmiňována vyšší náchylnost na šum. Co se týká časových nároků na výpočet, u korelačních metod dochází ke kvadratickému nárůstu času výpočtu se zvětšujícím se vyhledávacím oknem [Varjo, 2011]. Při porovnávání náročnosti na čas výpočtu by měly dosahovat nejlepšího času metody využívající Hausdorffovu vzdálenost, neboť ta je počítána pouze pro extrahované prvky, zatímco u korelačních metod se počítá metrika pro celý obraz.

3.4 Helmertova transformace

Poslední část sjednocení obrazu (*image matching*) představuje transformační funkce pro souřadnicové systémy v rovině. Tato transformace byla zvolena na základě předpokladu, podobnosti datových sad LMS a LLS. Nebylo předpokládáno, že by se lišila změna měřítka v každém směru jinak, jako tomu uvažuje transformace afinní. Základní vlastnost tvoří konformita transformace, kdy nedochází ke zkreslování křivek a uvažují se pouze rotace, posun a změna měřítka v obou osách shodně [Fulín, 2003]. Využití nachází zejména v transformacích mapových listů či ve zpracování geodeticky zaměřených bodových polí. Důležitou podmínkou pro správnou transformaci je co nejrovnoměrnější rozložení identických bodů v rámci zkoumané oblasti. Budeme-li brát v potaz výše zmíněné změny v rotacích, posunu a měřítku, můžeme považovat transformaci za podobnostní čtyřprvkovou – rotace, posun v osách X , Y a změna měřítka [Vejrová, 2008]. Výpočet využívá dvojici identických bodů, kdy X', Y' představují souřadnice identického bodu v neznámém souřadnicovém systému a X, Y ve známém souřadnicovém systému. Parametr q reprezentuje hodnotu měřítka, R tvoří rotační matici a Δ jsou translace v jednotlivých směrech, respektive souřadnice výstupní souřadnicové soustavy.

$$X = q \cdot R \cdot X' + \Delta$$

Rovnice lineární transformace

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = q \cdot \begin{pmatrix} \cos \omega & -\sin \omega \\ \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{pmatrix}$$

Upravené rovnice podobnostní transformace

V upravené podobně transformační rovnice představuje matice rotace úhlu ω , o který jsou obě soustavy vzájemně pootočený. Parametr měřítka q zůstává nezměněn. Matice X' se skládá z dílčích souřadnic x', y' , které představují souřadnice identického bodu v neznámém souřadnicovém systému. Poslední matice translací je též rozložena na dílčí translace v každém směru, tzn. Δ_x, Δ_y . Z výše uvedených rovnic vyplývá výskyt čtyř neznámých parametrů ($q, \omega, \Delta_x, \Delta_y$), kdy k jejich určení je třeba nejméně čtyř lineárně nezávislých rovnic a tím tedy dvou identických bodů pro jednoznačné určení

parametrů transformace. Výpočet jednotlivých prvků transformace byl proveden nadbytečným počtem identických bodů, kdy bylo přistoupeno k řešení pomocí metody nejmenších čtverců a linearizací rovnice oprav.

$$v = A \cdot dx + l'$$

Linearizovaná rovnice oprav

Kdy v představuje rezidua, matice A je tvořena souřadnicemi vstupního souřadnicového systému, měřítkovým koeficientem a rotací, dx jsou hledané koeficienty a l' vektor souřadnic v koncovém souřadnicovém systému s rotací a měřítkovým koeficientem. Kdy po dosažení hodnot souřadnic, rotací a translací můžeme rovnice upravit pro výpočet pomocí metody nejmenších čtverců do maticového tvaru.

$$dx = -(A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot L$$

Upravená rovnice oprav pro metodu nejmenších čtverců

respektive:

$$\begin{pmatrix} v_1^X \\ v_1^Y \\ v_2^X \\ v_2^Y \\ v_3^X \\ v_3^Y \\ v_4^X \\ v_4^Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & q_0(-\sin \omega_0 X_1 + \cos \omega_0 Y_1)(\cos \omega_0 X_1 + \sin \omega_0 Y_1) \\ 0 & 1 & q_0(-\cos \omega_0 X_1 - \sin \omega_0 Y_1)(-\sin \omega_0 X_1 + \cos \omega_0 Y_1) \\ 1 & 0 & q_0(-\sin \omega_0 X_2 + \cos \omega_0 Y_2)(\cos \omega_0 X_2 + \sin \omega_0 Y_2) \\ 0 & 1 & q_0(-\cos \omega_0 X_2 - \sin \omega_0 Y_2)(-\sin \omega_0 X_2 + \cos \omega_0 Y_2) \\ 1 & 0 & q_0(-\sin \omega_0 X_3 + \cos \omega_0 Y_3)(\cos \omega_0 X_3 + \sin \omega_0 Y_3) \\ 0 & 1 & q_0(-\cos \omega_0 X_3 - \sin \omega_0 Y_3)(-\sin \omega_0 X_3 + \cos \omega_0 Y_3) \\ 1 & 0 & q_0(-\sin \omega_0 X_4 + \cos \omega_0 Y_4)(\cos \omega_0 X_4 + \sin \omega_0 Y_4) \\ 0 & 1 & q_0(-\cos \omega_0 X_4 - \sin \omega_0 Y_4)(-\sin \omega_0 X_4 + \cos \omega_0 Y_4) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \\ \Delta_\omega \\ \Delta_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q_0(\cos \omega_0 X_1 + \sin \omega_0 Y_1) - X'_1 \\ q_0(-\sin \omega_0 X_1 + \sin \omega_0 Y_1) - Y'_1 \\ q_0(\cos \omega_0 X_2 + \sin \omega_0 Y_2) - X'_2 \\ q_0(-\sin \omega_0 X_2 + \sin \omega_0 Y_2) - Y'_2 \\ q_0(\cos \omega_0 X_3 + \sin \omega_0 Y_3) - X'_3 \\ q_0(-\sin \omega_0 X_3 + \sin \omega_0 Y_3) - Y'_3 \\ q_0(\cos \omega_0 X_4 + \sin \omega_0 Y_4) - X'_4 \\ q_0(-\sin \omega_0 X_4 + \sin \omega_0 Y_4) - Y'_4 \end{pmatrix}$$

KAPITOLA 4

Podkladová data

4.1 Data EuroSDR

Datové podklady získané z projektu EuroSDR – High density image matching z roku 2011 pokrývají část obce Espoonlahti, která se nachází 20 kilometrů západně od Helsinek. Oblast můžeme charakterizovat jako vilovou zástavbu s terasovitými domy s menším lesem na jižním pobřeží Björköfjärden ve Finském zálivu.

4.1.1 LLS

Data leteckého laserového skenování byla vytvořena pomocí dvou skenerů, kdy obě datové sady byly v jednom pásu. První mračno bodů bylo naskenováno pomocí Optech ALTM 3100 v roce 2005 a druhé mračno pomocí Leica ALS50-II v roce 2007. Výška skenování u skeneru Optech byla přibližně 1000 m s hustotou bodového mračna 2 – 3 body na m². Úhel snímání činil 24° s tím, že bylo zpracováno pouze 20°. Skenování probíhalo při rychlosti letu 75 m/s se skenovací frekvencí 67 Hz. Skener Leica ALS50-II skenoval z výšky 500 m s vyšší hustotou bodů a to 4 – 5 bodů na m². Úhel skenování činil 40° se skenovací frekvencí 42,5 Hz při rychlosti letu 72 m/s. Vyrovnání pásu pomocí vlíčovacích bodů či jiných metod nebylo použito, čímž se liší souřadnicové systémy leteckých měřických snímků a nasnímaných bodových mračen a to rotací a v posunu. Díky dvouletému rozdílu při skenování jednotlivých bodových mračen došlo k drobným rozdílům ve skenovaném území. Data jsou distribuována ve formátu *.xyzi.

4.1.2 LMS

Z datových podkladů z projektu EuroSDR byly v případě leteckých měřických snímků vybrány snímky panchromatické, kvůli jejich vyššímu prostorovému rozlišení a nižší hodnoty distorze oproti RGB a NIR snímkům. Celkově se jedná o čtyři snímky s překryvem 60 % a bočním překryvem 20 %. U panchromatického snímání byla použita 16-ti bitová hloubka s velikostí snímku 13824×7680 pixelů při prostorovém rozlišení přibližně 5 cm. Snímky blokově vyrovnány v počtu osmi snímků za pomocí Erdas LPS. Měření kontrolních pozemních bodů bylo provedeno finským geodetickým

institutem *Geodeettinen laitos* metodou RTK GPS, kdy u panchromatických snímků bylo použito šest kontrolních bodů. Data jsou distribuována ve formátu *.tif.

4.2 Data ČÚZK

Data pro Českou republiku byla získána z Českého úřadu zeměměřického a katastrálního. Celkově se jedná o čtyři mapové listy podle kladu SM5 a to konkrétně CBUD22, CBUD32, CBUD42 a TSVI67.

4.2.1 DMP1G

DMP1G, který představuje digitální model povrchu na základě leteckého laserového skenování, u kterého bylo dosaženo ve výškovém systému Balt po vyrovnání úplné střední chyby 0,4 m pro přesně vymezené objekty a 0,7 m pro objekty přesně neohrazené. Data jsou distribuována ve formátu *.xyz

4.2.2 LMS

Letecké měřické snímky byly poskytnuty v syntéze RGB s pokryvem přibližně 60 km² zájmového území v okolí Českých Budějovic. Hodnota podélného překryvu je 45 % a boční překryv 10 %. Velikost jednotlivých snímků činila 17310×11310 pixelů, s prostorovým rozlišením 16,6 cm. Snímky byly distribuovány ve formátu *.tif.

4.3 Předzpracování podkladových dat

Celý postup výpočtu parametrů transformace jednotlivých datových sad lze rozdělit do několika na sebe navazujících částí. V první řadě je nutno vybrat vhodné datové sady a následně je modifikovat pro jejich zpracování v použitém softwarovém vybavení. K tvorbě digitálního modelu povrchu byly využity panchromatické snímky, neboť snímky v barevné syntéze RGB či NIR obsahují pro tvorbu redundantní informace. U leteckých měřických snímků poskytnutých od ČÚZK došlo k jejich úpravě na panchromatické. Ke zpracování leteckých měřických snímků byl využit software Envi 5, kdy vstupní data jsou tvořena dvojicemi měřických snímků ve formátu *.tif, které neobsahují metadata o jejich vnitřní a vnější orientaci. K přiřazení těchto informací byl využit nástroj *Build RPCs*, který umožňuje definici prvků vnitřní orientace a to typ kamery, ohnisková vzdálenost, velikost snímače a souřadnice středového bodu snímku. U snímků poskytnutých od ČÚZK byly prvky vnější orientace poskytnuty v souřadnicovém systému JTSK, který není podporován u nástroje *Build RPCs*. Zde bylo přikročeno k využití software IDL, který je integrován v programovém vybavení Envi a

umožňuje pomocí příkazového řádku přepočítat prvky vnější orientace na používanější světové souřadnicové systémy, např. UTM apod.

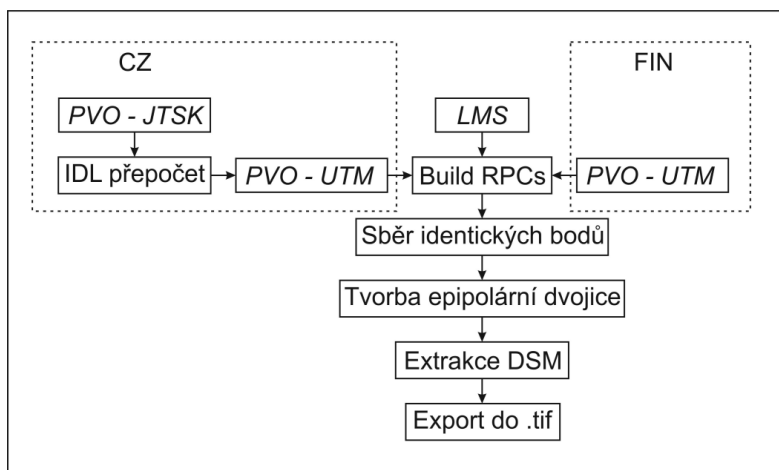
```

*Untitled 1
; XS,YS coordinates for image 1429
x=-757748.983
y=-1163758.022
; projection definition
peCoordSysCode=102066
; creation of the input projection object
iproj = envi_proj_create(type=42, PE_COORD_SYS_CODE=peCoordSysCode)
; creation of the output projection object in lat/lon:
oproj = ENVI_PROJ_CREATE(/geographic)
; coordinate conversion
envi_convert_projection_coordinates,x,y,iproj,lon,lat,oproj
print,lon,lat

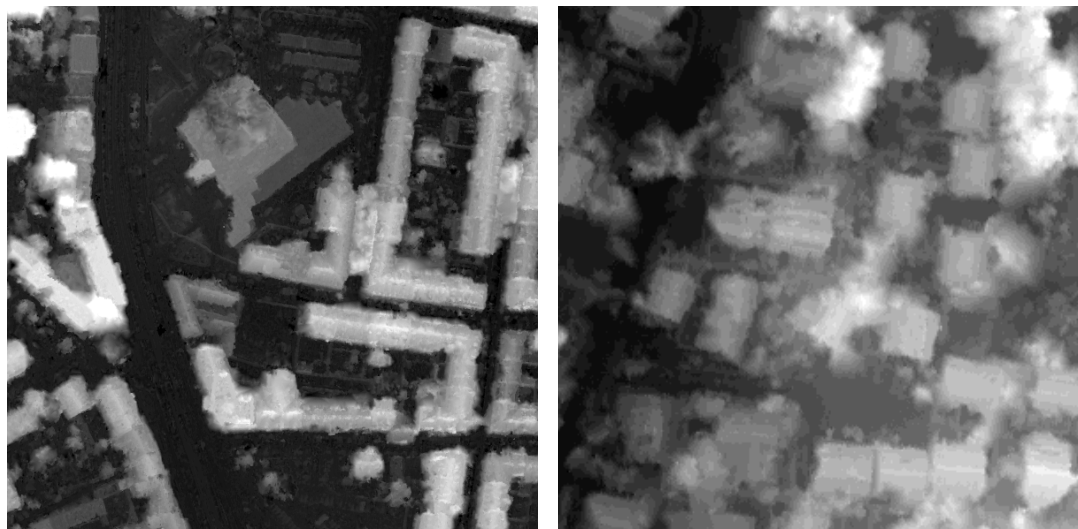
```

Obr. 1. Příklad konverze části prvků vnější orientace v prostředí IDL

Postup přiřazení prvků vnější orientace nabízí dvě možnosti a to přiřazení pomocí pozemních kontrolních bodů se známými souřadnicemi pomocí geodetického zaměření anebo výpočet pomocí rotací omega, fi a kappa a prostorových souřadnic XYZ. Kontrolní pozemní body, vzhledem k jejich nerovnoměrnému rozmístění a nedostatečnému počtu, nebyly využity a byla využita varianta přímého zápisu prvků vnější orientace. Takto modifikované snímky tvoří vstupní data do extenze softwaru Envi a to *DEM Extraction Module*, který umožňuje tvorbu digitálního modelu povrchu ze stereodvojice snímků. Zde dochází k výběru levého a pravého snímku pro tvorbu epipolární dvojice, kdy se po určení elevace dané scény přechází k výběru identických bodů v každém snímku v dané dvojici. V každém z obrazů, vybráno nejméně 9 identických bodů. Nejčastěji se jednalo o skruže kanalizací či křížení vodorovného silničního značení neboť se jedná o statické, snadno rozpoznatelné objekty na pixelové úrovni a s de facto nulovou výškou. Z takto vytvořené dvojice epipolárních snímků byl následně extrahován digitální model povrchu ve formátu *.tif s datovým typem integer a s prostorovým rozlišením 0.5 metru.

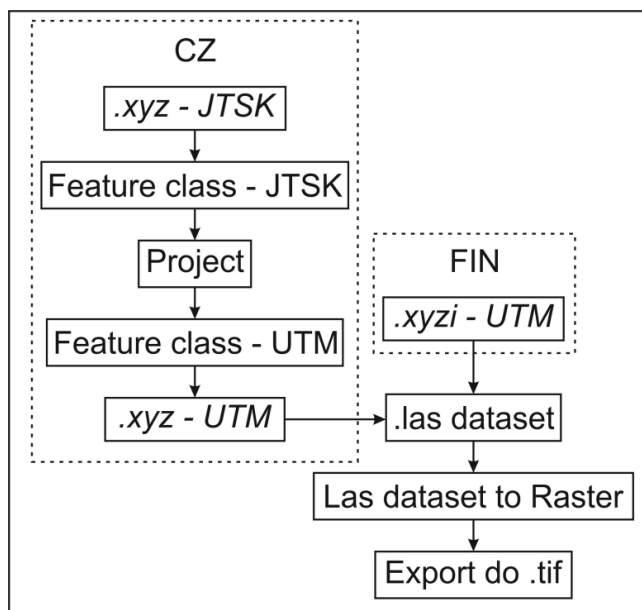


Obr. 2. Schéma tvorby DMP z dat LMS

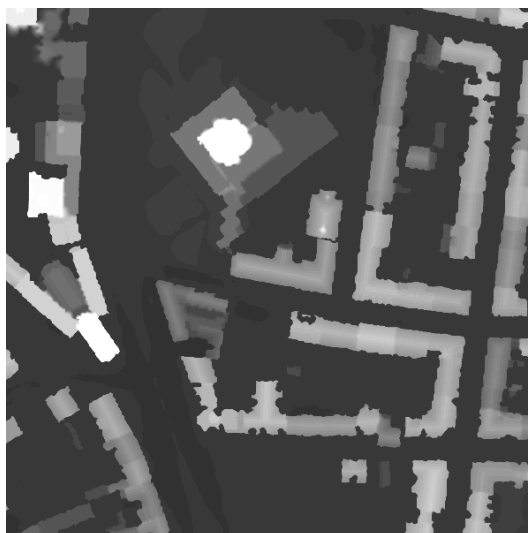


Obr. 3. DMP z dat LMS v oblasti Českých Budějovic a Espoonlahti

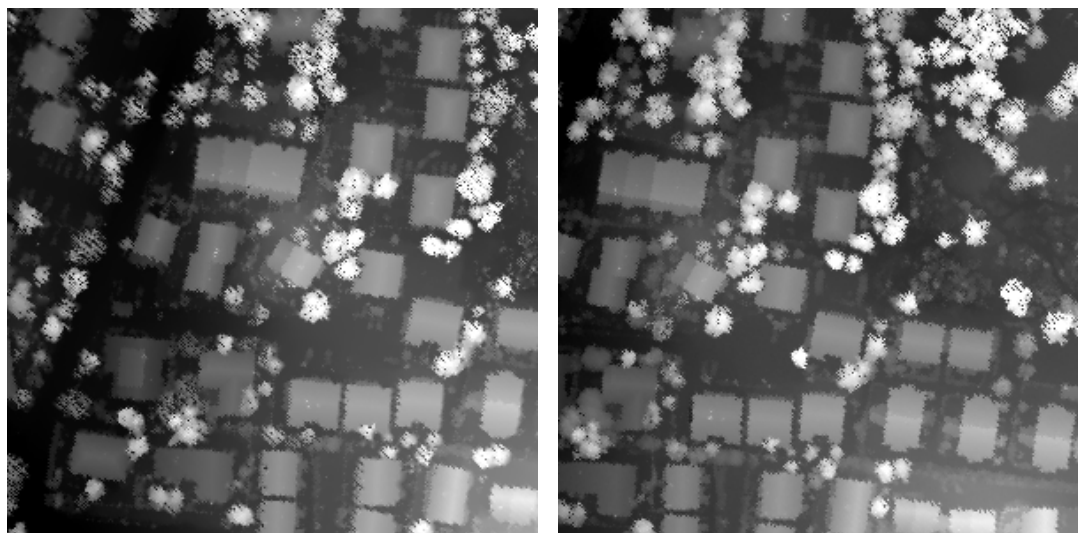
Datové sady leteckého laserového skenování, které byly dále využity na tvorbu digitálního modelu povrchu, nemohly být použity přímo pro tvorbu digitálního modelu povrchu, neboť software ArcGIS 10.1 SP1 neumožňuje import do *LAS dataset* ve formátu *.xyzi*, respektive *.xyz*. Podporovány jsou soubory ve formátu *.las*, do kterého je možné data ve formátech *.xyzi* / *.xyz* konvertovat pomocí nástroje *Las Utility*, který byl vyvinut na Indian Institute of Technology – Kanpur. Výše zmiňovaný postup byl aplikován pro laserová data z projektu EuroSDR, která byla nasnímána v souřadnicovém systému UTM. U dat získaných od ČÚZK byla před importem do formátu *.las*, provedena re-projekce bodů. Nejprve byl *.xyz* soubor importován do nově vytvořené *Feature class* v software ArcGIS, kde byla následně re-projektována pomocí funkce *Project* do souřadnicového systému UTM. Vzhledem k nemožnosti importu *Feature class* do *LAS datasetu* následoval export do ASCII souboru, který mohl být následně, pomocí výše zmiňované konverze pomocí *Las Utility*, do *LAS datasetu* importován. Service Pack 1 umožňuje efektivnější práci s laserovým mračnem bodů oproti klasické práci s *Multipoint Feature class* a to nejen 64 bitovým zpracováním, ale i vylepšením algoritmů samotného processingu dat. Pro získání rastrové podoby mračna bodů, která by představovala digitální model povrchu, byl využit nástroj *LAS Dataset to Raster* v balíku nástrojů *Conversion*. Interpolace probíhala z hodnot elevace, kdy na základě triangulace byla využita interpolace pomocí metody nejbližšího souseda. Vzhledem k požadavku na výstup jako digitální model povrchu a nikoliv terénu, probíhala interpolace z bodů s nejvyšší hodnotou elevace. Kvůli komparaci s digitálními modely povrchu z leteckých měřických snímků byly výsledky exportovány ve formátu **.tif* s datovým typem integer a prostorovým rozlišením 0.5 metru.



Obr. 4. Schéma tvorby DMP z dat LLS



Obr. 5. DMP z dat LLS v oblasti Českých Budějovic



Obr. 6. DMP z dat LLS Leica a Optech v oblasti Espoonlahti

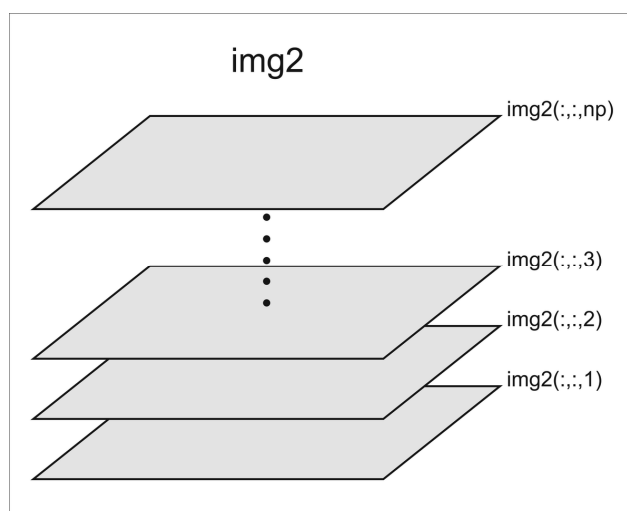
KAPITOLA 5

Metodika

5.1 Obrazová korelace – Image correlation

Navržená metoda je založena na principu výpočtu korelačního koeficientu pro vyhledávané okno obrazu s obrazem referenčním. Vstupní data tvoří digitální modely povrchu z leteckých měřických snímků a leteckého laserového skenování v obrazové podobě. Digitální model povrchu z LMS představuje v následujících výpočtech primární obraz, přičemž v něm dochází k vyhledávání částí obrazu z LLS, který představuje obraz sekundární. Sekundární obraz je reprezentován pouze jeho výřezy, které představují vyhledávané okno o velikosti 50×50 px. Tvorba výřezů ze sekundárního obrazu neprobíhala automatizovaně nýbrž manuálním výřezem v grafickém editoru. Při tomto postupu je však nutné zaznamenat souřadnice středu daného výřezu pro následné výpočty. Pokud by došlo ke ztrátě informací o souřadnicích středu, byla by možnost zpětně dovyhledat souřadnice též pomocí sjednocení obrazu (*image matching*), metodou tzv. autokorelace. V rámci úspory času při výpočtech nebyly výřezy sekundárního obrazu vyhledávány v celém obraze primárním, ale opět v jeho výřezech a to s rozměrem 100×100 px. Pro následující výpočty bylo nutné zaznamenat souřadnice počátku souřadnicového systému ve výřezu z primárního obrazu a výsledky ztotožnění o ně poté opravit.

Načtení výřezů primárního a sekundárního obrazu je uskutečněno do proměnných ve dvou dimenzích s datovým typem *8-bit unsigned integer*. Pomocí postupného načítání do proměnné se třemi dimenzemi. Rozsah ve třetí dimenzi je závislý na počtu výřezů, kdy datový typ zůstává shodný jak u primárního tak u obrazu sekundárního.



Obr. 7. Způsob ukládání výřezů sekundárního obrazu ve 3 dimenzionální matici

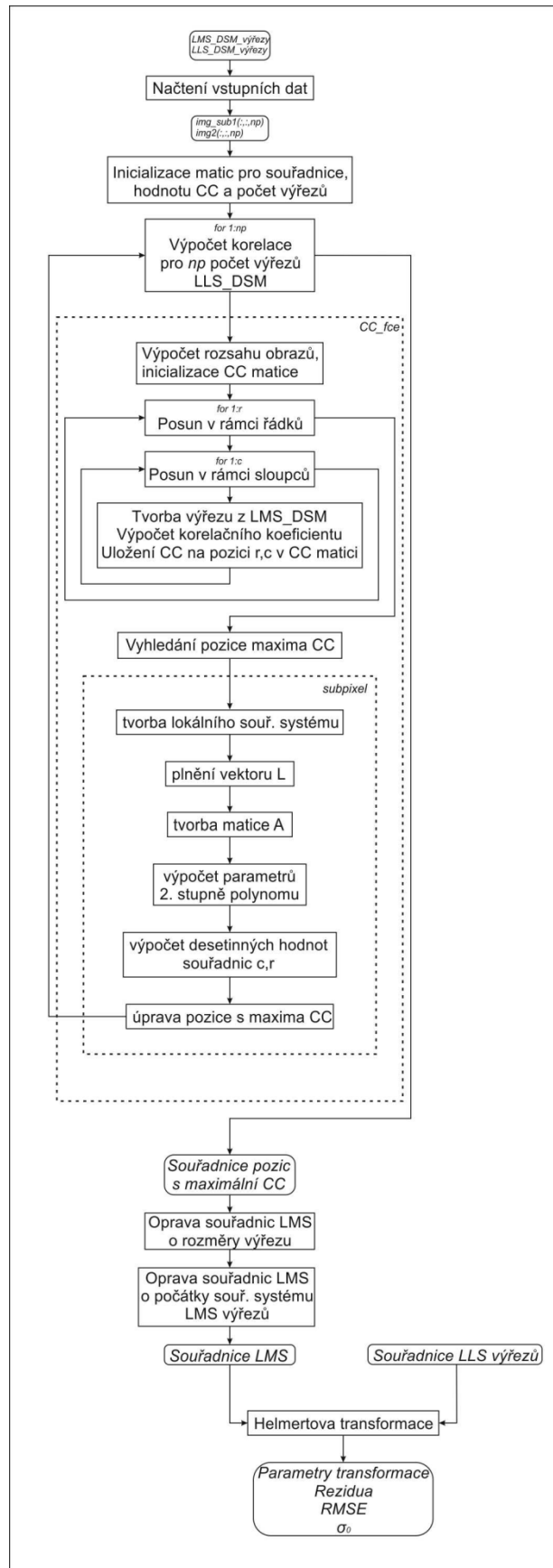
Inicializační část hlavní programové funkce zajišťuje tvorbu vektorů pro souřadnice řádku, sloupce a hodnoty maximálního korelačního koeficientu v rozsahu třetí dimenze proměnné s výřezy sekundárního obrazu. Tzn. při 13-ti výřezech budou vytvořeny vektory o velikosti (1,13). Výpočet korelace pro každý výřez je realizován cyklem *for* s daným počtem opakování, který je závislý na počtu výřezů sekundárního obrazu. V rámci cyklu dochází k volání funkce *CC_fce.m*, která tvoří výstupy v podobě proměnných s hodnotami maximálního korelačního koeficientu a jejich souřadnic. Vstup do funkce *CC_fce.m* představuje výřez primárního obrazu a vždy jeden výřez sekundárního obrazu. První část funkce realizuje výpočet velikosti vstupních matic, na základě kterých je spočtena velikost matice *CC_matrix*, do které jsou následně spočteny hodnoty korelačního koeficientu a jejich souřadnice v rámci obrazu. Samotný výpočet korelačního koeficientu probíhá pomocí posunu plovoucího okna, tzn. ve dvojitě vnořeném cyklu *for*, který zajišťuje postupný výpočet napříč řádky a sloupci ve výřezu primárního obrazu. Posun plovoucího okna zajišťuje inkrementace proměnných řídicích dvojitě vnořený cyklus. Před samotným výpočtem korelace je třeba sjednotit velikost obrazových matic vstupů, tzn. primárního obrazu a výřezu sekundárního obrazu. Vzhledem k faktu, že výřez primárního obrazu představuje větší vyhledávanou oblast, dochází k redukcí velikosti této obrazové matice na základě tvorby výřezu se shodnou velikostí výřezu sekundárního obrazu. Následný výpočet korelačního koeficientu zajišťuje, do MATLABu již zabudovaná, funkce *corr2*, kdy jejím vstupem tvoří dvě obrazové matice o shodných rozměrech.

$$C(A, B) = \frac{\sum_{ij} (a_{ij} - \text{průměr}(A)) \cdot (b_{ij} - \text{průměr}(B))}{\sqrt{\sum_{ij} (a_{ij} - \text{průměr}(A))^2 \cdot \sum_{ij} (b_{ij} - \text{průměr}(B))^2}}$$

Výpočet korelačního koeficientu pomocí funkce *corr2*

Výsledné souřadnice maximálních hodnot korelačního koeficientu neodpovídají obrazovým souřadnicím primárního obrazu, nýbrž souřadnicím matice *CC_matrix*. Rozdíl souřadnic je dán způsobem tvorby matice *CC_matrix*, kdy v rámci kompenzace je nutné přičíst k spočteným souřadnicím hodnotu poloviny velikosti výřezu ze sekundárního obrazu ve směru řádků a sloupců.

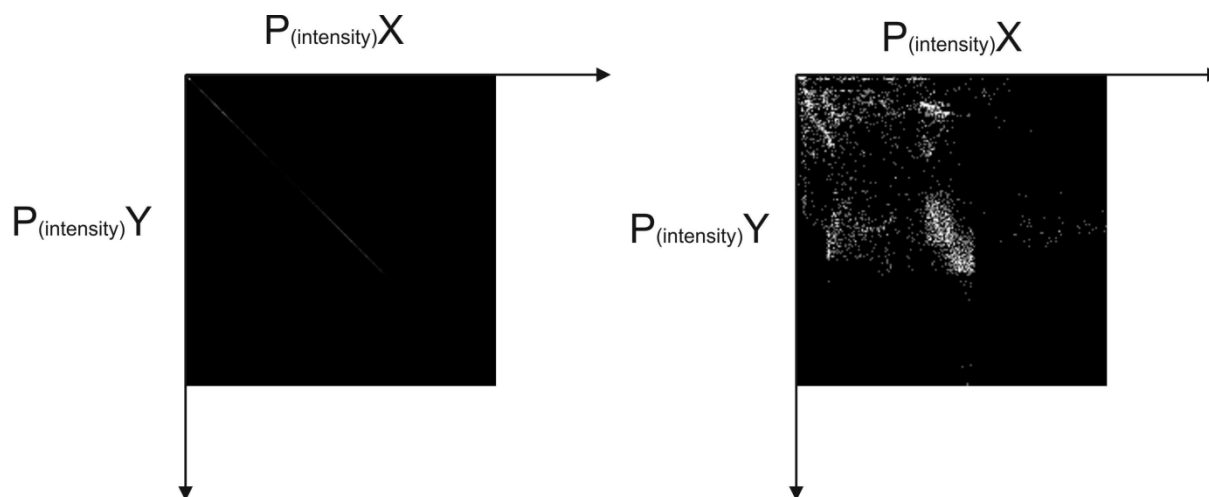
Výše zmíněným způsobem je zjištěna poloha výřezů sekundárního obrazu ve výřezu obrazu primárního. Co se týče souřadnic sekundárních výřezů v obraze sekundárním, jejich středové souřadnice byly zjištěny při jejich tvorbě. Výsledné souřadnice pro LLS a LMS tvoří vstup pro funkci výpočtu subpixelové přesnosti *subpix.m*, jejíž výstupy tvoří vstup pro získání parametrů a reziduí skrze Helmertovu transformaci.



Obr. 8. Schéma ztotožnění pomocí korelačního koeficientu (Correlation-like method)

5.2 Sdílená informace – Mutual information

Metoda založená na výpočtu sdílené informace (*Mutual information*) mezi dvěma datovými sadami využívá stejný princip hlavní programové části jako předchozí metoda založená na výpočtu korelačního koeficientu. Volba výpočtů pomocí vyhledávacího okna umožňuje následně přímou komparaci rychlosti výpočtu neboť je obměňována pouze centrální část celého programového skriptu a to volba funkce, která provádí samotný výpočet sjednocení obrazu (*image matching*). Podobně, jako byla v předchozím případě využita funkce *CC_fce.m*, tak u výpočtu sdílené informace je nahrazena funkcí *MI_fce.m*. Vzhledem k častému využívání výpočtů korelace v prostředí MATLAB, byl výpočet korelace prováděn zabudovanou funkcí *corr2*. Obecně výpočet sdílené informace je využíván spíše ve specializovanějších případech a neexistuje zde přímá funkce pro její výpočet. Řešení tedy spočívá v tvorbě vlastní funkce, která je volána z předchozí funkce *CC_fce.m*. Výpočet sdílené informace zajišťuje funkce *NMI_fce.m*, kdy vstup je tvořen dvojicí obrazových matic, stejně jako v případě vstupu do funkce *corr2*. Vzhledem k výpočtům v rozsahu mimo datový typ *integer*, a to z důvodu využívání hodnot v proměnných s desetinnou čárkou, jsou vstupní obrazové matice (výřez primárního a sekundárního obrazu) převedeny na datový typ *double*, který umožňuje zápis desetinných hodnot a zároveň poskytuje rezervu v rozsahu hodnot. Vzhledem ke statistickému charakteru metody sdílené informace, je další krok tvoření normalizací hodnot v primárním a sekundárním obraze. U výpočtu společného histogramu (*joint histogram*) probíhá před samotným výpočtem import primárního a sekundárního obrazu do společné proměnné, která tvoří vstup do funkce *accumarray*, jejímž výstupem je společný histogram (*joint histogram*).



Obr. 9. Normalizovaný histogram z identických vstupů a z rozdílných vstupů

Na základě hodnot společného histogramu můžeme spočítat entropii $H(X)$ a $H(Y)$ pro oba vstupní obrazy pomocí definice entropie:

$$H = - \sum P_i \log 2P_i$$

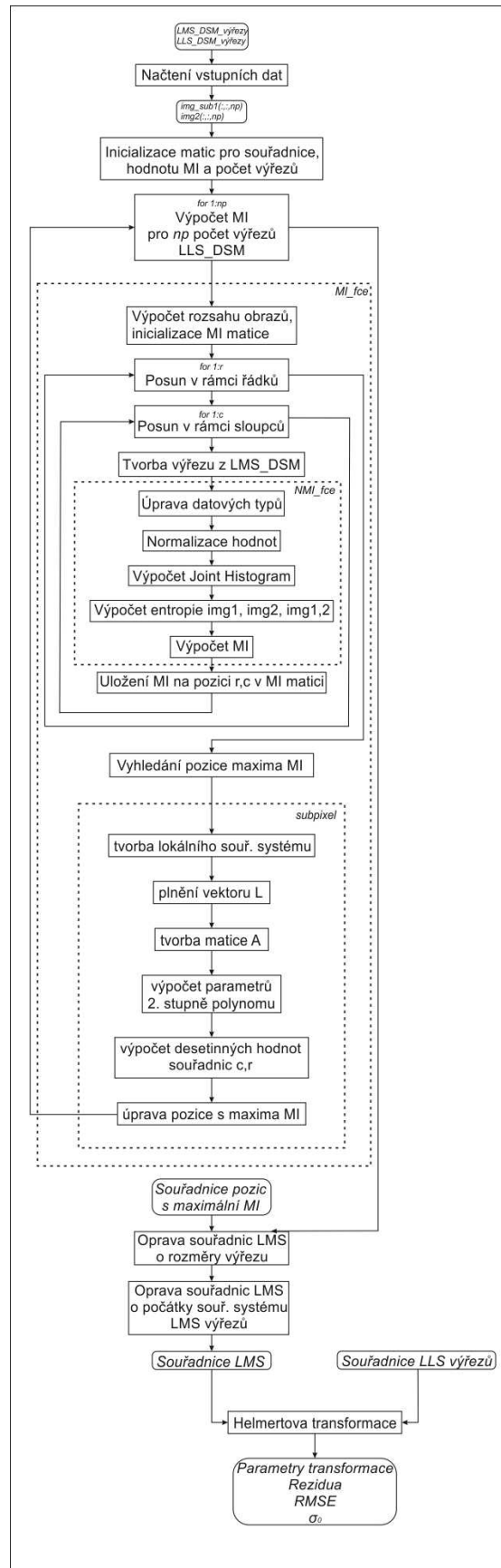
Pro výpočet sdílené informace je nutno spočítat i hodnotu společné entropie $H(X, Y)$:

$$H(X, Y) = -E \log p(X, Y)$$

Samotný výpočet sdílené informace probíhá dosazením výsledků z předchozích výpočtů do vztahu:

$$MI(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y)$$

Kde $H(X)$ představuje entropii primárního obrazu, $H(Y)$ entropii sekundárního obrazu a $H(X, Y)$ společnou entropii. Hodnoty dosahovaných maxim MI , respektive jejich obrazové souřadnice, jsou opraveny o počátek lokálního souřadnicového systému matice *MI_matrix* a o rozdíl v souřadnicovém systému výřezu primárního obrazu. Tyto souřadnice tvoří vstupní data do funkce *subpix.m*, kde jsou pak finální souřadnice vstupem funkce pro výpočet Helmertovy transformace.



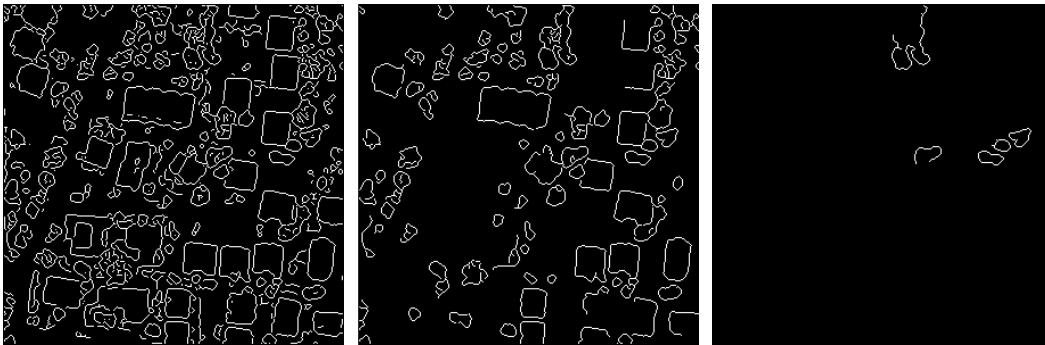
Obr. 10. Schéma ztotožnění pomocí sdílené informace (Mutual Information)

5.3 Hausdorffova vzdálenost – Hausdorff distance

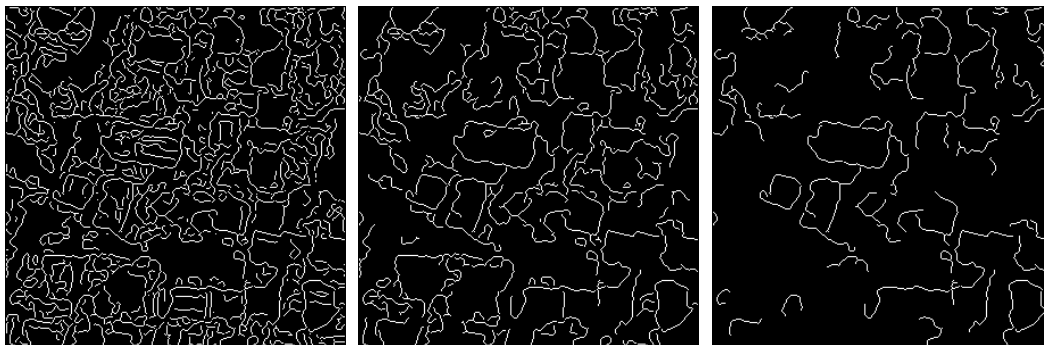
Metoda výpočtu založená na Hausdorffovy vzdálenosti se liší oproti předchozím metodám přístupem k výpočtu dané metriky v rámci fáze detekce. Obě předchozí metody využívaly jako vstupních proměnných digitální modely povrchu v obrazové podobě. Jelikož se jedná o metodu spadající do skupiny *Point pattern matching*, je nutné nejprve obraz, před vstupem do vyhledání shodných míst v obraze, převést do vektorové podoby, respektive do podoby skupiny významných bodů. Obvykle se využívá hranových operátorů, kdy se jejich použitím zvýrazní pouze jednotlivé hrany objektů v závislosti na typu použitého operátoru. Jako u předchozích metod, i při realizování koregistrace pomocí Hausdorffovy vzdálenosti, se využívá programového skriptu založeného na dvojitě vnořeném cyklu, jako tomu bylo u předchozích koregistračních metod. Úprava vstupních dat z obrazové podoby do podoby vektorové je realizována již při samotném načítání dat, a to kombinací funkcí *imread* a *edge*. Funkce *edge* zajišťuje převod obrazu do vektorové podoby formou aplikace hranového operátoru, který je volen parametrem této funkce. V rámci programu MATLAB je možné volit mezi následujícími hranovými operátory:

- Sobel
- Prewitt
- Roberts
- Laplace / Gaussian
- Zero-crossing
- Canny

Pro detekci hran byl zvolen operátor Cannyho, kdy má uživatel možnost nastavovat hodnoty parametrů, které ovlivňují citlivost operátoru na vstupní obrazová data. Vzhledem ke shlazování vstupu Gaussovo filtrem, je tento operátor méně náchylný na šum v obraze. Následně využívá výpočtu první derivace, kde jsou dále hodnoty volitelně prahovány. Volba parametrů prahové hodnoty (*thresh*) a standardní odchylky (*sigma*) je, v rámci funkce *edge*, pro uživatele volitelná. Zůstane-li hodnota standardní odchylky nezadána, defaultní hodnota činí $\sqrt{2}$. Čím nižší je nastavena prahová hodnota, tím je ve výsledku vráceno více hran. Nastavením hodnoty parametru standardní odchylky je možné regulovat příliš krátké reliktní hrany, na druhou stranu při vysoké hodnotě směrodatné odchylky Gaussova filtru dochází k zaoblování hran [Hofman, 2008]. Výstup z funkce hranového operátoru tvoří binární obraz, kdy hranám jsou přiděleny hodnoty 1 a zbytku obrazu hodnoty 0.



Obr. 11. Aplikace Cannyho hranového operátoru na DMP vytvořený z LLS s prahovými hodnotami 0.1, 0.4, 0.9



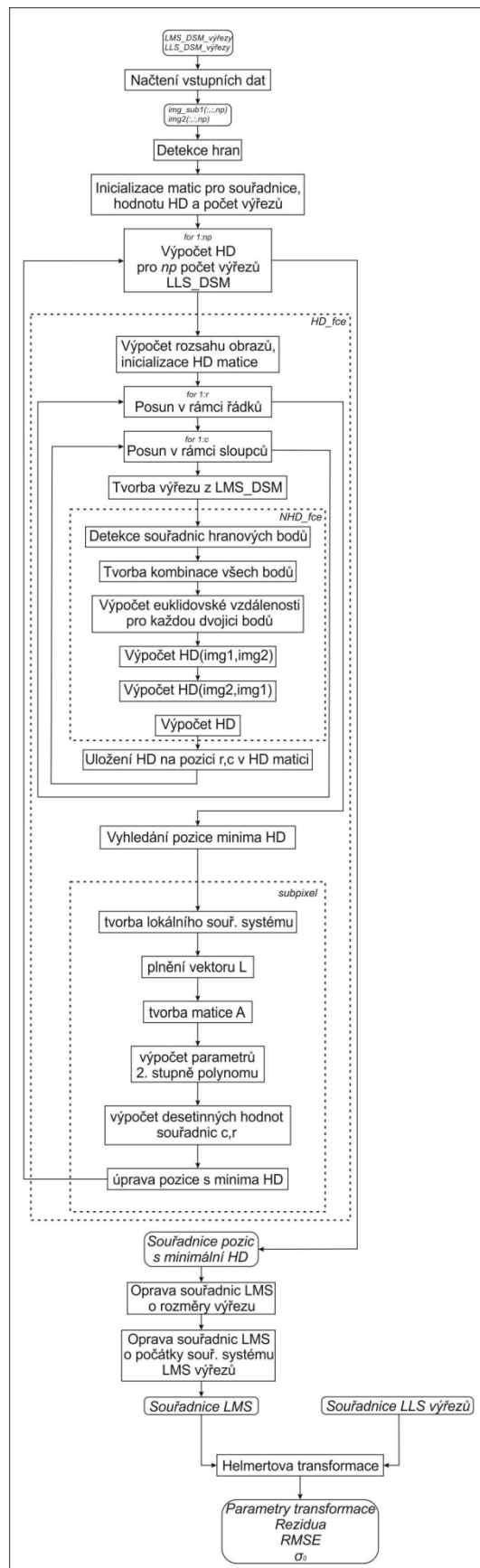
Obr. 12. Aplikace Cannyho hranového operátoru na DMP vytvořený z LMS s prahovými hodnotami 0.1, 0.2, 0.3

Vzhledem k možnostem výběru hranového operátoru a rozsahu možného nastavení, bylo přistoupeno k testování hranové filtrace na DMP vytvořených z LMS a LLS s hodnotami pokrývajícími téměř celý rozsah nastavitelných hodnot. Testování preferovalo Cannyho operátor, neboť z výše zmíněných zdrojů vyplývá jeho univerzálnější využití pro obrazová data získaná metodami DPZ.

Funkce *NHD.m* zajišťující výpočet Hausdorffovy vzdálenosti v první fázi zjišťuje souřadnice bodů, které tvoří jednotlivé hrany v binárních obrazech. Jelikož binární obrazy mohou nabývat hodnot pouze 0 nebo 1, selekci hran je tedy možné provést pomocí funkce *find* bez cyklického průběhu a výsledky, v podobě obrazových souřadnic řádku a sloupce, rovnou uložit do samostatných proměnných pro oba binární obrazy zvlášť.

Výpočet Hausdorffovy vzdálenosti je postaven na výpočtu vzdáleností mezi jednotlivými body z obou datových vstupů a následné selekce vzdáleností. Z tohoto důvodu je nutné vytvořit matici obsahující kombinace všech bodů, z prvního vstupu, se všemi body, ze vstupu druhého. Realizace této kombinační matice spočívá v použití funkce *repmat*, kdy je následně spočtena Euklidovská vzdálenost ve dvourozměrném prostoru pro jednotlivé kombinace v obou orientacích. Definice Hausdorffovy vzdálenosti $h(P, Q) = \max \min \|pq\|$ vyplývá, že pro její výpočet se použije supremum z infima orientovaných hodnot vzdáleností z proměnných *vzdAB* a *vzdBA*. Zde je možnost následné úpravy pomocí kvantilizace hodnot vzdáleností pro zmenšení náchylnosti k odlehlým hodnotám. Obdobně,

jako u předchozích metod, i zde jsou výstupy funkce *NHD_fce.m* postoupeny funkci *HD_fce.m*, následně v inicializačním skriptu přepočteny o opravy počátků souřadnicových systémů a z nich spočteny transformační parametry Helmertovy transformace.



Obr. 13. Schéma ztotožnění pomocí Hausdorffovy vzdálenosti (Hausdorff distance)

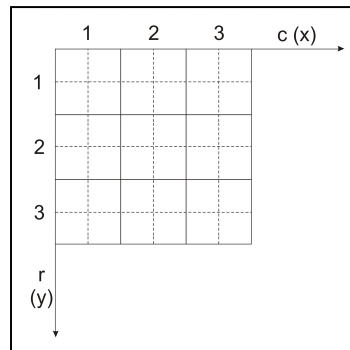
5.4 Komparační funkce

Vzhledem k avizovanému porovnání jednotlivých metrik při stanovení cílů práce, bylo nutné vytvořit v prostředí MATLAB vlastní funkci, která by porovnání zajistila. Hlavní účel této funkce tkví v nápomoci při rozhodování, kterou z metrik použít ke koregistraci laserových dat s fotogrammetrickými. U procesu koregistrace je nutné vždy vyvážit dva protichůdné parametry a to čas, respektive hardwarová náročnost versus minimalizace reziduí po transformaci dat, respektive polohové odchylky ztotožnění. Na začátku práce zmiňovaný projekt EuroSDR byl zaměřen zejména na minimalizaci reziduí po transformaci, tzn. polohovou přesnost koregistrace jako takové. V rámci projektu *EuroSDR Workshop on High Density Image Matching for DSM Computation* bylo několikrát zdůrazňováno zastupiteli veřejných institucí (bavorský katastrální úřad, apod.), že vzhledem k indispozici superpočítačů u těchto institucí, není možné v praxi využívat metody, které v rámci polohové přesnosti excelují, ale z hlediska nároků na hardwarové prostředky jsou příliš náročné, popř. neumožňují *cloud-computing* ve stávající infrastruktuře.

Komparační funkce je rozdělena do dvou programových skriptů. Inicializační skript *NTP_data_subpix.m* má za úkol načíst matice spočtených metrik, v tomto případě *MI_c.mat* a *CC_c.mat*, do samostatných proměnných a následně volá funkci *NTPmatch.m*. Vstup funkce *NTPmatch.m* tvoří souřadnice a hodnoty metrik, kdy jsou následně hodnoty metrik znormalizovány v 8mi bitovém rozsahu dle vztahu $Q_{n_i} = \frac{((Q_i - \min Q) \cdot 256)}{\Delta Q}$. Výsledné hodnoty jsou následně selektovány na základě podmínky, zda je v daném bodě větší hodnota metriky sdílené informace (*Mutual information*) oproti hodnotě metriky korelace (*Correlation like*). Na základě výsledného binárního vektoru dochází k plnění vektorů souřadnic, souřadnicemi vybrané metriky v rámci dvou cyklů, kdy první provede plnění pro souřadnice sloupce a druhý cyklus zajišťuje plnění souřadnic řádku. Výsledné souřadnice není nutno opravovat o počátky souřadnicových systémů v rámci sub-obrazů a výřezů, neboť vstupní data již takto opravena jsou. Komparace je provedena pro všechny datové sady, tzn. pro data získaná od ČÚZK (LLS a LMS), data z projektu EuroSDR (LLS Leica a LMS a LLS Optech a LMS).

5.5 Sub-pixelová přesnost

Výše uvedené metody vychází z principu výpočtu metriky pro nejlepší shodu mezi primárním a sekundárním obrazem. Vzhledem k obrazovému charakteru dat probíhají všechny výpočty v gridové síti pixelů. Tzn. proměnné *r*, *c* v cyklováných funkcích (*CC_fce.m*, *MI_fce.m*), respektive proměnné *r_coord* a *c_coord* v hlavní části kódu nabývají pouze celočíselných hodnot, z čehož plyne maximální výsledná přesnost $\pm 0,5$ pixelu.



Obr. 14. Schéma souřadnicového systému v obrazech

Zde se nabízí možnost výpočtu souřadnic s desetinnou přesností, která by více odpovídala skutečnému stavu. Desetinné hodnoty je teoreticky možné spočítat jakoukoliv spojitou funkcí v rámci okolí nejvyšších hodnot spočtené metriky a tím i aproximovat hodnotu maxima dané metriky ve zpřesněné pozici. Vzhledem k aproximaci v poměrně malé oblasti, konkrétně v matici 3×3 , není třeba volit příliš složitou funkci [Potůčková, 2004]. Pro tento výpočet plně dostačuje druhý stupeň polynomu (kvadratický), jehož koeficienty lze spočítat pomocí metody nejmenších čtverců [Kraus, 2007].

$$\bar{m} = m + v = x_0 + x_1 r + x_2 c + y_0 r c + y_1 r^2 + y_3 c^2$$

m – spočtená hodnota metriky

\bar{m} – zpřesněná hodnota metriky

r, c – pixelové souřadnice

x_i, y_i – koeficienty polynomu druhého stupně

v – rezidua

Použijeme-li pro výpočet metody nejmenších čtverců maticovou rovnici,

$$dx = -(A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot L$$

bude vektor dx představovat neznámé koeficienty $x_0, x_1, x_2, y_0, y_1, y_2$ pro obě osy souřadnicového systému. Matice A obsahuje hodnoty pixelových souřadnic x, y respektive c, r . Ve vektoru L jsou obsaženy konkrétní hodnoty spočtených metrik. Jednotkovou matici reprezentuje matice P . Jsou-li takto zjištěné koeficienty polynomu druhého stupně, lze je uplatnit v rovnicích pro výpočet hodnot souřadnic c, r za desetinnou čárkou, respektive subpixelové hodnoty.

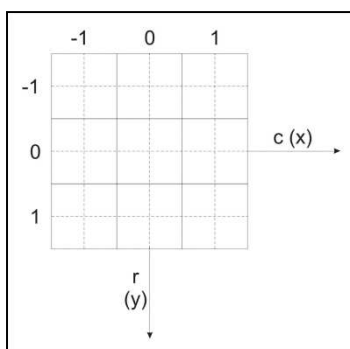
$$\begin{pmatrix} \frac{\partial m}{\partial r} \\ \frac{\partial m}{\partial c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2y_1 & y_0 \\ y_0 & 2y_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{max} \\ c_{max} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

tedy:

$$c_{max} = \frac{-2x_2 y_1 + x_2 y_0}{4y_1 y_2 - y_0^2}$$

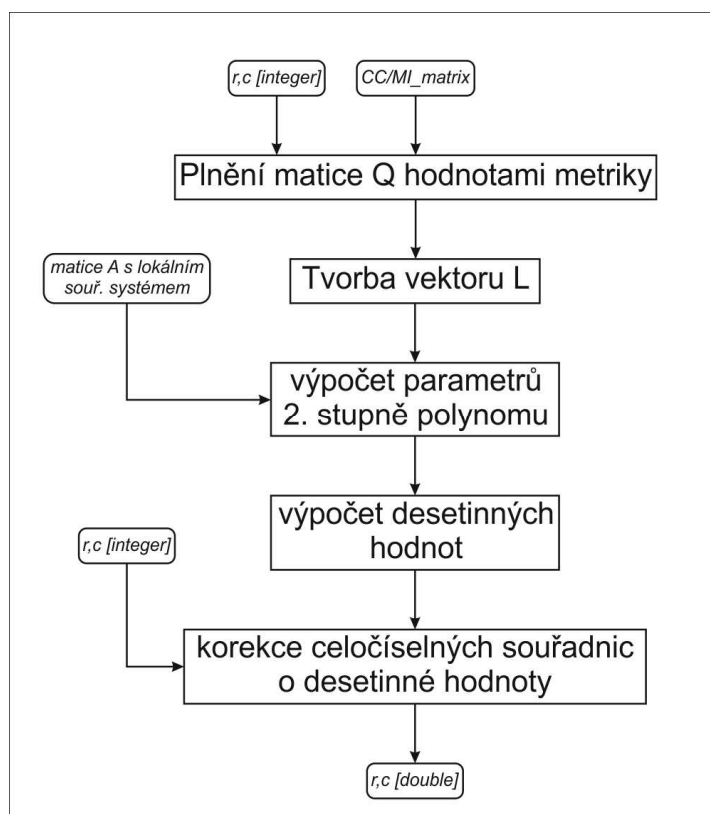
$$r_{max} = \frac{-2x_1 y_2 + x_1 y_0}{4y_1 y_2 - y_0^2}$$

Pro výsledné souřadnice je nutné c_{max} a r_{max} přičíst k původním celočíselným souřadnicím c , r . V rámci zjednodušení metody, neprobíhal výpočet v obrazovém souřadnicovém systému, nýbrž v lokálním systému v okolí 3×3 nejvyšší hodnoty dané metriky [Potůčková, 2004].



Obr. 15. Schéma lokálního souřadnicového systému ve výpočtu subpixelové přesnosti

Výpočet subpixelových hodnot zajišťuje funkce *subpixel.m*, kdy na vstup jsou přivedeny matice spočtené metriky a souřadnice v celočíselných hodnotách. Výstup tvoří souřadnice se subpixelovou přesností, kdy nejprve dochází k tvorbě vektoru L s hodnotami spočtené metriky pomocí převodu z obrazového souřadnicového systému do systému lokálního. Následně je aplikován výpočet pomocí metody nejmenších čtverců, dle výše uvedeného postupu, kdy jsou nejprve spočteny koeficienty polynomu druhého stupně a následně vypočtené hodnoty c_{max} a r_{max} přičteny k původním celočíselným souřadnicím c , r a odeslány na výstup funkce.



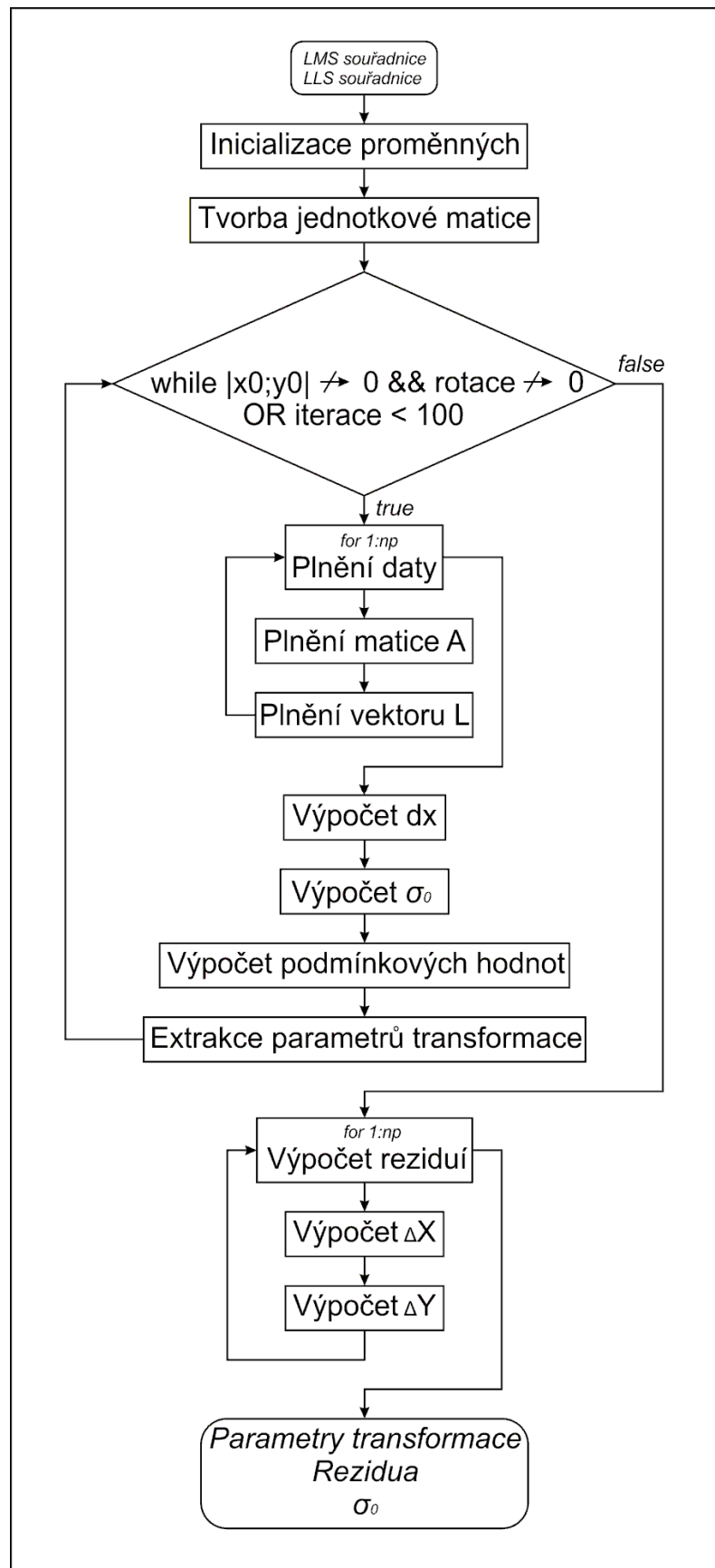
Obr. 16. Schéma výpočtu subpixelové přesnosti v prostředí MATLAB

5.6 Helmertova transformace

Výpočet parametrů Helmertovy transformace je uskutečněn pomocí funkce *Helmert_transformace.m*. Vstupní hodnoty tvoří dvě sady souřadnic, které byly získány pomocí ztotožnění obrazu (*image-matching*) z výše zmíněných metod. Inicializační část funkce zahrnuje tvorbu iterační proměnné a proměnných pro jednotlivé parametry transformace $x0$, $y0$, $rotace$, q . V rámci inicializační části je zajištěna tvorba jednotkové matice, která dále vstupuje do výpočtů a není jí třeba obměňovat. Výpočet parametrů transformace je realizován pomocí cyklu *while*, kdy zastavení cyklu obsahuje dvojí podmínku. Zastavení cyklického výpočtu je v prvním případě realizováno situací, kdy hodnota $rotace$, $x0$ a $y0$ dosáhnou hodnoty blížíící se nule, respektive hodnoty nižší, než $1 \cdot 10^{-8}$. Alternativní variantu zastavení cyklu představuje inkrementace hodnoty iterace, kdy z důvodu nadměrné časové zátěže bylo přistoupeno k omezení výpočtů na sto iterací. V rámci cyklu dochází k tvorbě a plnění matice A , kdy její plnění řeší cyklus *for*, kdy jsou postupně doplněny hodnoty souřadnic x , y z obou datových sad, hodnoty rotací a měřítka. Vzhledem k cyklickému výpočtu v rámci nadřazeného cyklu *while*, jsou hodnoty rotace a měřítka variabilní. Vektor L představuje opět souřadnice x , y z obou datových sad, které jsou doplněny o cyklicky proměnné hodnot $x0$ a $y0$ ze stejného důvodu jako u hodnot rotace a měřítka v matici A . Samotný výpočet parametrů metodou nejmenších čtverců realizuje rovnice:

$$dx = -(A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot L .$$

Výpočet reziduí zajišťuje cyklický výpočet pro všechny vstupní souřadnice ze sekundárního obrazu vůči obrazu primárnímu, tzn. získaná rezidua představují odchylku vůči DMP z LMS. Výstup tvoří vektor *parameters* s parametry transformace $x0$, $y0$, $rotace$, q a vektor *rezidua* s hodnoty reziduí.



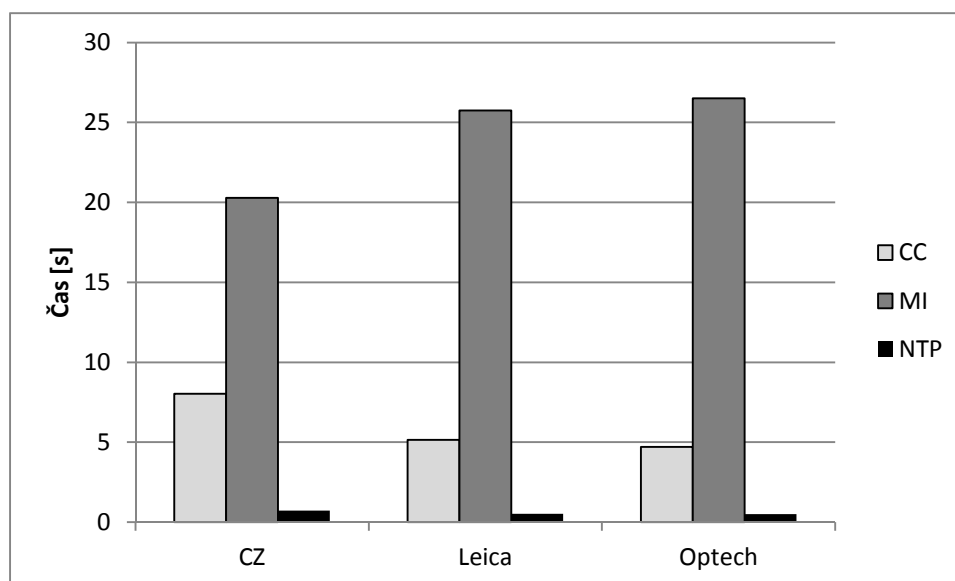
Obr. 17. Schéma výpočtu parametrů a reziduí Helmertovy transformace

KAPITOLA 6

Výsledky

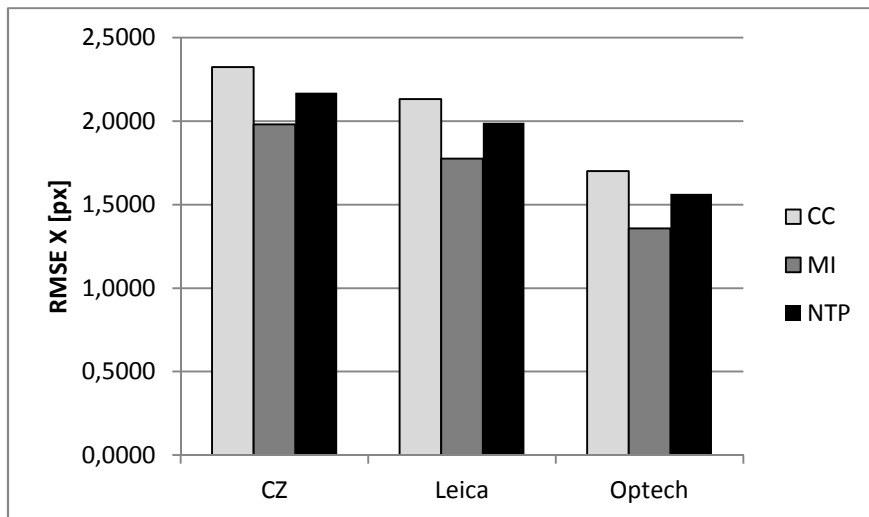
V rámci praktické části koregistrace laserových dat a fotogrammetrických snímků v podobě syntetických snímků proběhlo otestování de facto dvou metod a to metody využívající korelačního koeficientu a metody využívající sdílené informace. Pro objektivní porovnání slouží nová funkce NTP. Výsledky reziduí, hodnot parametrů transformace, odchylky a jejich časová náročnost jsou prezentovány dále. U metody využívající Hausdorffovu vzdálenost nebyly údaje spočteny z důvodu velkého množství chyb ve fázi detekce. Důvody chybovosti této metody budou dále popsány v části věnující se diskuzi nad jednotlivými metodami. Výsledky z komparační funkce ukazují vhodnost obou metod pro konkrétní body vstupující do transformace.

V části věnující se cílům práce se zmiňuje hardwarová náročnost, kterou můžeme přímo nahradit měřitelnou časovou náročností na výpočet koregistrace. Měření trvání výpočtu proběhlo pomocí funkcí *tic* a *toc*. Z grafu č. 1. jasně vyplývá poměrně rozdílná časová náročnost srovnávaných funkcí. Při aplikaci datové sady EuroSDR dochází k nárůstu času výpočtu u metody využívající sdílenou informaci oproti metodě využívající korelaci až 5,6-krát. U datové sady získané od ČÚZK tento rozdíl není tak značný, ale stále je poměrně významný a to s 2,5-krát delší čas výpočtu metody využívající sdílenou informaci oproti metodě využívající korelaci. Při výpočtech bez využití sub-obrazových výřezů primárního obrazu se výpočty koregistrace pohybovaly v hodnotách desítek minut. Aplikace výřezových oken zkrátila dobu výpočtu na sekundové hodnoty při 13-ti dvojicích identických bodů. Čas výpočtu funkce NTP je pouze orientační, neboť v této funkci nedochází k detekci a ztotožnění, ale pouze k porovnání, transformaci výstupů z detekční a ztotožňovací fáze uvedených metod. Tyto hodnoty času se pohybovaly pod 1 sekundou.

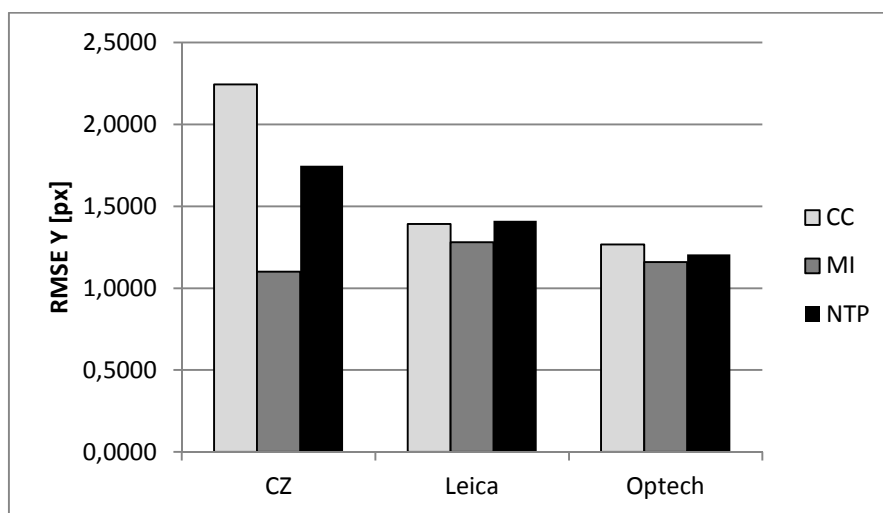


Graf č.1. – Komparace časové náročnosti výpočtů koregistrace v MATLABu

Při komparaci hodnot střední polohové chyby v osách X a Y, zde panuje značný rozdíl zejména u české datové sady, kdy hodnota střední polohové chyby v ose X (RMSE X) se oproti střední polohové chybě v ose Y (RMSE Y) liší o 1 px. Při přímém porovnání metody využívající korelační koeficient s metodou využívající sdílenou informaci je patrné, že u všech testovacích datových sad dosáhla lepších polohových výsledků metoda využívající sdílenou informaci. Na druhou stranu porovnáme-li výsledky středních polohových chyb a čas potřebný k dosažení daných výsledků pomocí grafů č. 1, č. 2 a č. 3, tak nejsou tyto výsledky na tolik odlišné, aby uživatelé volili metodu několikanásobně náročnější na výpočet. Respektive metoda využívající korelační koeficient podává poměrně solidní výsledky ve srovnání s metodou využívající sdílenou informaci, a to za cenu nižší hardwarové – časové náročnosti na výpočet. Rozdíly se pohybují v řádech 0,5 px, tzn. v tomto případě, kdy byly využity DMP s prostorovým rozlišením 0,5 metru, činí tento rozdíl 25 cm, což se vzhledem k dosahovaným odchylkám dnešních technologií v leteckém laserovém skenování a u fotogrammetrických komor, dá považovat za přijatelný výsledek.

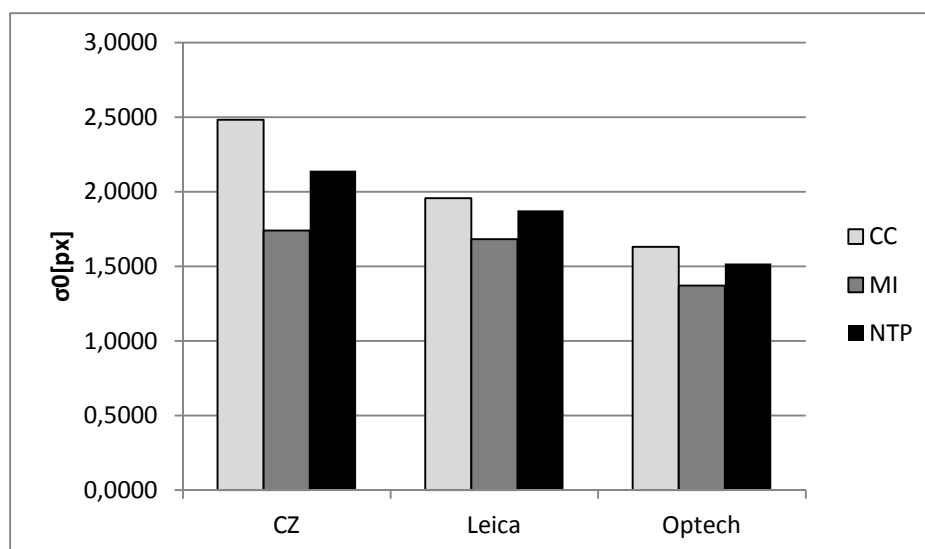


Graf č.2. – Komparace střední polohové chyby v ose X



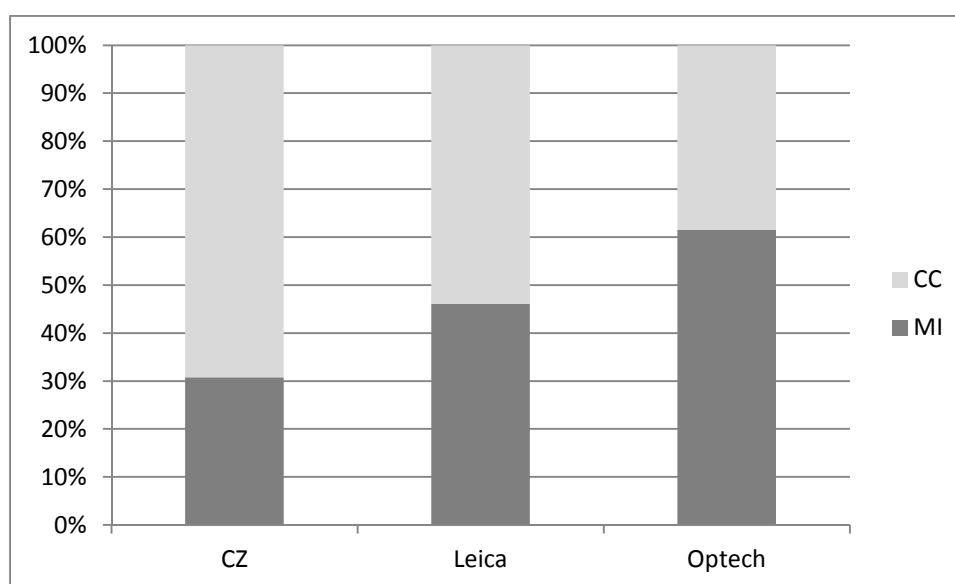
Graf č.3. – Komparace střední polohové chyby v ose Y

Výsledky komparační funkce NTP odpovídají předpokladu, že výsledné hodnoty středních polohových chyb (RMSE) a základní střední chyby ve vyrovnání (σ_0) se pohybují mezi hodnotami metody využívající korelační koeficient a metodou využívající sdílené informace. Důvodem jsou vstupní data do funkce NTP, kdy teoreticky není možné dosáhnout lepších výsledků, než jsou data, ze kterých tato funkce vychází. Tyto výsledky jsou názorně prezentovány grafem č. 4.



Graf č.4. – Komparace základní střední chyby ve vyrovnání

Porovnáme-li procentuální selekci bodů na základě mezi metodou využívající korelační koeficient a metodou využívající sdílenou informaci, tak u datové sady od ČÚZK a datové sady využívající LLS Leica převládaly významnější body detekované metodou korelačního koeficientu. Datová sada využívající LLS Optech u nad poloviční většiny preferovala body detekované metodou sdílené informace, viz graf č. 5.



Graf č.5. – Procentuální selekce bodů z jednotlivých metrik na základě NTP

Z uvedených výpočtů je i patrný jev, kdy výpočty metody využívající sdílenou informaci u datové sady s LLS Optech trvaly nejdéle a zároveň jejich základní střední chyba po transformaci dosahuje nejmenších hodnot. Opačný jev nastal u metody využívající korelační koeficient, tzn. u datové sady od ČÚZK, kde trval čas výpočtu déle oproti datovým sadám z projektu EuroSDR, tak i hodnota základní střední chyby vykazovala nejvyšší hodnotu.

Tabulky 1 – 9 (viz příloha) obsahují hodnoty reziduí před a po transformaci, dále jsou zde uvedeny parametry transformace (dX , dY , rotace a měřítko), střední polohové odchylky v obou osách, základní střední chybu a čas potřebný pro kompletní výpočet. Veškeré výpočty probíhaly na CPU Intel i5 3210M Ivy Bridge 2,5 GHz. Software MATLAB umožňuje výpočet provést pomocí kombinace CPU a GPU, nicméně při výpočtech tento postup zvolen nebyl.

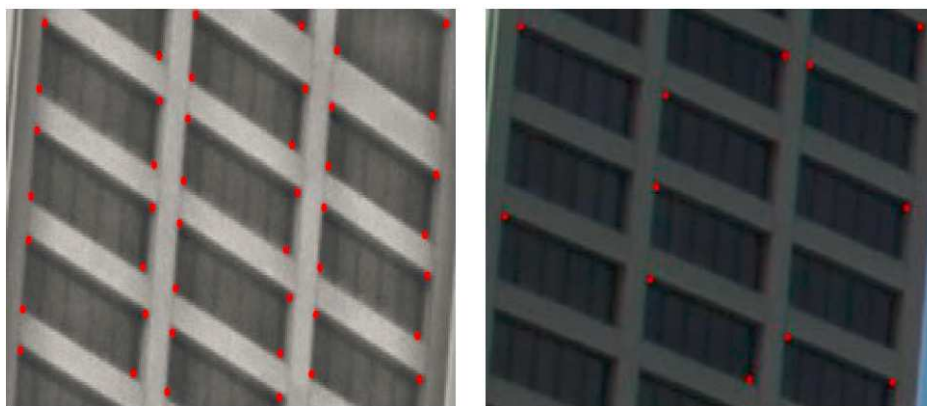
KAPITOLA 7

Diskuze

Tato část se věnuje problematickým místům napříč celým zpracováním dat a jednotlivých metod v rámci této diplomové práce. Zazní zde možné návrhy, které nebyly realizovány buď z důvodu jejich náročnosti na zpracování, respektive by jejich realizace mohla být námětem dalšího praktického výzkumu.

Rešeršní část této práce poukazuje na poměrně značné množství metrik, které jsou v koregistračním procesu využívány. Vzhledem k tomu, že zde byly koregistrovány syntetické snímky, tvořily rešeršní část pouze metody využívané pro obrazová data. Původním záměrem této práce bylo vytvořit koregistrační metodu, respektive metriku úplně novou. Avšak náročnost tohoto cíle se ukázala jako nemožná, neboť aby splňovala optimální charakteristiky, bylo by nutné provést testování na více datových sadách a různých územích, aby bylo dosaženo dostačujících výsledků. Alespoň část předchozí myšlenky byla realizována ve formě funkce NTP, která umožňuje přímou komparaci vybraných metrik pro následnou rozsáhlejší aplikaci na zvolená data. Její princip je založen na využití výsledků z předchozích výpočtů a tím je redukován výpočetní čas. Jelikož zde byl několikrát kladen důraz na čas výpočtu, byly proto varianty, které by detailněji zkoumaly vstupní data z jednotlivých metrik, zavrženy. Možné rozšíření této funkce by mohlo spočívat v selekci vstupních hodnot do funkce, pokud by dosahovaly extrémních hodnot (minim i maxim) a ty buď z výpočtu vyřadit, či zpracovat jinou část obrazu.

Z hlediska selekce jiné části obrazu vstupující do koregistračního procesu nastává otázka automatizace procesu tvorby jednotlivých výřezů obrazu. V této práci byly výřezy obrazů tvořeny manuálním způsobem, jejich automatizace by mohla být založena na speciálních funkcích kombinujících hranové operátory s funkcemi založenými na analýze prostoru, analýze tvarů, které by vyhledávaly statické objekty, např. budovy. Selekcce může být tvořena pomocí tzv. *interest detection*, mezi které patří např. rohové či hranové operátory.



Obr. 18. Aplikace interest operatorů [Jazayeri, 2008]

Eventuelně snazší možnost představuje rozřezání vstupních obrazů podle pravidelné šablony a následný vstup těchto sub-obrazů do koregistračního procesu. Avšak zde je vysoká závislost na počtu výřezů, neboť pro každou dvojici výřezů jsou dále počítány metriky. Je možné, že by docházelo k významnému nárůstu času během celého procesu zpracování. Vzhledem k variabilitě dat z hlediska snímače pořízení, tak i způsobu zpracování – LLS versus LMS, nebyla tato část dále rozvíjena, neboť by zbytečně přesahovala rámec práce. Digitální zpracování obrazů, zde využívané, úzce souvisí s problematikou počítačového vidění (*computer vision*), kde se některé zde zmiňované metody uplatňují v širokém spektru oborů od medicíny [Pluim, 2013] právě po DPZ [Le Moigne, 2011], respektive geoinformatiku.

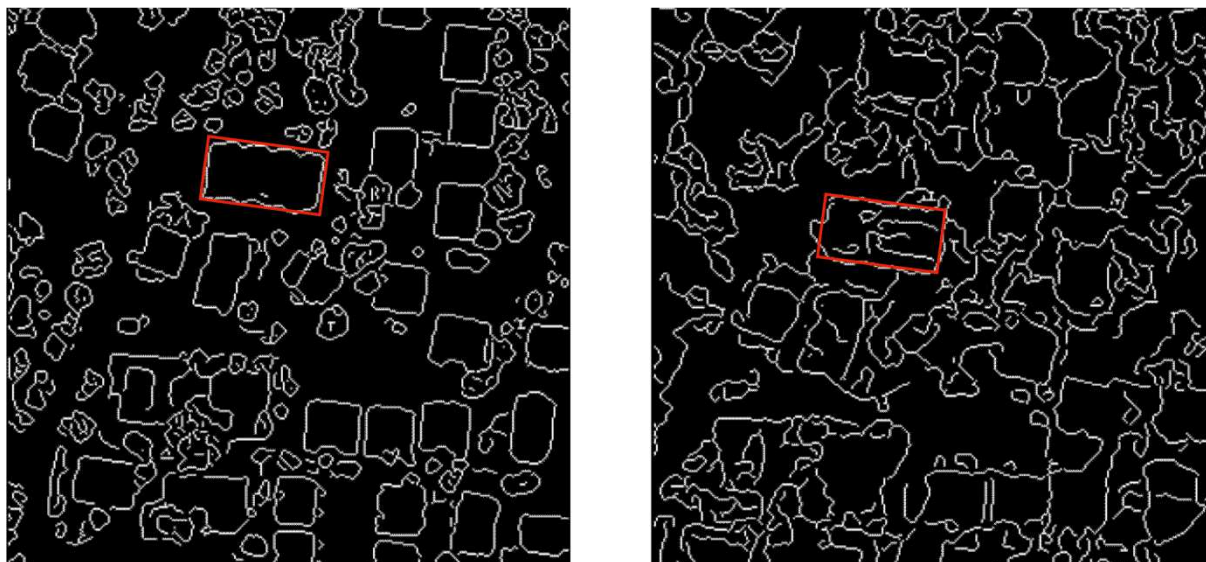
Další problematickou část tvořilo samotné získání a zpracování dat. Jelikož byla veškerá data získávána od různých institucí a nebyla pořizována osobně, došlo zde ke komplikaci v podobě nemožnosti získání surových dat. Ve většině aplikací se již zpracovávají data, která prošla určitým předzpracováním a jejich zdrojové části nejsou veřejnosti k dispozici. Nejvíce byla tato skutečnost patrná u LMS od ČÚZK, kdy webová aplikace poskytuje pouze již zpracované ortofoto, nikoliv původní snímky s hodnotami prvků vnitřní a vnější orientace. Též u dat LLS bývá zpravidla provedena filtrace bodového mračka a jeho převodu z DMP na DMR. Tento převod de facto odstraňuje pro koregistraci nezbytné objekty v podobě budov. Na druhou stranu je pochopitelné, že pro distribuci surových dat široké veřejnosti není příliš důvodů a jejich uplatnění se nachází spíše v akademické sféře.

Data ČÚZK byla distribuována v národním souřadnicovém systému JTSK, a to v podobě hodnot prvků vnější orientace, neboť surové snímky nebyly nijak zpracovány a v podobě bodového mračka LLS modelem DMP. Oproti datům z projektu EuroSDR zde nastaly komplikace právě v podobě souřadnicového systému, kdy nástroje Envi nejsou bez konverze schopné provést výpočet DMP z LMS v S-JTSK. Převodem pomocí nástroje IDL jistě dochází k zanesení určité chyby při přepočtu prvků vnější orientace, neboť přesnost výpočtu se odvíjí od počtu desetinných míst (transformace využívá derivací hodnot). Obecně podpora souřadnicového systému JTSK v softwarových řešeních na zpracování obrazových dat DPZ je téměř nulová a možnost ovlivňovat

kvalitu transformace téměř chybí. Podobně lze mluvit o různých souborových formátech a to zejména u snímků, kdy je konkrétní nástroj vázán na konkrétní souborový formát a často dochází k nutnosti převodů. U dat LLS tyto problémy nenastaly, neboť jsou ve většině případů distribuována ve formátech *.xyz, popř. *.xyzi, což je de facto ASCII reprezentace.

Budeme-li se detailněji zabývat daty, nad kterými byly výpočty prováděny, je zřejmé, že testování probíhalo pouze v městské zástavbě u obou datových sad. Vzhledem k rozsahu působnosti ČÚZK nebyl problém získat i data z venkovských, ne příliš zastavěných oblastí. Nicméně u projektu EuroSDR se testovaly metody pouze v městské, respektive rezidentní zástavbě. Z tohoto důvodu nebyly jednotlivé metody testovány na různém landcover. Kvůli manuální tvorbě výřezů obrazu a de facto závislosti detekce na neměnných objektech, dosahovaly by výsledky koregistrace v rurální krajině značně horších výsledků kvůli ztížené fázi detekce, neboť by do transformace vstupovalo vyšší množství bodů s nejednoznačně detekovaným objektem.

S otázkou typu landcover na testovaných datech souvisí i neúspěch metriky využívající Hausdorffovu vzdálenost. Tato metrika je založena na výpočtu vzdáleností mezi identickými body ve vektorovém modelu. Problém nastává již u prvotní fáze, a to u hranové filtrace, kdy dochází k binarizaci obrazu na části hrana versus zbytek, respektive 1 versus 0. Vytvoříme-li DMP z LMS, LLS a provedeme vizuální porovnání, na první pohled je patrný rozdíl v detekci vegetace viz Obr. 11 a Obr. 12. U DMP z LLS jsou poměrně dobře zachovány tvary statických objektů budov, zatímco u DMP z LMS dojde k deformaci tvarů objektů, viz Obr. 19.

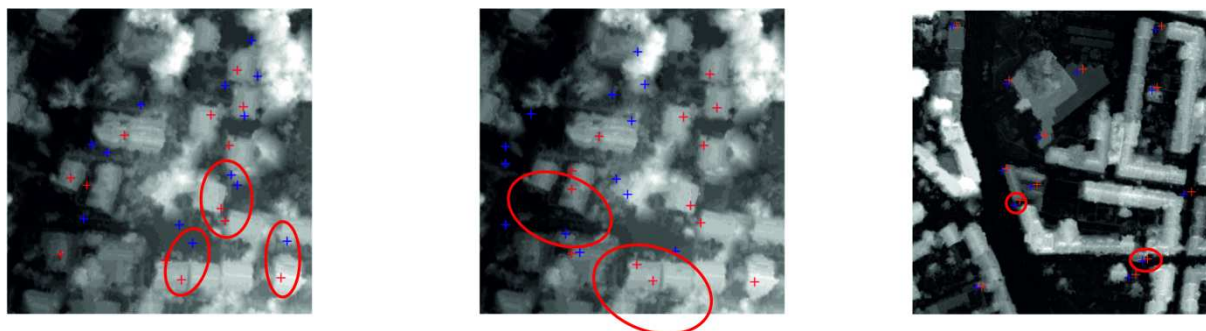


Obr. 19. Porovnání hranové filtrace u LMS a LLS Leica

Deformace je způsobena přiléhající vegetací v těsné blízkosti budov, na základě tohoto jevu je poté hrana mylně detekována a ani různé hranové operátory, či jejich kombinace, popř. jejich vnitřní nastavení nebylo schopno tento problém odstranit. Kvůli tomuto jevu nebyla tato metoda zařazena do komparační funkce NTP. Teoretické řešení tohoto problému spočívá v již výše zmíněné aplikaci *interest detection* [Hýna, 2007] [Kaněčka, 2007] [Jazayeri, 2008], popřípadě využitím podkladových

dat v podobě obrysů budov [Hofman, 2008]. Při otestování této metriky v rámci koregistrace dvou LiDARových datasetů nebyly výše zmíněné problémy přítomny.

Co se týče komparace metody využívající sdílenou informaci a metody využívající korelaci, zde se nabízí otázka, proč dochází k tak diametrálně odlišným časům výpočtu. U metody využívající korelaci dochází v rámci vnořených cyklů k výpočtu korelačního koeficientu mezi dvěma velikostně shodnými obrazy. Tzn. stačí, de facto načíst hodnoty pixelů, dosadit do jednoduchého vzorce a provést výpočet. U metody využívající sdílenou informaci dochází k volání vlastní funkce *NMI.m*, která se skládá z více kroků výpočtu. Na vstupu dochází k převodu hodnot do desetinného datového typu *double*. Následuje normalizace vstupních hodnot. Nejdelší časový úsek z celého zpracování dat ve funkci *NMI.m* je tvořen výpočtem společného histogramu (*joint histogram*). Tento výpočet zabírá přibližně 54 % celkového času výpočtu v rámci funkce *NMI.m*. Další prodloužení výpočtu představují výpočty jednotlivých entropií obrazů a entropie společné. Při porovnání spolehlivosti detekce u obou metod, jsou patrné horší výsledky u metody využívající korelační koeficient. U datové sady využívající LLS Leica se ve dvou případech lišily hodnoty reziduí u metody využívající korelaci proti metodě využívající sdílenou informaci. Konkrétně u dvojic bodů s ID 2, 8 a 9. U datové sady s LLS Optech pouze dvojice bodů s ID 6 a 9. U datové sady získané od ČÚZK u bodů s ID 3 a 8, viz Obr. 18.



Obr. 20. Problémová místa detekce u metody využívající korelační koeficient

Chybná detekce metody využívající korelační koeficient se projevovala na rozhraních budov, byla-li přítomná vegetace nižšího vzrůstu. Menší chybovost metody využívající sdílenou informaci spočívá v komplexnějším zpracování vstupních hodnot, oproti aplikaci korelačního koeficientu. Co se týče porovnání datových sad a chybovosti metrik, nejmenších rozdílů bylo dosaženo u dat s LLS Optech. V rámci optimalizace koregistračního procesu by teoreticky při vyšším počtu identických dvojic bodů mohlo být vyřazení určité dvojice bodů do transformační části, na základě absolutních rozdílů reziduí u dané metriky.

V současnosti se poměrně rozvíjí metoda Semi-global matching, kdy dochází ke koregistraci datových sad ve třírozměrném prostoru. Tato metoda kombinuje různé velikosti vyhledávacích oken s využitím zájmových bodů či tvarů, kdy je často využívána vzájemná korelace (cross-correlation), sdílená informace, či jiná metrika. Proti konvenčnějším metodám, které byly v rámci této práce zpracovány, poskytuje Semi-global matching dobrý poměr přesnosti a náročnosti zpracování, nicméně

se v praktickém využití používá hardwarových akcelérátorů, které už samy o sobě napovídají, že ačkoliv je v relativních měřítkách tato metoda lepší, v absolutních je její implementace a praktické využití omezeno dostupným hardwarem, složitostí implementace a odladění hardwarového vybavení [Hirschmüller, 2011]. Její uplatnění je spíše u LiDARových dat s vysokou hustotou bodů, např. u pozemního laserového skenování nebo snímání pomocí UAV.

V práci byla použita, na základě předpokladu podobnosti dat, Helmertova transformace. Nicméně by v rámci dalšího výzkumu bylo vhodné se zaměřit i na jiné typy transformací a porovnat výsledná rezidua. Zejména pokud by byly vstupní datové sety poškozeny např. špatnými hodnotami vnitřní a vnější orientace apod., mohla by být uplatněna projektivní (kolineární) transformace.

KAPITOLA 8

Závěr

Hlavní cíle této práce spočívaly v přehledu koregistračních metod využitelných na prostorová data a to konkrétně data získaná pomocí metod LLS a LMS za pomoci syntetických snímků. Druhý cíl si kladl za úkol zrealizovat koregistrační proces na českých a zahraničních datových sadách s přihlédnutím k jejich specifikům. V rámci tohoto cíle došlo k porovnání koregistračních metrik a tvorba funkce, která rozhoduje o vhodnosti využití daných metrik na datové sady.

Vstupními daty pro testování tvořily mračna bodů z leteckého laserového skenování a letecké měřické snímky. Výstup je tvořen parametry transformace, na základě kterých je možné samotnou transformaci datových sad provést. Dále jsou porovnány nároky na čas výpočtu a porovnána je též chybovost jednotlivých metrik.

První část práce se věnuje teoretickému rozboru různých koregistračních metod a na základě těchto informací jsou vybrány metody, které jsou dále realizovány programovým kódem v prostředí MATLAB.

Druhá část práce se věnuje samotnému zpracování dat a praktické ukázce koregistračního procesu jako celku na daných datových sadách. Před samotným vstupem dat do skriptů došlo k jejich předzpracování. Základní myšlenka koregistrace použitých datových sad je založena na dvoudimenzionálním prostoru, bylo tedy nutné vstupní data do dvou dimenzí převést. U dat LLS se za pomoci interpolačních metod v prostředí ArcGIS vytvořily jednotlivé DMP. U české datové sady došlo k transformaci ze souřadnicového systému JTSK do UTM, aby byla možná následná komparace s daty finskými. Metodou nejbližšího souseda za pomoci triangulace byly vytvořeny jednotlivé DMP z LLS, respektive jejich syntetické snímky ve formátu *.tif. U datových sad LMS bylo zpracování mnohem zdlouhavější vzhledem k více vstupním datům oproti LLS. Pro tvorbu DMP se využívají LMS a prvky vnitřní a vnější orientace. Zpracování DMP z LMS proběhlo v prostředí Envi, kdy u české datové sady bylo nutné přepočítat prvky vnější orientace ze systému JTSK do UTM za pomoci konzolového nástroje IDL. Prvky vnější orientace na finské datové sadě LMS byly dodány v souřadnicovém systému UTM. Za pomoci extenze DEM Extraction Module v software Envi byly vyextrahovány DMP za pomoci epipolárních dvojic LMS, identických bodu, prvků vnitřní a vnější orientace.

Ze syntetických snímků obou DMP jsou vytvořeny výřezy a ty následně tvoří vstup do koregistračního procesu v rámci programových skriptů vytvořených v prostředí MATLAB. V této části dochází k načtení dat do n-rozměrných maticových proměnných, kdy pomocí volání funkcí a vnořených cyklů dochází k výpočtu vlastních metrik. U metody využívající korelační koeficient je využita funkce *corr2* z nabídky funkcí MATLABu, u ostatních metod jsou vytvořeny vlastní funkce *NMI.m* a *NHD_fce.m*. Metoda využívající Hausdorffovu vzdálenost nebyla využita z důvodů příliš chybné detekční části díky nespolehlivosti hranových operátorů po aplikaci na syntetický snímek DMP z LMS. Výstup z jednotlivých metrik tvoří souřadnice identických dvojic bodů, které slouží jako následný vstup do funkce Helmertovy transformace, kde jsou metodou nejmenších čtverců spočteny residua, parametry transformace, základní střední chyby (RMSE) a polohové chyby (σ_0). Výstup je též tvořen hodnotami času potřebných pro jednotlivé výpočty metrik.

Pomocí komparační funkce NTP je možné uživatelům zjednodušit rozhodnutí o volbě koregistrační metriky na vstupních datových sadách. Tvorba vlastní komplexní koregistrační metody by vyžadovala dlouhodobější výzkum, který by vzhledem k velkému množství metod, šel spíše k modifikaci metod stávajících.

Aplikace koregistračního procesu na různé typy landcover nebyla provedena z důvodu chybějících dat pokrývajících rurální oblasti v projektu EuroSDR, kdy by nebylo poté možné porovnat datové sady získané od ČÚZK a z projektu EuroSDR.

SEZNAM ZDROJŮ DAT A INFORMACÍ

- BALTSAVIAS, E.P. 1999. *A comparison between photogrammetry and laser scanning*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 1999, roč. 54, s. 83 – 94, ISSN: 0924-2716
- BARTOLI, G. 2007. *Image Registration Techniques: A Comprehensive Survey*. Universita degli Studi di Siena: Siena. 2007. [cit. 7. 5. 2012] Dostupné z WWW: <<http://clem.dii.unisi.it/~vipp/projects/firb/files/Registration.pdf>>
- BEBIS, G., DEACONU, T., GEORGIPOULOS, M. 1999. *Fingerprint Identification Using Delaunay Triangulation*. International Conference on Information Intelligence and Systems, 1999, Rockville. s. 452 – 460. 1999, poslední revize 20. 8. 2013 [cit. 7. 6. 2012] Dostupné z WWW: <<http://www.cse.unr.edu/~bebis/CS790Q/PaperPresentations/fingerprintIIS99.pdf>>
- BÖHM, J. 2002. *Fotogrammetrie – učební texty*. Vysoká škola báňská-technická univerzita Ostrava. 2002, Ostrava. s. 16. 2002, poslední revize 20. 8. 2013 [cit. 7. 9. 2012] Dostupné z WWW: <<http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Fotogrammetrie.pdf>>
- BROWN, M., SZELISKI, R., WINDER, S. 2005 *Multi-Image Matching using Multi-Scale Oriented Patches*. IEEE transactions on Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005, roč. 1, s. 510 – 517, ISSN: 1063-6919
- CSANYI, N., TOTH, CH. 2007. *Improvement of Lidar Data Accuracy Using Lidar-Specific Ground Targets*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2007. roč. 73, č. 4, s. 385–396.
- ČÚZK, 2013. *Digitální model povrchu České republiky 1. generace*. 2013. Český úřad zeměměřický a katastrální. 2013
- ČÚZK, 2013. *Letecké měřické snímky*. 2013. Český úřad zeměměřický a katastrální. 2013
- DOLANSKÝ, T. *Lidary a letecké laserové skenování*. Acta Universitatis Purkynianae. Ústí nad Labem. UJEP FŽP. 2004, č. 99, s. 100. ISBN: 80-7044-575-0
- EL-BAKRY, H., MASTORAKIS, N. 2009. *Fast Image Matching on Web Pages*. WSEAS transactions on Signal Processing. 2009, roč. 4, č. 5, s. 157 – 166, ISSN: 1790-5052. 2009, poslední revize 20. 8. 2013 [cit. 5. 5. 2012] Dostupné z WWW: <<http://www.wseas.us/e-library/transactions/signal/2009/32-451.pdf>>
- EUROSDR. 2011. *Letecké měřické snímky*. 2011. EuroSDR Project: Registration Quality – Towards Integration of Laser Scanning and Photogrammetry.
- EUROSDR. 2011. *Mračno bodů z LLS Optech*. 2011. EuroSDR Project: Registration Quality – Towards Integration of Laser Scanning and Photogrammetry.

EUROSDR. 2011. *Mračno bodů z LLS Leica*. 2011. EuroSDR Project: Registration Quality – Towards Integration of Laser Scanning and Photogrammetry.

FITCH, A., KADYROV, A. 2005. *Fast Robust Correlation*. IEEE transactions on Image Processing. 2005, roč. 14, č. 8, s. 1063 – 1073. ISSN: 1057-7149, 2005, poslední revize 20. 8. 2013 [cit. 1. 6. 2012] Dostupné z WWW: <<http://www3.ee.surrey.ac.uk/CVSSP/Publications/papers/fitch-ip05.pdf>>

FULÍN, T. 2003. *Porovnání výpočetních funkcí geodetických programů*. Praha, 2003. poslední revize 20. 8. 2013 [cit. 4. 8. 2012] Diplomová práce na Stavební fakultě Českého vysokého učení technického v Praze. Dostupné z WWW: <<http://geo3.fsv.cvut.cz/~soukup/dip/fulin/>>

GRUSSENMEYER, P., AL KHALIL, O. 2002. *Solutions for exterior orientation in photogrammetry*. The photogrammetry record, an international journal of photogrammetry. 2002. roč. 17, č. 100, s. 615 – 634. ISSN: 1477-9730

HIRSCHMULLER, H. 2011. *Semi-Global Matching – Motivation, Developments and Applications*. Photogrammetrische Woche 2011. 2011, poslední revize 20. 8. 2013 [cit. 21. 7. 2013] Dostupné z WWW: <<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/>>

HOFMAN, P. 2008. *Vytvoření modelů budov z leteckých měřických snímků a řídkého bodového mračna*. [rukopis]. Praha, 2008. 88 s. Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy na katedře aplikované geoinformatiky a kartografie.

HORÁK, K. 2010. *Detekce přítomnosti a kompletnosti výrobků*. 2010, Studijní materiály předmětu Applications of Computer Vision, VUT, Brno. 2010, poslední revize 20. 8. 2013 [cit. 18. 6. 2012] Dostupné z WWW: <<http://www.uamt.feec.vutbr.cz/vision/TEACHING/MAPV/mapv.html>>

HÝNA, P. 2007. *Detekce rohů v obrazech*. [rukopis]. Brno, 2008, 54 s. Bakalářská práce na Fakultě informačních technologií Vysokého učení technického v Brně na ústavu počítačové grafiky a multimédií.

CHANG, S-H. a kol. 1997. *Fast Algorithm for Point Pattern Matching: Invariant to Translations, Rotations and Scale Changes*. Pattern Recognition. 1997, roč. 30, č. 2, s. 311 – 320. ISSN: 0031-3203

CHO, M. 2005. *Improved Approximation Bounds for Planar Point Pattern Matching*. MOUNT, D.M. 2005, Proceedings. Lecture Notes in Computer Science, s. 432 – 443. ISBN: 3-540-28101-0

JANDA, M. 2008. *Cannyho operátor a další používané hranové operátory*. [rukopis]. Brno, 2008, 39 s. Bakalářská práce na Fakultě informačních technologií Vysokého učení technického v Brně na ústavu počítačové grafiky a multimédií.

JAZAYERI, I., FRASER, 2008. *Interest Operators in Close-Range Object Reconstruction*. ISPRS Conference, Beijing. 2008, č. 37, s. 67 – 74. 2008, poslední revize 20. 8. 2013

[cit. 18. 5. 2012] Dostupné z WWW:

<<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/tc5.aspx>>

JIA, W., ZHANG, H., HE, X. 2007. *Region based licence plate detection*. Journal of Network and Computer Applications. 2007, roč. 30, č.4, s. 1324 – 1333. ISSN: 10848045. 2007, poslední revize 23. 8. 2013 [cit. 4. 4. 2013] Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804506000762>>

KANĚČKA, P. 2007. *Vyhledání význačných bodů v rastrovém obraze*. [rukopis]. Brno, 2007, 63 s. Diplomová práce na Fakultě informačních technologií Vysokého učení technického v Brně na ústavu počítačové grafiky a multimédií.

KRAUS, K. 2007. *Photogrammetry*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. 2007, 459 s. ISBN: 978-3-11-019007-6

LE MOIGNE, J. a kol. 2011. *Image registration for remote sensing*. Cambridge: Cambridge University Press. 2011, 498 s. ISBN: 978-0521516112

MAJUMDAR, J., DILIP, Y. 2000. *Image registration and target tracking*. Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing. 2000, poslední revize 4. 10. 2012 [cit. 4. 10. 2012] Dostupné z WWW: <<http://www.iiit.ac.in/research/cvit/icvgip00/I-60.pdf>>

MOUNT, D.M., NETANYAHU, N.S. 1998. *Improved Algorithms for Robust Point Pattern Matching and Applications to Image Registration*. Proceedings of the fourteenth annual symposium on Computational geometry. 1998, ACM – New York, s. 155 – 164, ISBN: 0-89791-973-4.

PAVELKA, K. 2011. *Zpráva o řešení projektu 2009 – 2010. Projekt č. CG 912-105-520*. České vysoké učení technické. 2011, poslední revize 20. 8. 2013 [cit. 4. 5. 2012] Dostupné z WWW: <<http://lfgm.fsv.cvut.cz/mdcr/publikace/2010/zpr%C3%A1va%201-%C4%8D%C3%A1st.pdf>>

PIATTI, D. 2010. *Time-of-Flight cameras: tests, calibration and multi-frame registration for automatic 3D object reconstruction*. Doctoral school of Environment and Territory. 2010, poslední revize 17. 8. 2013 [cit. 4. 9. 2012] Dostupné z WWW: <http://www.academia.edu/500056/Time-of-Flight_cameras_tests_calibration_and_multiframe_registration_for_automatic_3D_object_reconstruction>

PIROTTI, F., GUARNIERI, A., VETTORE, A. 2013. *State of the Art of Ground and Aerial Laser Scanning Technologies for High-Resolution Topography of the Earth Surface*. European Journal of Remote Sensing. 2013. č. 46, s. 66 – 78. ISSN: 2039-7879

PLUIM, J., MAINTZ, A., VIERGEVER, M. 2003. *Mutual-information-based Registration of Medical Images: A survey*. IEEE transactions on Medical Imaging. 2003, roč. 20, č. 8, s. 986 – 1004

POTŮČKOVÁ, M. 2004. *Image matching and its application in photogrammetry*. [rukopis]. Aalborg, 2004. 149 s. Dizertační práce na Stavební fakultě Českého vysokého učení technického v Praze na katedře mapování a kartografie.

POTŮČKOVÁ, M. 2012. *Transformace obrazu*. 2012, Studijní materiály předmětu Získávání informace z dat dálkového průzkumu Země, PřF UK, Praha.

PRATT, W. 1973. *Correlation Techniques of Image Registration*. IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1973, roč. AES-10, s. 353 – 358

RÖNHOLM, P. 2011. Registration Quality – Towards Integration Laser Scanning and Photogrammetry. EuroSDR Amsterdam. 2011, s. 9 – 254. 2011, poslední revize 17. 8. 2013 [cit. 5. 5. 2012] Dostupné z WWW: <<http://www.eurocdr.net/publications/59.pdf>>

RYBA, J. 2009. *Corner-point detection on CUDA*. Student EEICT Conference, Brno. 2009, poslední revize 17. 7. 2013 [cit. 18. 5. 2012] Dostupné z WWW: <<http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2009/sbornik/01-Bakalarske%20projekty/08-Grafika%20a%20multimedia/index.html>>

SCHENK, T. 2005. *Introduction to Photogrammetry*. Ohio State University. 2005, poslední revize 22. 8. 2013 [cit. 1. 12. 2012] Dostupné z WWW: <<http://www.mat.uc.pt/~gil/downloads/IntroPhoto.pdf>>

SMUTNÝ, J., PAZDERA, L. 1999. *Využití moderních matematických postupů při analýze dynamických účinků od kolejové dopravy*. Vědeckotechnický sborník. č. 8. ISSN: 1211-2321. 1999, poslední revize 17. 8. 2013 [cit. 18. 5. 2012] Dostupné z WWW: <<http://www.cdrrail.cz/vts/vts08.html>>

SZELISKI, R. 2011. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer. 2011, 812 s. ISBN 978-1-84882-934-3. 2011, poslední revize 17. 8. 2013 [cit. 18. 5. 2012] Dostupné z WWW: <<http://mesh.brown.edu/engn1610/szeliski/04-FeatureDetectionAndMatching.pdf>>

TSENG, Y-H., TZEN, J-J. 1997. *Image-to-Image Registration by Matching Area Features Using Fourier Descriptors and Neural Networks*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1997, roč. 63, č. 8, s. 975 – 983. ISSN: 0099-1112. 1997, poslední revize 17. 8. 2013 [cit. 5. 5. 2012] Dostupné z WWW: <http://beta.asprs.org/a/publications/pers/97journal/august/1997_aug_975-983.pdf>

VÁŇOVÁ, S. 2009. *Zpracování leteckých snímků na ukázce časové řady vybraného území*. [rukopis]. Brno, 2009, 77 s. Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity na Geografickém ústavu.

VARJO, S., HANNUKSELA, J. 2011. *Mutual Information Refinement for Flash-no-Flash Image Alignment*. Proceedings of the 13th international conference on Advanced concepts for intelligent vision systems. 2011, Springer-Verlag – Heidelberg, s. 405 – 416, ISBN: 978-3-642-23686-0

VEJROVÁ, L. 2008. Vizualizace kartometrických charakteristik našich nejstarších map v software MapAnalyst. [rukopis]. Praha, 2008, s. 47. Bakalářská práce na Stavební fakultě Českého vysokého učení technického v Praze.

WALKER, J.S. 2006. *Wavelet-based Image Processing*. *Applicable Analysis*. 2006, č. 85, s. 439 – 458. ISSN: 0003-6811. 2006, poslední revize 17. 8. 2013 [cit. 7. 5. 2012] Dostupné z WWW: <<http://www.uwec.edu/walkerjs/media/WBIP.pdf>>

WANG, H.L. a kol. 2008. *Analysis of Reliability and Impact Factors of Mutual Information Similarity Criterion for Remote Sensing Imagery Template Matching*. AN, R. *Proceedings of the 21st. ISPRS Congress*. 2008, Beijing, roč. 38. s. 1129 – 1134. 2008, poslední revize 17. 8. 2013 [cit. 18. 6. 2012] Dostupné z WWW: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/192.pdf>

WEGMANN, H., HEIPKE, CH., JACOBSEN, K. 2004. *Direct sensor orientation based on GPS network solutions*. *ISPRS Congress Istanbul – Commission I*. 2004, poslední revize 10. 8. 2013 [cit. 6. 10. 2012] Dostupné z WWW: <http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/wegmann_heijac_04_istanbul.pdf>

ZÍTOVÁ, B., FLUSSER, J. 2003. *Image registration methods: a survey*. *Image and Vision Computing*. 2003, roč. 21, s. 977 – 1000. 2003, poslední revize 17. 8. 2013 [cit. 5. 5. 2012] Dostupné z WWW: <<http://library.utia.cas.cz/prace/20030125.pdf>>

SEZNAM PŘÍLOH A TABULEK

Příloha 1: Inicializační skript pro výpočet koregistrace pomocí korelační metody – LLS Leica a LMS – CC_EuroSDR_Leica_subpx.m.....	63
Příloha 2: Funkce výpočtu koregistrace pomocí korelační metody – CC_fce.m.....	66
Příloha 3: Inicializační skript pro výpočet koregistrace pomocí metody sdílené informace – LLS Leica a LMS - MI_EuroSDR_Leica_subpx.m.....	66
Příloha 4: Funkce výpočtu koregistrace pomocí metody sdílené informace – MI_fce.m.....	68
Příloha 5: Funkce výpočtu hodnot sdílené informace – NMI_fce.m.....	69
Příloha 6: Inicializační skript pro výpočet koregistrace pomocí Hausdorffovy vzdálenosti – LLS Leica a LMS - HD_EuroSDR_Leica_subpx.m.....	69
Příloha 7: Funkce výpočtu koregistrace pomocí Hausdorffovy vzdálenosti – HD_fce.m.....	71
Příloha 8: Funkce výpočtu hodnot Hausdorffovy vzdálenosti – NHD_fce.m.....	72
Příloha 9: Inicializační skript pro výpočet selektivní metody NTP – LLS Leica a LMS – NTP_EuroSDR_Leica_subpix.m.....	72
Příloha 10: Funkce výpočtu hodnot selekce u metody NTP – NTPmatch.m.....	74
Příloha 11: Funkce výpočtu hodnot subpixelové přesnosti – subpixel.m.....	75
Příloha 12: Funkce výpočtu Helmertovy transformace – helmert_transformace.m.....	75
Tabulka 1: Výstupy z koregistrační metody využívající korelační koeficient – LLS Leica a LMS.....	77
Tabulka 2: Výstupy z koregistrační metody využívající sdílenou informaci – LLS Leica a LMS.....	78
Tabulka 3: Výstupy z komparační funkce NTP – LLS Leica a LMS.....	78
Tabulka 4: Výstupy z koregistrační metody využívající korelační koeficient – LLS Optech a LMS...	79
Tabulka 5: Výstupy z koregistrační metody využívající sdílenou informaci – LLS Optech a LMS....	79
Tabulka 6: Výstupy z komparační funkce NTP – LLS Optech a LMS.....	80
Tabulka 7: Výstupy z koregistrační metody využívající korelační koeficient – LLS ČÚZK a LMS ...	80
Tabulka 8: Výstupy z koregistrační metody využívající sdílenou informaci – LLS ČÚZK a LMS.....	81
Tabulka 9: Výstupy z komparační funkce NTP – LLS ČÚZK a LMS.....	81

Příloha 1: Inicializační skript pro výpočet koregistrace pomocí korelační metody – LLS Leica a LMS – CC_EuroSDR_Leica_subpx.m

```

clc
clear
close all force
tic
%% Nacteni vstupnich obrazu
img1 = imread('DSM_LMS_jih81.tif');
img2a = imread('DSM_Leica_jih81.tif');
img2(:, :, 1) = imread('DSM_Leica_jih81_min1.tif');
img2(:, :, 2) = imread('DSM_Leica_jih81_min2.tif');
img2(:, :, 3) = imread('DSM_Leica_jih81_min3.tif');
img2(:, :, 4) = imread('DSM_Leica_jih81_min4.tif');
img2(:, :, 5) = imread('DSM_Leica_jih81_min5.tif');
img2(:, :, 6) = imread('DSM_Leica_jih81_min6.tif');
img2(:, :, 7) = imread('DSM_Leica_jih81_min7.tif');

```

```

img2(:,:,8) = imread('DSM_Leica_jih81_min8.tif');
img2(:,:,9) = imread('DSM_Leica_jih81_min9.tif');
img2(:,:,10) = imread('DSM_Leica_jih81_min10.tif');
img2(:,:,11) = imread('DSM_Leica_jih81_min11.tif');
img2(:,:,12) = imread('DSM_Leica_jih81_min12.tif');
img2(:,:,13) = imread('DSM_Leica_jih81_min13.tif');
img_sub1(:,:,1) = imread('DSM_LMS_jih81_sub1.tif');
img_sub1(:,:,2) = imread('DSM_LMS_jih81_sub2.tif');
img_sub1(:,:,3) = imread('DSM_LMS_jih81_sub3.tif');
img_sub1(:,:,4) = imread('DSM_LMS_jih81_sub4.tif');
img_sub1(:,:,5) = imread('DSM_LMS_jih81_sub5.tif');
img_sub1(:,:,6) = imread('DSM_LMS_jih81_sub6.tif');
img_sub1(:,:,7) = imread('DSM_LMS_jih81_sub7.tif');
img_sub1(:,:,8) = imread('DSM_LMS_jih81_sub8.tif');
img_sub1(:,:,9) = imread('DSM_LMS_jih81_sub9.tif');
img_sub1(:,:,10) = imread('DSM_LMS_jih81_sub10.tif');
img_sub1(:,:,11) = imread('DSM_LMS_jih81_sub11.tif');
img_sub1(:,:,12) = imread('DSM_LMS_jih81_sub12.tif');
img_sub1(:,:,13) = imread('DSM_LMS_jih81_sub13.tif');
%% -----
np = 1; %- inicializace cyklicke hodnoty
szimg2 = size(img2); %- velikost n-rozmerne matice s img2
np = szimg2(3); %- pocet img2 v n-rozmerne matici
r_coord = zeros(1,np); %- tvorba matice souradnic r
c_coord = zeros(1,np); %- tvorba matice souradnic c
CC_c = zeros(1,np); %- tvorba matice CC informace
%% -----
for i = 1:np %- cyklicky vypocet souradnic r,c a hodnoty CC
    [r_LMS, c_LMS, CC_coef] = CC_fce(img_sub1(:,:,i),img2(:,:,i));
    r_coord(i) = r_LMS;
    c_coord(i) = c_LMS;
    CC_c(i) = CC_coef;
end
CC_vystupy = [r_coord , c_coord , CC_c]; %- vystupni r,c,CC
%%
r_coord = r_coord+25; %% zmena
c_coord = c_coord+25;

LMS_coord = zeros(np,2);
LMS_coord(:,1) = c_coord'; %- column / X
LMS_coord(:,2) = r_coord'; %- row / Y

%- pricteni coords jednotlivych primary sub-obrazu k LMS coord
% LMS sub coords ze souboru
sub = (load('sub_coords.txt'))';
LMS_coord = [LMS_coord(:,1)+sub(:,1),LMS_coord(:,2)+sub(:,2)];
save('CC_c.mat','CC_c','LMS_coord')

% ALS coords ze souboru
ALS_coord = load('ALS_coords_Leica.txt');

H_fig1 = figure;
imshow(img1)
hold on
plot(LMS_coord(:,1),LMS_coord(:,2),'+r')
print(H_fig1,'-djpeg','CC_Leica_f1')

H_fig2 = figure;
imshow(img2a)
hold on

```

```

plot(ALS_coord(:,1),ALS_coord(:,2),'+b')
print(H_fig2,'-djpeg','CC_Leica_f2')

H_fig3 = figure;
imshow(img1)
hold on
plot(ALS_coord(:,1),ALS_coord(:,2),'+b')
plot(LMS_coord(:,1),LMS_coord(:,2),'+r')
print(H_fig3,'-djpeg','CC_Leica_f3')

save('CC_Leica_ALS_coord.mat','ALS_coord')
save('CC_Leica_LMS_coord.mat','LMS_coord')

[parameters,rezidua2] = helmert_transformace(ALS_coord,LMS_coord)
save('CC_Leica_Helm_Parameters.mat','parameters')
save('CC_Leica_Helm_Residuals.mat','rezidua2')

xx = rezidua2(:,1);
yy = rezidua2(:,2);

xmean = mean(xx);
ymean = mean(yy);
nn = size(xx);
nx = nn(1);
ny = nx;

RMSEx = sqrt(sum(xx.^2)/nx);
RMSEy = sqrt(sum(yy.^2)/ny);
sigma0x = sqrt(sum(xx.^2+yy.^2)/(2*nx-4));

toc
cas = toc;
%-----
%- Export dat do ASCII
save 'output_CC_Leica.txt' RMSEx RMSEy sigma0x parameters rezidua2 cas -
ascii
out=fopen('output_CC_Leica.txt','w');
fprintf(out,'Image matching EuroSDR - Leica ALS & LMS - Correlation like
method\r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Míry přesnosti sjednocení obrazu: \r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'RMSE x: %7.5f \r\n',RMSEx);
fprintf(out,'RMSE y: %7.5f \r\n',RMSEy);
fprintf(out,'Sigma0 x: %7.5f \r\n',sigma0x);
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Parametry transformace: \r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'delta x: %7.5f \r\n',parameters(1));
fprintf(out,'delta y: %7.5f \r\n',parameters(2));
fprintf(out,'rotace: %7.5f \r\n',parameters(3));
fprintf(out,'měřítko: %7.5f \r\n',parameters(4));
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Rezidua x a y\r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'%7.5f %7.5f \r\n', xx, yy);
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Čas: %7.5f \r\n',cas);
fclose(out);

```

Příloha 2: Funkce výpočtu koregistrace pomocí korelační metody – CC_fce.m

```

%% Inicializace vypočtu Mutual information
function [row, column, max_coef, CC_matrix] = CC_fce(img1,img2)
%% Zjisteni velikosti vstupnich obrazu
size_BI = size(img1);
size_SI = size(img2);
%% Tvorba prazdne matice
CC_matrix = zeros(size_BI(1)-size_SI(1)+1,size_BI(2)-size_SI(2)+1); %-
velikost CC matice
%% Cyklicky vypočet CC
for r = 1:size_BI(1)-size_SI(1)+1      %- radkovy cyklus
    for c = 1:size_BI(2)-size_SI(2)+1  %- sloupcovy cyklus
        vyrez = img1(r:r+size_SI(1)-1, c:c+size_SI(2)-1); %- vyrez a
posun
        CC_matrix(r,c) = corr2(img2, vyrez); %- vypočet CC
    end
end
end
%% Vystupy
[max_coef] = max(CC_matrix(:)); %- vyhledani maxima CC
[row_full,column_full] = find(CC_matrix == max(CC_matrix(:))); %-
souradnice r,c maxima CC
[row,column] = subpixel(CC_matrix,row_full,column_full); %- subpixelova
presnost dopocet

```

Příloha 3: Inicializační skript pro výpočet koregistrace pomocí metody sdílené informace – LLS Leica a**LMS - MI_EuroSDR_Leica_subpx.m**

```

clc
clear
close all force
tic
%% Nacteni vstupnich obrazu
img1 = imread('DSM_LMS_jih81.tif');
img2a = imread('DSM_Leica_jih81.tif');
img2(:, :, 1) = imread('DSM_Leica_jih81_min1.tif');
img2(:, :, 2) = imread('DSM_Leica_jih81_min2.tif');
img2(:, :, 3) = imread('DSM_Leica_jih81_min3.tif');
img2(:, :, 4) = imread('DSM_Leica_jih81_min4.tif');
img2(:, :, 5) = imread('DSM_Leica_jih81_min5.tif');
img2(:, :, 6) = imread('DSM_Leica_jih81_min6.tif');
img2(:, :, 7) = imread('DSM_Leica_jih81_min7.tif');
img2(:, :, 8) = imread('DSM_Leica_jih81_min8.tif');
img2(:, :, 9) = imread('DSM_Leica_jih81_min9.tif');
img2(:, :, 10) = imread('DSM_Leica_jih81_min10.tif');
img2(:, :, 11) = imread('DSM_Leica_jih81_min11.tif');
img2(:, :, 12) = imread('DSM_Leica_jih81_min12.tif');
img2(:, :, 13) = imread('DSM_Leica_jih81_min13.tif');
img_sub1(:, :, 1) = imread('DSM_LMS_jih81_sub1.tif');
img_sub1(:, :, 2) = imread('DSM_LMS_jih81_sub2.tif');
img_sub1(:, :, 3) = imread('DSM_LMS_jih81_sub3.tif');
img_sub1(:, :, 4) = imread('DSM_LMS_jih81_sub4.tif');
img_sub1(:, :, 5) = imread('DSM_LMS_jih81_sub5.tif');
img_sub1(:, :, 6) = imread('DSM_LMS_jih81_sub6.tif');
img_sub1(:, :, 7) = imread('DSM_LMS_jih81_sub7.tif');
img_sub1(:, :, 8) = imread('DSM_LMS_jih81_sub8.tif');
img_sub1(:, :, 9) = imread('DSM_LMS_jih81_sub9.tif');
img_sub1(:, :, 10) = imread('DSM_LMS_jih81_sub10.tif');
img_sub1(:, :, 11) = imread('DSM_LMS_jih81_sub11.tif');
img_sub1(:, :, 12) = imread('DSM_LMS_jih81_sub12.tif');

```



```
img_sub1(:,:,13) = imread('DSM_LMS_jih81_sub13.tif');
%% -----
np = 1; %- inicializace cyklicke hodnoty
szimg2 = size(img2); %- velikost n-rozmerne matice s img2
np = szimg2(3); %- pocet img2 v n-rozmerne matici
r_coord = zeros(1,np); %- tvorba matice souradnic r
c_coord = zeros(1,np); %- tvorba matice souradnic c
MI_c = zeros(1,np); %- tvorba matice MI informace
%% -----
for i = 1:np %- cyklicky vypocet souradnic r,c a hodnoty MI
    [r_LMS, c_LMS, MI_coef] = MI_fce(img_sub1(:,:,i),img2(:,:,i));
    r_coord(i) = r_LMS;
    c_coord(i) = c_LMS;
    MI_c(i) = MI_coef;
end
MI_vystupy = [r_coord , c_coord , MI_c]; %- vystupni r,c,MI
%%
r_coord = r_coord+25; %% zmena
c_coord = c_coord+25;

LMS_coord = zeros(np,2);
LMS_coord(:,1) = c_coord'; %- column / X
LMS_coord(:,2) = r_coord'; %- row / Y

%- pricteni coords jednotlivych primary sub-obrazu k LMS coord
% LMS sub coords ze souboru
sub = (load('sub_coords.txt'))';
LMS_coord = [LMS_coord(:,1)+sub(:,1),LMS_coord(:,2)+sub(:,2)];
save('MI_c.mat','MI_c','LMS_coord')

ALS_coord = load('ALS_coords_Leica.txt');

H_fig1 = figure;
imshow(img1)
hold on
plot(LMS_coord(:,1),LMS_coord(:,2),'+r')
print(H_fig1,'-djpeg','MI_Leica_f1')

H_fig2 = figure;
imshow(img2a)
hold on
plot(ALS_coord(:,1),ALS_coord(:,2),'+b')
print(H_fig2,'-djpeg','MI_Leica_f2')

H_fig3 = figure;
imshow(img1)
hold on
plot(ALS_coord(:,1),ALS_coord(:,2),'+b')
plot(LMS_coord(:,1),LMS_coord(:,2),'+r')
print(H_fig3,'-djpeg','MI_Leica_f3')

save('MI_Leica_ALS_coord.mat','ALS_coord')
save('MI_Leica_LMS_coord.mat','LMS_coord')

[parameters,rezidua2] = helmert_transformace(ALS_coord,LMS_coord)
save('MI_Leica_Helm_Parameters.mat','parameters')
save('MI_Leica_Helm_Residuals.mat','rezidua2')

xx = rezidua2(:,1);
yy = rezidua2(:,2);
```

```

xmean = mean(xx);
ymean = mean(yy);
nn = size(xx);
nx = nn(1);
ny = nx;

RMSEx = sqrt(sum(xx.^2)/nx);
RMSEy = sqrt(sum(yy.^2)/ny);
sigma0x = sqrt(sum(xx.^2+yy.^2)/(2*nx-4));

toc
cas = toc;
%-----
%- Export dat do ASCII
save 'output_MI_Leica.txt' RMSEx RMSEy sigma0x parameters rezidua2 cas -
ascii
out=fopen('output_MI_Leica.txt','w');
fprintf(out,'Image matching EuroSDR - Leica ALS & LMS - Mutual information
method\r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Míry přesnosti sjednocení obrazu: \r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'RMSE x: %7.5f \r\n',RMSEx);
fprintf(out,'RMSE y: %7.5f \r\n',RMSEy);
fprintf(out,'Sigma0 x: %7.5f \r\n',sigma0x);
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Parametry transformace: \r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'delta x: %7.5f \r\n',parameters(1));
fprintf(out,'delta y: %7.5f \r\n',parameters(2));
fprintf(out,'rotace: %7.5f \r\n',parameters(3));
fprintf(out,'měřítko: %7.5f \r\n',parameters(4));
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Rezidua x a y\r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'%7.5f %7.5f \r\n', xx, yy);
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Čas: %7.5f \r\n',cas);
fclose(out);

```

Příloha 4: Funkce výpočtu koregistrace pomocí metody sdílené informace – MI_fce.m

```

%% Inicializace vypoctu Mutual information
function [row, column, max_coef, MI_matrix] = MI_fce(img1,img2)
%% Zjisteni velikosti vstupnich obrazu
size_BI = size(img1);
size_SI = size(img2);
%% Tvorba prazdne matice
MI_matrix = zeros(size_BI(1)-size_SI(1)+1,size_BI(2)-size_SI(2)+1); %-
velikost MI matice
%% Cyklicky vypocet MI
for r = 1:size_BI(1)-size_SI(1)+1      %- radkovy cyklus
    for c = 1:size_BI(2)-size_SI(2)+1  %- sloupcovy cyklus
        vyrez = img1(r:r+size_SI(1)-1, c:c+size_SI(2)-1); %- vyrez a
posun
        MI_matrix(r,c) = NMI_fce(img2, vyrez); %- vypocet MI
pomoci funkce NMI_fce
    end
end

```

```

%% Vystupy
[max_coef] = max(MI_matrix(:)); % - vyhledání maxima MI
[row_full,column_full] = find(MI_matrix == max(MI_matrix(:))); % -
souradnice r,c maxima MI
[row,column] = subpixel(MI_matrix,row_full,column_full); % - subpixelova
presnost dopocet

```

Příloha 5: Funkce výpočtu hodnot sdílené informace – NMI_fce.m

```

%% Vypocet Mutual information
function [ NMI ] = NMI_fce(img1,img2)
img1 = double(img1);
img2 = double(img2);

img1_norm = img1 - min(img1(:)) + 1; % - normalizace hodnot obrazu 1
img2_norm = img2 - min(img2(:)) + 1; % - normalizace hodnot obrazu 2

mat12(:,1) = img1_norm(:); % - obrazy do matice
mat12(:,2) = img2_norm(:); % - obrazy do matice
jhist = accumarray(mat12+1,1); % - spolecny histogram (joint)
njhist = jhist./sum(jhist(:)); % - norm spolecny histogram (joint)

img1_sum = sum(njhist,2); % - sumace v radcich njhdist
img2_sum = sum(njhist,1); % - sumace v sloupcich njhdist
Ent_img1 = - sum(img1_sum.*log2(img1_sum + (img1_sum==0))); % - Entropie
img1
Ent_img2 = - sum(img2_sum.*log2(img2_sum + (img2_sum==0))); % - Entropie
img2

arg_img12 = njhist.*(log2(njhist+(njhist==0)));
Ent_img12 = sum(-arg_img12(:)); % - spolecna entropie
Ent(img1,img2) (joint)

NMI = Ent_img1 + Ent_img2 - Ent_img12; % - MI

```

Příloha 6: Inicializační skript pro výpočet koregistrace pomocí Hausdorffovy vzdálenosti – LLS Leica a

LMS - HD_EuroSDR_Leica_subpx.m

```

clc
clear
close all force
tic
%% Nacteni vstupnich obrazu
img1 = edge(imread('DSM_LMS_jih81.tif'),'canny',0.15);
img2a = edge(imread('DSM_Leica_jih81.tif'),'canny',0.15);
img2(:, :, 1) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min1.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 2) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min2.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 3) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min3.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 4) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min4.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 5) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min5.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 6) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min6.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 7) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min7.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 8) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min8.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 9) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min9.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 10) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min10.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 11) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min11.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 12) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min12.tif'),'canny',0.40);
img2(:, :, 13) = edge(imread('DSM_Leica_jih81_min13.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:, :, 1) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub1.tif'),'canny',0.40);

```

```

img_sub1(:,:,2) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub2.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:,:,3) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub3.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:,:,4) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub4.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:,:,5) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub5.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:,:,6) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub6.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:,:,7) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub7.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:,:,8) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub8.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:,:,9) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub9.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:,:,10) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub10.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:,:,11) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub11.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:,:,12) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub12.tif'),'canny',0.40);
img_sub1(:,:,13) = edge(imread('DSM_LMS_jih81_sub13.tif'),'canny',0.40);
%% -----
np = 1; %- inicializace cyklicke hodnoty
szimg2 = size(img2); %- velikost n-rozmerne matice s img2
np = szimg2(3); %- pocet img2 v n-rozmerne matici
r_coord = zeros(1,np); %- tvorba matice souradnic r
c_coord = zeros(1,np); %- tvorba matice souradnic c
HD_c = zeros(1,np); %- tvorba matice HD informace
%% -----
for i = 1:np %- cyklicky vypocet souradnic r,c a hodnoty HD
    [r_LMS, c_LMS, HD_coef] = HD_fce(img_sub1(:,:,i),img2(:,:,i));
    r_coord(i) = r_LMS;
    c_coord(i) = c_LMS;
    HD_c(i) = HD_coef;
end
HD_vystupy = [r_coord , c_coord , HD_c]; %- vystupni r,c,HD
%%
r_coord = r_coord+25; %% zmena
c_coord = c_coord+25;

LMS_coord = zeros(np,2);
LMS_coord(:,1) = c_coord'; %- column / X
LMS_coord(:,2) = r_coord'; %- row / Y

%- pricteni coords jednotlivych primary sub-obrazu k LMS coord
% LMS sub coords ze souboru
sub = (load('sub_coords.txt'))';
LMS_coord = [LMS_coord(:,1)+sub(:,1),LMS_coord(:,2)+sub(:,2)];
save('HD_c.mat','HD_c','LMS_coord')

% ALS coords ze souboru
ALS_coord = load('ALS_coords_Leica.txt');

H_fig1 = figure;
imshow(img1)
hold on
plot(LMS_coord(:,1),LMS_coord(:,2),'+r')
print(H_fig1,'-djpeg','HD_Leica_f1')

H_fig2 = figure;
imshow(img2a)
hold on
plot(ALS_coord(:,1),ALS_coord(:,2),'+b')
print(H_fig2,'-djpeg','HD_Leica_f2')

H_fig3 = figure;
imshow(img1)
hold on
plot(ALS_coord(:,1),ALS_coord(:,2),'+b')

```

```

plot(LMS_coord(:,1),LMS_coord(:,2),'+r')
print(H_fig3,'-djpeg','HD_Leica_f3')

save('HD_Leica_ALS_coord.mat','ALS_coord')
save('HD_Leica_LMS_coord.mat','LMS_coord')

[parameters,rezidua2] = helmert_transformace(ALS_coord,LMS_coord)
save('HD_Leica_Helm_Parameters.mat','parameters')
save('HD_Leica_Helm_Residuals.mat','rezidua2')

xx = rezidua2(:,1);
yy = rezidua2(:,2);

xmean = mean(xx);
ymean = mean(yy);
nn = size(xx);
nx = nn(1);
ny = nx;

RMSEx = sqrt(sum(xx.^2)/nx);
RMSEy = sqrt(sum(yy.^2)/ny);
sigma0x = sqrt(sum(xx.^2+yy.^2)/(2*nx-4));

toc
cas = toc;
%-----
%- Export dat do ASCII
save('output_HD_Leica.txt' RMSEx RMSEy sigma0x parameters rezidua2 cas -
ascii
out=fopen('output_HD_Leica.txt','w');
fprintf(out,'Image matching EuroSDR - Leica ALS & LMS - Hausdorff distance
method\r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Míry přesnosti sjednocení obrazu: \r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'RMSE x: %7.5f \r\n',RMSEx);
fprintf(out,'RMSE y: %7.5f \r\n',RMSEy);
fprintf(out,'Sigma0 x: %7.5f \r\n',sigma0x);
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Parametry transformace: \r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'delta x: %7.5f \r\n',parameters(1));
fprintf(out,'delta y: %7.5f \r\n',parameters(2));
fprintf(out,'rotace: %7.5f \r\n',parameters(3));
fprintf(out,'měřítko: %7.5f \r\n',parameters(4));
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Rezidua x a y\r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'%7.5f %7.5f \r\n', xx, yy);
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Čas: %7.5f \r\n',cas);
fclose(out);

```

Příloha 7: Funkce výpočtu koregistrace pomocí Hausdorffovy vzdálenosti – HD_fce.m

```

%% Inicializace vypočtu HDist
function [row, column, HD_coef] = HD_fce(img1,img2)
%% Zjistění velikosti vstupních obrazu
size_BI = size(img1);
size_SI = size(img2);

```

```

%% Tvorba prazdne matice
HD_matrix = zeros(size_BI(1)-size_SI(1)+1,size_BI(2)-size_SI(2)+1); %-
velikost HD matice
%% Cyklicky vypocet HD
for r = 1:size_BI(1)-size_SI(1)+1           %- radkovy cyklus
    for c = 1:size_BI(2)-size_SI(2)+1       %- sloupcovy cyklus
        vyrez = img1(r:r+size_SI(1)-1, c:c+size_SI(2)-1); %- vyrez a posun
        HD_matrix(r,c) = NHD_fce(img2, vyrez); %- vypocet HD
    end
end
pomoci funkce NHDist_fce
end
end
%% Vystupy
[HD_coef] = min(HD_matrix(:));              %- vyhledani minima
HD
[row_full,column_full] = find(HD_matrix == min(HD_matrix(:))); %-
souradnice r,c minima HD
[row,column] = subpixel(HD_matrix,row_full,column_full); %- subpixelova
presnost dopocet

```

Příloha 8: Funkce výpočtu hodnot Hausdorffovy vzdálenosti – NHD_fce.m

```

function [HDist] = NHD_fce(A,B)
%% Vyhledani souradnic hran
[ra,ca] = find(A==1);
A = zeros(length(ra),2);
A(:,1) = ra';
A(:,2) = ca';

[rb,cb] = find(B==1);
B = zeros(length(rb),2);
B(:,1) = rb';
B(:,2) = cb';

%% Tvorba kombinaci jednotlivych dvojic bodu
iA = repmat(1:length(A),[1,length(B)]);
iB = repmat(1:length(B),[length(A),1]);
combos = [iA,iB(:)];
%% Vypocet vzdalenosti
Acomb = A(combos(:,1),:);
Bcomb = B(combos(:,2),:);
distances = sqrt((Acomb(:,1)-Bcomb(:,1)).^2 + (Acomb(:,2)-
Bcomb(:,2)).^2); %- euklidovska vzdalenost
%% Vypocet HDist
D = reshape(distances,length(A),[]);
vzdAB = max(min(D,[],1)); %- max v radcich od A do B
vzdBA = max(min(D,[],2)); %- max ve sloupcich od B do A
HDist = max(vzdAB,vzdBA); %- moznost f-quantilizace

```

Příloha 9: Inicializační skript pro výpočet selektivní metody NTP – LLS Leica a LMS –

NTP_EuroSDR_Leica_subpix.m

```

%- NTP inicializace
clear
clc
close all force
tic
MI_cM = load('MI_c.mat');
CC_cM = load('CC_c.mat');
%- extrakce promennych z .mat souboru

```

```
MI_co = MI_cM.MI_c;
CC_co = CC_cM.CC_c;
MI_coord = MI_cM.LMS_coord;
CC_coord = CC_cM.LMS_coord;
%- volani normalizacni funkce pro LMS souradnice
[LMS_coord, result] = NTPmatch(MI_co,CC_co,MI_coord,CC_coord);
ALS_coord = load('ALS_coords_Leica.txt');

%- nacteni obrazu pro vystupy
img1 = imread('DSM_LMS_jih81.tif');
img2a = imread('DSM_Leica_jih81.tif');

%- graficke vystupy
H_fig1 = figure;
imshow(img1)
hold on
plot(LMS_coord(:,1),LMS_coord(:,2),'+r')
print(H_fig1,'-djpeg','NTP_Leica_f1')

H_fig2 = figure;
imshow(img2a)
hold on
plot(ALS_coord(:,1),ALS_coord(:,2),'+b')
print(H_fig2,'-djpeg','NTP_Leica_f2')

H_fig3 = figure;
imshow(img1)
hold on
plot(ALS_coord(:,1),ALS_coord(:,2),'+b')
plot(LMS_coord(:,1),LMS_coord(:,2),'+r')
print(H_fig3,'-djpeg','NTP_Leica_f3')

save('NTP_Leica_ALS_coord.mat','ALS_coord')
save('NTP_Leica_LMS_coord.mat','LMS_coord')

[parameters,rezidua2] = helmert_transformace(ALS_coord,LMS_coord)
save('NTP_Leica_Helm_Parameters.mat','parameters')
save('NTP_Leica_Helm_Residuals.mat','rezidua2')

xx = rezidua2(:,1);
yy = rezidua2(:,2);

xmean = mean(xx);
ymean = mean(yy);
nn = size(xx);
nx = nn(1);
ny = nx;

RMSEx = sqrt(sum(xx.^2)/nx);
RMSEy = sqrt(sum(yy.^2)/ny);
sigma0x = sqrt(sum(xx.^2+yy.^2)/(2*nx-4));

toc
cas = toc;
%-----
%- Export dat do ASCII
save 'output_NTP_Leica.txt' RMSEx RMSEy sigma0x parameters rezidua2 cas -
ascii
out=fopen('output_NTP_Leica.txt','w');
```

```

fprintf(out,'Image matching EuroSDR - Leica ALS & LMS - NTP method\r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Míry přesnosti sjednocení obrazu: \r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'RMSE x: %7.5f \r\n',RMSEx);
fprintf(out,'RMSE y: %7.5f \r\n',RMSEy);
fprintf(out,'Sigma0 x: %7.5f \r\n',sigma0x);
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Parametry transformace: \r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'delta x: %7.5f \r\n',parameters(1));
fprintf(out,'delta y: %7.5f \r\n',parameters(2));
fprintf(out,'rotace: %7.5f \r\n',parameters(3));
fprintf(out,'měřítko: %7.5f \r\n',parameters(4));
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Rezidua x a y\r\n');
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'%7.5f %7.5f \r\n', xx, yy);
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Čas: %7.5f \r\n',cas);
fprintf(out,'-----\r\n');
fprintf(out,'Body brane z MI - hodnota 1\r\n');
fprintf(out,'%1.0f \r\n',result);
fclose(out);

```

Příloha 10: Funkce výpočtu hodnot selekce u metody NTP – NTPmatch.m

```

function [LMS_coordEQ,result] = NTPmatch(MI_co,CC_co,MI_coord,CC_coord)
%- nacteni vstupnich dat
MI_column = MI_coord(:,1);
MI_row = MI_coord(:,2);
CC_column = CC_coord(:,1);
CC_row = CC_coord(:,2);
%-
siz = size(MI_column);
q = siz(1);
%-----
%- prevod na stejny rozsah
MIeq = (MI_co-min(MI_co)).*256 ./ (max(MI_co)-min(MI_co));
CCeq = (CC_co-min(CC_co)).*256 ./ (max(CC_co)-min(CC_co));
result = MIeq> CCEq; %- selekce jestli z MI nebo z CC

c = zeros(13,1);
r = zeros(13,1);

%- cyklus pro souradnice c (sloupec)
for i = 1:q
    if result(i) == 1
        c(i) = MI_column(i);
    else
        c(i) = CC_column(i);
    end
end
%- cyklus pro souradnice r (radek)
for i = 1:q
    if result(i) == 1
        r(i) = MI_row(i);
    else
        r(i) = CC_row(i);
    end
end

```


end

LMS_coordEQ = [c,r];

Příloha 11: Funkce výpočtu hodnot subpixelové přesnosti – subpixel.m

```
function[row_sub, column_sub] = subpixel(CC_matrix,row_full,column_full)
%% Subpixel
%- Lokalni system
Q = [
CC_matrix(row_full-1,column_full-1) CC_matrix(row_full-1,column_full)
CC_matrix(row_full-1,column_full+1),
CC_matrix(row_full,column_full-1) CC_matrix(row_full,column_full)
CC_matrix(row_full,column_full+1),
CC_matrix(row_full+1,column_full-1) CC_matrix(row_full+1,column_full)
CC_matrix(row_full+1,column_full+1),
];

%- tvorba vektoru L
Qsiz = size(Q);
L = zeros(1,Qsiz(1)*Qsiz(2));
L(1:Qsiz(1)) = Q(1,:);
L(Qsiz(1)+1:Qsiz(1)+Qsiz(1))= Q(2,:);
L(Qsiz(1)+Qsiz(1)+1:Qsiz(1)+Qsiz(1)+Qsiz(1))= Q(3,:);
L = L';

%- matice A local sourad. systemu
A = [1 -1 -1 1 1 1,
      1 -1 0 0 1 0,
      1 -1 1 -1 1 1,
      1 0 -1 0 0 1,
      1 0 0 0 0 0,
      1 0 1 0 0 1,
      1 1 -1 -1 1 1,
      1 1 0 0 1 0,
      1 1 1 1 1 1];

%- vypocet polynomu 2 stupne via MNC
siz_A = size(A);
P = eye(siz_A(1));
P_inv = inv(P); %- inverze P
dx = inv(A'*P_inv*A)*A'*P_inv*L; %- vypocet dx
a0 = dx(1);
a1 = dx(2);
a2 = dx(3);
a3 = dx(4);
a4 = dx(5);
a5 = dx(6);

%- subpixelove dodatky k souradnicim
c_max = (-2*a2*a4+a1*a3)/(4*a4*a5-(a3)^2); %- subpixel column
r_max = (-2*a1*a5+a2*a3)/(4*a4*a5-(a3)^2); % subpixel row

row_sub = row_full+r_max;
column_sub = column_full+c_max;
```

Příloha 12: Funkce výpočtu Helmertovy transformace – helmert_transformace.m

```

function [parameters,rezidua2] =
helmert_transformace(coord_sys1,coord_sys2)
%% zjistovani velikosti
siz_CS1 = size(coord_sys1);
siz_CS2 = size(coord_sys2);
%% inicializace promennych
BlizZero = 1e-8;           %- blizici se nule
iterace = 0;
x0 = 0;
y0 = 0;
rotace = 0;                %- rotace [rad]
q = 1;                     %- de facto bez zmeny meritka
parameters = [x0 y0 rotace q]; %- zjistovane parametry
P = eye(2*siz_CS1(1));     %- jednotkova matice
                           %- dx = ((A'*P*A)^-1)*A'*P*L
while(1)
    %% tvorba a plneni souradnicema a jednickami matice A
    A = zeros(2*siz_CS1(1),4); %- matice A
    for i = 1:siz_CS1(1)      %- plneni matice A
        A(i*2-1,1) = 1;      %- plneni jednickami
        A(i*2,2) = 1;
        A(i*2-1,3) = q*(-
sin(rotace)*coord_sys1(i,1)+cos(rotace)*coord_sys1(i,2));
        A(i*2-1,4) =
cos(rotace)*coord_sys1(i,1)+sin(rotace)*coord_sys1(i,2);
        A(i*2,3) = q*(-cos(rotace)*coord_sys1(i,1)-
sin(rotace)*coord_sys1(i,2));
        A(i*2,4) = -
sin(rotace)*coord_sys1(i,1)+cos(rotace)*coord_sys1(i,2);
        %- tvorba a plneni vektoru L jednickami a souradnicemi
        L(i*2-1,1) = coord_sys2(i,1)-x0-
q*(cos(rotace)*coord_sys1(i,1)+sin(rotace)*coord_sys1(i,2));
        L(i*2,1) = coord_sys2(i,2)-y0-q*(-
sin(rotace)*coord_sys1(i,1)+cos(rotace)*coord_sys1(i,2));
    end
    %% vypocet MNC
    P_inv = inv(P);         %- inverze P
    siz_mat = size(A,1)-size(A,2); %- pocet
    dx = inv(A'*P_inv*A)*A'*P_inv*L; %- vypocet dx
    v = A*dx-L;            %- linearizovana rovnice oprav
    %% podminkove promenne
    testXY = sqrt((dx(1)^2+dx(2)^2)/2); %- deleni 2 z duvodu 2 parametru
    testROT = dx(3);
    iterace = iterace+1;
    %% vypocet parametru
    x0 = x0+dx(1);
    y0 = y0+dx(2);
    rotace = rotace+dx(3);
    q = q+dx(4);
    parameters = [x0 y0 rotace q]'; %- vysledne parametry
    %% podminky zastaveni cyklu while
    if abs(testXY) < BlizZero && abs(testROT) < BlizZero %- pocita do doby
nez se pocitane parametry blizi nule
        break;
    elseif iterace > 100          %- anebo je prilis iteraci
        warning('Mnoho iteraci')
        break;
    end
end
%% Vypocet rezidui
rezidual = zeros(siz_CS1);

```

```

for i = 1:siz_CS1(1)
    rezidual(i,2) = y0+q*(-
sin(rotace)*coord_sys1(i,1)+cos(rotace)*coord_sys1(i,2)); %- rez X
    rezidual(i,1) =
x0+q*(cos(rotace)*coord_sys1(i,1)+sin(rotace)*coord_sys1(i,2)); %- rez Y
end
rezidua2 = coord_sys2-rezidual;           %- rezidua vztazene k coord_sys 2

```

Tabulka 1: Výstupy z koregistrační metody využívající korelační koeficient – LLS Leica a LMS

Rezidua				Parametry transformace	
-před transformací		-po transformaci		dX	-24,5789
X	Y	X	Y	dY	27,3309
-0,9016	-1,6574	-0,9016	2,7426	rotace	0,0093
2,7426	-0,5915	0,6558	-3,5813	měřítka	1,0493
0,6558	1,6130	-2,6010	1,8654	Odchyly	
-3,5813	-1,8853	-1,0389	3,6097	RMSE X	2,1319
-2,6011	-1,0389	2,5153	-0,1322	RMSE Y	1,3911
1,8654	-0,6406	-2,0443	-1,5506	σ_0	1,9569
-1,0389	2,8851	0,4612	-1,6574	Čas [s]	
3,6097	-0,1208	-0,5914	1,6130		5,1516
2,5153	0,0885	-1,8853	-1,0389		
-0,1322	0,3449	-0,6406	2,8851		
-2,0443	2,1932	-0,1207	0,0885		
-1,5506	-0,1299	0,3449	2,1932		
0,4612	-1,0602	-0,1298	-1,0602		

Tabulka 2: Výstupy z koregistrační metody využívající sdílenou informaci – LLS Leica a LMS

Rezidua				Parametry transformace	
-před transformací		-po transformaci		dX	-23,7889
X	Y	X	Y	dY	26,8682
-0,7753	-1,7393	-0,7753	2,2243	rotace	0,0055
2,2243	-1,5274	-0,3007	-2,8185	měřítko	1,0526
-0,3007	0,8942	-0,4841	0,6385	Odchylky	
-2,8185	-2,1811	-0,8435	3,1032	RMSE X	1,7754
-0,4842	0,7518	1,5323	-0,9458	RMSE Y	1,2795
0,6385	-0,7275	-1,6073	-2,1577	σ_0	1,6822
-0,8435	2,6902	2,4348	-1,7393	Čas [s]	
3,1032	0,2935	-1,5274	0,8942	Čas [s]	25,7407
1,5323	0,0445	-2,1811	0,7518		
-0,9458	0,2141	-0,7275	2,6902		
-1,6073	1,3566	0,2935	0,0446		
-2,1577	0,1362	0,2141	1,3566		
2,4348	-0,2056	0,1362	-0,2057		

Tabulka 3: Výstupy z komparační funkce NTP – LLS Leica a LMS

Rezidua				Výsledky	
-po transformaci					
X	Y	Parametry transformace			
-0,9806	2,7397	dX	-24,31286	0	
0,3259	-2,5279	dY	26,85648	0	
-3,0274	1,6013	rotace	0,00675	1	
-1,6725	3,6725	měřítko	1,05114	1	
2,1835	-0,2338	Odchylky		0	
-0,8939	-1,6225	RMSE X	1,9888	0	
0,4355	-1,7088	RMSE Y	1,4106	0	
-1,0299	1,4579	σ_0	1,8743	1	
-1,7805	-1,3769	Čas [s]		0	
-0,6905	2,6673	Čas [s]	0,5198	0	
1,0266	0,5487				
0,6311	1,8126				
-0,1268	-1,4308				

Tabulka 4: Výstupy z koregistrační metody využívající korelační koeficient – LLS Optech a LMS

Rezidua				Parametry transformace	
-před transformací		-po transformaci		dX	62,9816
X	Y	X	Y	dY	18,5363
-0,9463	-0,3551	-0,9463	1,9707	rotace	0,0099
1,9707	-0,7579	-0,0813	-2,1163	měřítko	1,0481
-0,0813	-0,5581	-1,7738	1,3367	Odchylky	
-2,1163	-0,5609	-1,4368	3,1738	RMSE X	1,7004
-1,7739	-0,4025	2,7567	0,0267	RMSE Y	1,2673
1,3367	-1,3090	-1,7111	-0,6482	σ_0	1,6302
-1,4368	2,6497	-0,5505	-0,3551	Čas [s]	
3,1738	2,1326	-0,7578	-0,5581	Čas [s]	4,6994
2,7567	-0,7879	-0,5609	-0,4025		
0,0267	0,0456	-1,3089	2,6497		
-1,7112	1,8479	2,1326	-0,7879		
-0,6482	-1,2721	0,0456	1,8479		
-0,5505	-0,6723	-1,2721	-0,6723		

Tabulka 5: Výstupy z koregistrační metody využívající sdílenou informaci – LLS Optech a LMS

Rezidua				Parametry transformace	
-před transformací		-po transformaci		dX	63,9447
X	Y	X	Y	dY	18,5498
-1,0513	-1,2340	-1,0512	2,1136	rotace	0,0061
2,1136	-1,6808	-0,2954	-1,4201	měřítko	1,0506
-0,2955	0,8851	-0,6375	-0,1610	Odchylky	
-1,4201	-1,2702	-0,6942	2,9879	RMSE X	1,3564
-0,6375	0,8165	1,5881	-0,5781	RMSE Y	1,1592
-0,1610	-1,1836	-1,4245	-1,0569	σ_0	1,3716
-0,6942	2,0437	0,6294	-1,2340	Čas [s]	
2,9879	0,9271	-1,6808	0,8851	Čas [s]	26,5143
1,5881	-0,2498	-1,2701	0,8165		
-0,5780	0,2450	-1,1835	2,0437		
-1,4245	1,4152	0,9271	-0,2498		
-1,0569	-1,1446	0,2450	1,4152		
0,6294	0,4305	-1,1446	0,4305		

Tabulka 6: Výstupy z komparační funkce NTP – LLS Optech a LMS

Rezidua					
-po transformaci					
X	Y			Výsledky	
-0,102	3,7076			1	
0,236	-8,2226			1	
0,161	0,6207	Parametry transformace		1	
-3,033	4,5388	dX	63,8904	1	
2,872	0,2581	dY	17,17723	0	
-1,482	-0,0682	rotace	0,0019	1	
0,514	-0,5414	měřítko	1,05501	1	
-2,181	1,0489			0	
-1,842	1,0176	Odchylky		1	
0,204	2,7702	RMSE X	3,0686	1	
0,063	-0,1480	RMSE Y	1,4318	1	
0,410	2,0240	σ_0	2,6030	1	
-1,606	-1,2187			0	
		Čas [s]	0,5031	0	

Tabulka 7: Výstupy z koregistrační metody využívající korelační koeficient – LLS ČÚZK a LMS

Rezidua				Parametry transformace	
-před transformací		-po transformaci			
X	Y	X	Y		
1,5740	-1,2601	1,5740	-1,0960	dX	8,5933
-1,0960	0,2031	-2,8163	1,0265	dY	-5,4288
-2,8164	1,0549	-1,4249	2,7734	rotace	0,0041
1,0265	-0,0709	-5,5873	0,0529	měřítko	1,0054
-1,4249	1,4193	0,5030	3,5029		
2,7734	1,4762	-0,9182	0,8385	Odchylky	
-5,5874	-1,2549	1,5717	-1,2601	RMSE X	2,3229
0,0529	-5,5486	0,2031	1,0549	RMSE Y	2,2424
0,5030	4,8100	-0,0708	1,4193	σ_0	2,4819
3,5029	0,0725	1,4762	-1,2549		
-0,9182	0,8499	-5,5485	4,8100	Čas [s]	
0,8385	-0,2972	0,0725	0,8499	8,0350	
1,5717	-1,4542	-0,2971	-1,4542		

Tabulka 8: Výstupy z koregistrační metody využívající sdílenou informaci – LLS ČÚZK a LMS

Rezidua				Parametry transformace	
-před transformací		-po transformaci		dX	8,9406
X	Y	X	Y	dY	-4,6151
0,6088	-1,5637	0,6088	0,5328	rotace	0,0042
0,5328	0,2025	-0,8150	1,1837	měřítko	1,0056
-0,8150	-0,3647	-0,7782	2,1001	Odchylky	
1,1837	1,2320	-4,9906	0,0576	RMSE X	1,9794
-0,7782	0,0713	-0,0066	3,3324	RMSE Y	1,1000
2,1001	0,7877	-1,5403	1,7008	σ_0	1,7407
-4,9906	-2,1893	-1,3853	-1,5637	Čas [s]	
0,0576	-0,5459	0,2025	-0,3647	20,2918	
-0,0067	1,8779	1,2320	0,0713		
3,3324	1,2882	0,7877	-2,1893		
-1,5404	-0,0504	-0,5458	1,8779		
1,7008	0,0797	1,2882	-0,0504		
-1,3853	-0,8253	0,0797	-0,8253		

Tabulka 9: Výstupy z komparační funkce NTP – LLS ČÚZK a LMS

Rezidua				Výsledky	
-po transformaci					
X	Y	Parametry transformace			
0,7918	-0,77439	dX	8,52639	1	
-2,2907	0,95973	dY	-5,64448	0	
-1,1468	2,54588	rotace	0,00311	0	
-5,3053	-0,15672	měřítko	1,00705	1	
0,8200	3,40411	Odchylky		0	
-1,3674	0,72379	RMSE X	2,1705	0	
1,7960	-1,19921	RMSE Y	1,7466	1	
-0,0298	-0,41139	σ_0	2,1416	0	
1,8888	0,18647	Čas [s]		0	
0,7755	-1,78703	0,7257		0	
-0,4334	4,67395			0	
0,1194	0,02166			0	
-1,0764	-2,7285			0	