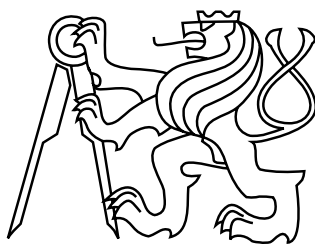


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
OBOR GEODÉZIE A KARTOGRAFIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE
GEOREFERENCOVÁNÍ PRVNÍHO VOJENSKÉHO
MAPOVÁNÍ RAKOUSKA–UHERSKA

Vedoucí práce: Ing. Jiří CAJTHAML, Ph.D.
Katedra mapování a kartografie

leden 2012

Jan NOVÁK

ZDE VLOŽIT LIST ZADÁNÍ

Z důvodu správného číslování stránek

ABSTRAKT

Diplomová práce si klade za cíl otestovat v praxi metodu georeferencování map I. vojenského mapování Rakouska–Uherska navrženou vedoucím práce Ing. Cajthamlem. Metoda je založena na společném vyrovnaní transformačních koeficientů všech mapových listů s dodatečnými podmínkami, které definují návaznost mapových listů. Dalším z cílů je tvorba výpočetního programu, který řeší uvedenou transformaci.

KLÍČOVÁ SLOVA

georeferencování, I. vojenské mapování, návaznost mapových listů, skenované mapy, GIS, C++

ABSTRACT

This diploma thesis is aimed on practical use of georeferencing method of First military survey, which Ing. Cajthaml has developed. The method is based on corporate adjustment of transformation coefficients for all map sections. There are auxiliary conditions, which define linking of map sheets. Next objective is programming of software for computation of this transformation.

KEYWORDS

georeferencing, First military survey, link of map sheets, scanned maps, GIS, C++

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Georeferencování prvního vojenského mapování Rakouska–Uherska“ jsem vypracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Jiřímu Cajthamlovi, Ph.D. za zajímavé téma diplomové práce a také za připomínky a rady při jejím zpracování. Stejně tak bych chtěl poděkovat své rodině a všem ostatním, kteří mě podporovali během studia.

Obsah

Úvod	9
1 První vojenské mapování	10
2 Data použitá při práci	13
2.1 Skenované mapové listy I. vojenského mapování	13
2.2 Mapové podklady pro sběr identických bodů	13
2.2.1 Rastrové ekvivalenty topografických map	14
2.2.2 II. vojenské mapování	14
3 Vyrovnání metodou nejmenších čtverců	16
3.1 Vyrovnání MNČ	16
3.2 Vyrovnání zprostředkujících měření s podmínkami	18
4 Teorie georeferencování	19
4.1 Identické body	19
4.2 Nutné počty identických bodů	19
4.3 Transformace obecně	20
4.4 Řešené transformační metody	21
4.4.1 Podobnostní transformace	22
4.4.2 5-prvková afinní transformace	22
4.4.3 Afinní transformace	23
5 Transformace s podmínkami návaznosti hran listů	25
6 Identické body na mapách I. vojenského mapování	29
7 Řešení	33
7.1 Volba souřadnicového systému	33
7.2 Sběr IB	34
7.3 Testování různých metod transformace	36
7.4 Transformace s podmínkami návaznosti hran listů	37

7.5	Program pro výpočet transformace s podmínkami návaznosti v C++	42
7.6	Georeferencování mapových listů, maskování mimorámových údajů	43
7.7	Porovnání s metodou průměrování souřadnic rohů	45
7.8	Zavedení vah do výpočtu vyrovnání	47
8	Výsledky	50
9	Zhodnocení	51
	Závěr	52
	Použité zdroje	53
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	55
	Seznam příloh	56
A	Tištěné přílohy	57
A.1	Návod pro zpracování	57
A.2	Počty IB	61
A.3	Odchyly	62
A.3.1	Porovnání odchylek s metodou průměrování	62
A.3.2	Porovnání odchylek při výpočtu bez vah a s vahami	64
A.3.3	Porovnání odchylek výpočtu s vahami a průměrování	66
A.4	Grafická znázornění výsledků různých transformačních metod	68
B	Přílohy na DVD	70
B.1	Netištěné přílohy	70
B.2	Datové přílohy	70

Seznam obrázků

1.1	Klady listů I. vojenského mapování pro Čechy, Moravu a Slezsko . . .	11
2.1	Řešené testovací území	14
2.2	Obec Modrá Hůrka na mapách I. v. m. (list c233) a na RETM	15
2.3	Křížení cest na mapě I. a II. vojenského mapování	15
5.1	Možné podmínky návaznosti mapových listů	26
5.2	Potřebné podmínky návaznosti mapových listů	27
6.1	Zobrazení kostelů – Horažďovice (vlevo), Chroboly (vpravo)	29
6.2	Zobrazení zemědělských usedlostí v I. a II. vojenském mapování . . .	30
6.3	Zobrazení křížů v I. a II. vojenském mapování	30
6.4	Zobrazení křížení cest v I. a II. vojenském mapování	31
6.5	Zobrazení mlýnů v I. a II. vojenském mapování	31
7.1	Typy a rozložení IB, list 231 z území Čech	34
7.2	Orientace a počátek soustavy pixelových souřadnic v ArcGIS	35
7.3	Poloha georef. mapových listů, 5–prvková afinní transformace	37
7.4	Afinní transformace – porovnání tr. s podmínkami návaznosti a me- tody průměrování souř. rohů	38
7.5	Rozložení mapových listů pro ukázkou tvorby podmínek	39
7.6	Podmínky návaznosti – listy chybí zprava	40
7.7	Podmínky návaznosti – listy chybí zleva	41
7.8	Ukázka návaznosti v případě chybějících listů	41
7.9	Mapový list georeferencovaný podle transformovaných IB	44
7.10	Výsledné zamaskované mapové listy v ArcGIS	45
7.11	Odchyly od skutečných poloh bodů	46
7.12	Ukázka odchylky od skutečné polohy bodu	47
7.13	Odchyly od skutečných poloh bodů při použití vah IB	48

Úvod

Práci na toto téma jsem si zvolil především proto, že mne historické mapy vždy přitahovaly. Ať už svým zpracováním a vizuální stránkou, tak především tím, že ukazují krajinu v podobě, jakou měla před staletími. První vojenské mapování je toho výborným příkladem. V neposlední řadě moji volbu podpořila také zvědavost, jak mapování, o němž je obecně známo, že není přesné a při jehož tvorbě byly učiněny zásadní chyby, bude odpovídat skutečnému stavu.

Náplní práce je především ověření funkčnosti metody georeferencování map I. vojenského mapování navržené vedoucím práce Ing. Cajthamlem. Metoda spočívá ve společném výpočtu vyrovnaných transformačních koeficientů všech řešených listů metodou nejmenších čtverců s dodatečnými podmínkami, které definují návaznost jednotlivých mapových listů. Dalším z cílů je tvorba aplikace, která by výpočet této metody automaticky řešila.

Práce s grafickými daty se odehrává v geografickém informačním systému Arc-GIS, výpočty jsou řešeny v matematickém softwaru Matlab a výsledný program je napsán v programovacím jazyce C++.

Cíle práce jsou shrnuty v následujících bodech:

- nalezení vhodných typů identických bodů na mapách I. vojenského mapování
- vytvoření souborů identických bodů pro řešené listy
- testování různých transformačních metod
- testování funkčnosti transformace s podmínkami návaznosti mapových listů
- pro uvedenou transformaci napsat výpočetní program v programovacím jazyce C++, řešící výpočet transformačních koeficientů
- grafické zobrazení výsledků transformace
- srovnání výsledků s jinými metodami georeferencování

1 První vojenské mapování

Neúspěch Rakouska ve slezských válkách (sedmiletá válka 1756–1763), v nichž rakouská vojska využívala Müllerovy mapy Čech a Moravy, a který odhalil nedostatek spolehlivých, vojensky využitelných map, vedl v roce 1763 k rozhodnutí císařovny Marie Terezie vyhotovit podrobné topografické mapy zemí Habsburské monarchie státními orgány a ze státních prostředků.

Mapování, které je také známé pod názvem josefské, protože bylo dokončeno až za vlády císaře Josefa II., proběhlo v letech 1763–1785. Mapováním byl pověřen generální štáb sídlící ve Vídni. Za tuto dobu bylo zmapováno území monarchie kromě Tyrolska, Vorarlbergu, Itálie a Rakouského Nizozemí.

Měřítko, ve kterém mapování probíhalo, bylo na tehdejší dobu nezvykle velké, a to 1:28 800. Tato hodnota vycházela z požadavku, aby se vzdálenost 1000 pochodových kroků (což odpovídalo 400 vídeňským sáhům) zobrazila na mapě jako 1 vídeňský palec. Mapová sekce, tzv. brouillon, má rozměr 618 x 408 mm a plocha zobrazeného území činí 209 km². V rámci monarchie vzniklo přibližně 5400 mapových listů.

Největší slabinou celého mapování je skutečnost, že nebylo prováděno za pomoci geodetického měření a na podkladě trigonometrické sítě. Mapování bylo prováděno metodou, kdy důstojníci vojenské topografické služby projížděli krajinou na koních a mapovali metodou „a la vue“, což lze přeložit jako „od oka“. V Čechách a na Moravě se mapování provádělo do zvětšenin Müllerových map, někdy bylo užito grafické protínání pomocí měřického stolu. Vzdálenosti se krokovaly nebo odhadovaly. Díky těmto zásadním nedostatkům došlo k velkým zkreslením mapových listů, které na sebe ve výsledku nenavazují. Nemohla tak být sestavena přehledná mapa monarchie.

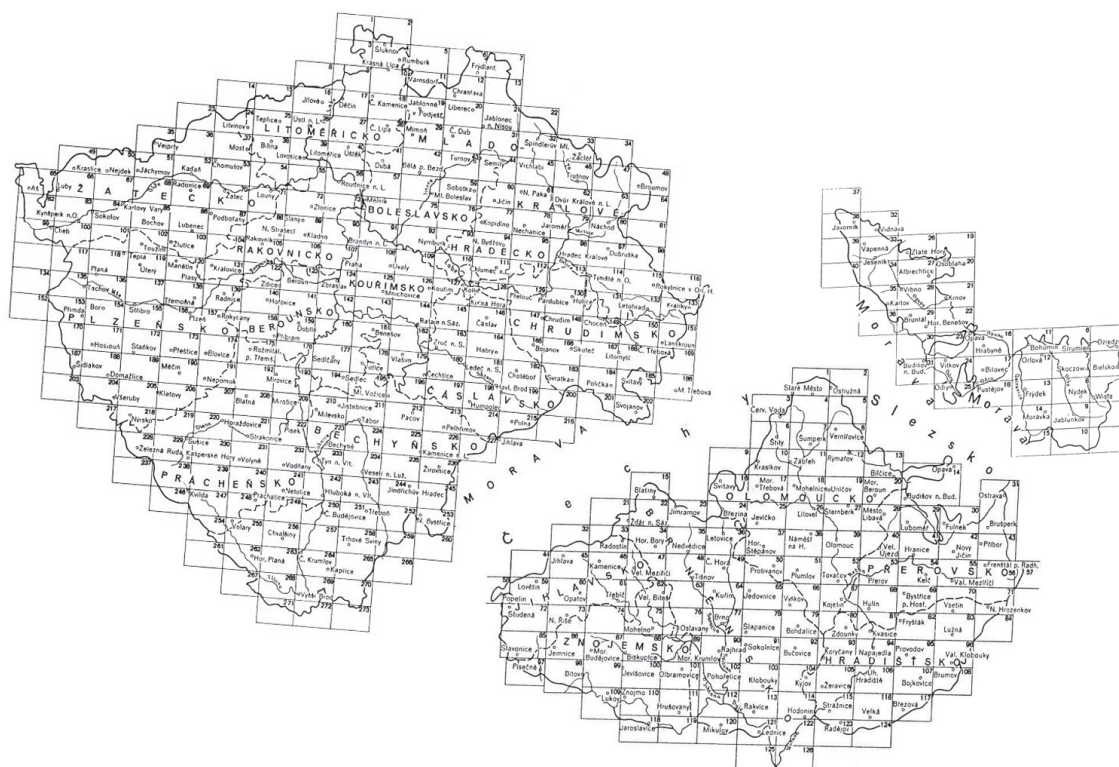
Velká pozornost byla věnována mapování komunikací, mostů, vodních toků, využití půdy a různým typům budov. Reliéf je vyjádřen lavováním a nepravými sklonovými šrafami. Výškopis nebyl měřen. Kromě mapové kresby je na pravé straně každého listu soupis obcí s počty obyvatel nebo koní.

Společně s kresbou vznikal vojensko-topografický popis území obsahující údaje, které nemohly být znázorněny v mapě (šířky a hloubky vodních toků, stav silnic,

možnosti zásobování obcí, apod.). Vojensko-topografický popis je zaznamenán v 19 svazcích pro Čechy a 4 pro Moravu.

Na našem území probíhalo mapování takto:

- Slezsko 1763 (zkušební území), vytvořeno 40 mapových listů
- Morava 1764–1768, vytvořeno 126 mapových listů
- Čechy 1764–1767, vytvořeno 273 mapových listů



Obr. 1.1: Klady listů I. vojenského mapování pro Čechy, Moravu a Slezsko

Nedokonalost map se projevila již ve válkách s Pruskem (1778–1779). Císař Josef II. tak nařídil rektifikaci nejdůležitějších oblastí. Při rektifikaci se ukázalo, že bude nutné provést prakticky nové mapování. To proběhlo v Čechách v letech 1780–1783, kdy bylo znovu zmapováno 141 listů. Na Moravě oprava proběhla v letech 1779–1781, znovu zmapováno bylo 36 listů, ve Slezsku bylo v roce 1780 nově zmapováno 30 listů a 10 ostatních opraveno. Jednalo se o severní oblasti našeho území.

Význam I. vojenského mapování spočívá jednak v jeho podrobnosti, měřítku a obsáhlém písemném operátu, ale především v době jeho vzniku, protože zachycuje nám známou krajinu před příchodem průmyslové revoluce.

Informace obsažené v této kapitole byly čerpány z [1] a [2].

2 Data použitá při práci

2.1 Skenované mapové listy I. vojenského mapování

Naskenované rastry použitých mapových listů pro účely zpracování poskytla Laboratoř geoinformatiky Univerzity J.E. Purkyně v Ústí nad Labem [3].

Zvolené testovací území je tvořeno 16 mapovými listy v rozložení 4x4 listy. Více listů nebylo bráno v úvahu především proto, že sběr identických bodů je časově velmi náročná činnost a autor ji prováděl sám. Vybraná oblast je severozápadní část Jižních Čech, odkud pochází autor a má proto k řešenému území vztah. Navíc díky poměrně dobré znalosti oblasti byl sběr identických bodů značně zjednodušen. Jedná se tedy o oblast, kde jsou mapové listy původního mapování, nikoliv opravené nebo nově zmapované, viz kapitola 1.

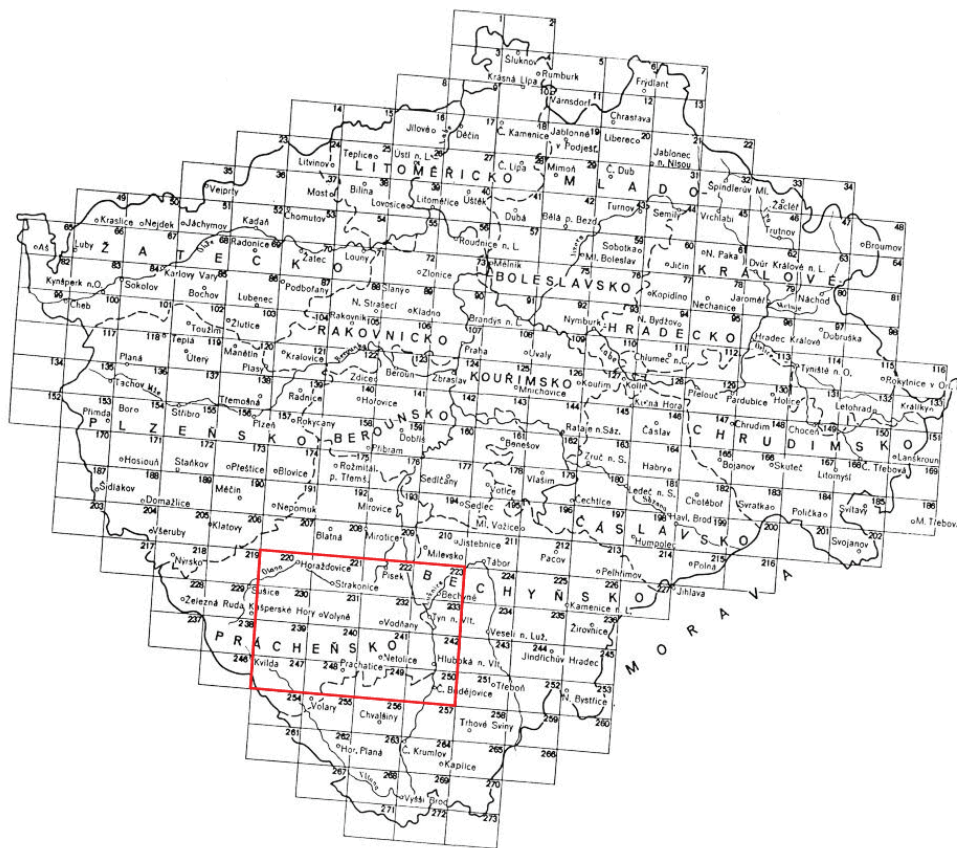
Rastrová data jsou ve formátu *tif*. Název souboru je složen z prvního písmene oblasti a čísla mapového listu v rámci kladu dané oblasti, např. *c239.tif*, což znamená list 239 z území Čech. Skeny jsou pořízeny v rozlišení 400 DPI s 8 bitovou barevnou hloubkou. Celkové rozlišení rastrů je cca 12 000 x 9 700 pixelů. Z toho vyplývá poměrně značná velikost jednoho souboru, kolem 90 MB.

Konkrétně byly použity následující mapové listy kladu Čechy: *220, 221, 222, 223, 230, 231, 232, 233, 239, 240, 241, 242, 247, 248, 249, 250*

2.2 Mapové podklady pro sběr identických bodů

Vzhledem k tomu, že identické body (dále jen IB) musely být vyhledávány v obraze mapy (viz kapitola 4.1), bylo nutné mít k dispozici vhodné mapové podklady umožňující odečítání souřadnic. Ukázalo se, že nejlepší řešení je využít některou z webových mapových služeb (dále jen WMS). Pomocí této služby byly mapové podklady připojeny do ArcGISu, kde lze potom v módu sběru IB pohodlně odečítat souřadnice ve zvoleném souřadnicovém systému.

Použity byly WMS Národního geoportálu INSPIRE–CENIA [4]. Využity byly dvě služby, Rastrové ekvivalenty topografických map a II. vojenské mapování.



Obr. 2.1: Řešené testovací území

2.2.1 Rastrové ekvivalenty topografických map

Jedná se o rastrové dlaždice topografických map v měřítku 1 : 25 000, zobrazený stav odpovídá květnu 2007. Adresu služby lze nalézt zde [4], včetně podrobného návodu jak službu zprovoznit.

Svojí podrobností a přesností mapy plně postačují pro odečítání souřadnic IB. Využity byly především pro odečtení souřadnic kostelů a dalších prvků, které se zachovaly do dnešních dnů.

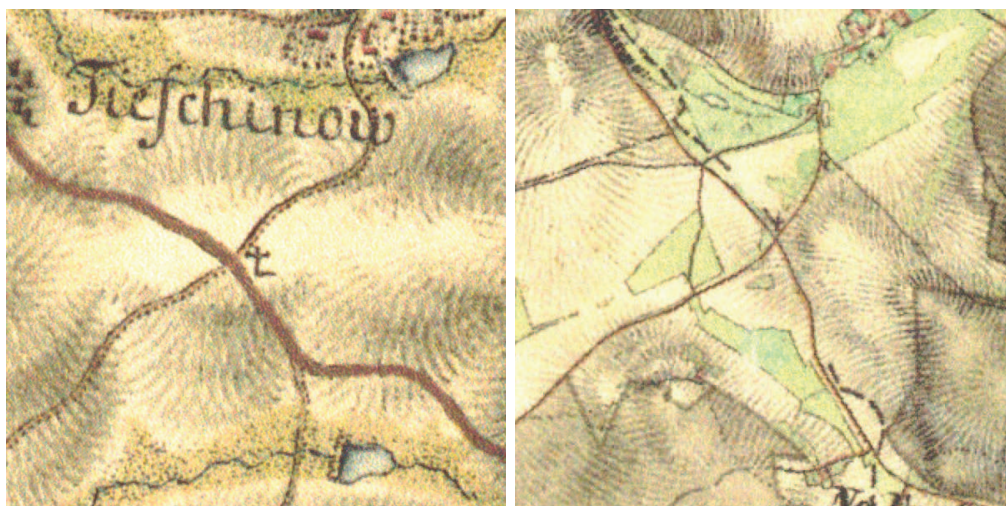
2.2.2 II. vojenské mapování

Tato služba zobrazuje rastrové dlaždice II. vojenského mapování (Františkova). Mapování území Čech, Moravy a Slezska probíhalo v letech 1836–1852. Adresu služby lze nalézt zde [4].

Porovnáním polohy významných objektů a prvků mapy bylo zjištěno, že polohově mapa odpovídá stavu zobrazenému na současných mapách. Je tedy také velmi dobře využitelná pro sběr IB, zvláště pokud si uvědomíme, jak nepřesné jsou mapy I. vojenského mapování. Služba byla využita při určování souřadnic objektů, které na současných mapách již nejsou (dávno neexistují).



Obr. 2.2: Obec Modrá Hůrka na mapách I. v. m. (list c233) a na RETM



Obr. 2.3: Křížení cest na mapě I. a II. vojenského mapování

3 Vyrovnání metodou nejmenších čtverců

V následující kapitole bude popsáno vyrovnání zprostředkujících měření metodou nejmenších čtverců (dále jen MNČ). Jedná se o metodu, pomocí které jsou zjišťovány neznámé parametry při nadbytečném počtu měření. Pro nás jsou neznámé parametry koeficienty transformace a měření představují souřadnice IB. Metoda je použita pro minimalizaci souřadnicových rozdílů mezi cílovými a přetransformovanými body. Nejprve bude popsáno klasické vyrovnání MNČ a poté vyrovnání s dodatečnými podmínkami.

Následující popis vyrovnání MNČ a vyrovnání s podmínkami byl převzat z připravované publikace Ing. Cajthamla „Analýza starých map v digitálním prostředí na příkladu Müllerových map“ [1].

3.1 Vyrovnání MNČ

Nejdříve zavedeme následující označení:

$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k)^T$	sloupcový vektor neznámých určovaných veličin,
$\mathbf{x}_0 = (x_{10}, \dots, x_{k0})^T$	sloupcový vektor přibližných hodnot neznámých,
$d\mathbf{x} = (dx_1, \dots, dx_k)^T$	sloupcový vektor přírůstků přibližných hodnot neznámých,
$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (F_1(\mathbf{x}), \dots, F_n(\mathbf{x}))^T$	sloupcový vektor funkčních vztahů mezi určovanými $(\mathbf{x})$ a měřeními $(\mathbf{l})$ veličinami,
$\mathbf{l} = (l_1, \dots, l_n)^T$	sloupcový vektor měřených veličin,
$\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_n)^T$	sloupcový vektor oprav měřených veličin,
$\mathbf{l}' = (l'_1, \dots, l'_n)^T$	sloupcový vektor vyrovnaných hodnot měřených veličin

k je počet hledaných neznámých veličin a n je počet měření.

Na základě předchozího označení tedy platí:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{l}' \quad (3.1)$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{l} + \mathbf{v} \quad (3.2)$$

Vyrovnaní MNČ vyžaduje lineární rovnice oprav, je proto nutné provést rozvoj levé strany výrazu do Taylorovy řady, se zanedbáním členů 2. řádu a vyšších:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{dx} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \cdot \mathbf{dx} = \mathbf{l} + \mathbf{v} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{l}' = \mathbf{F}(\mathbf{x}_0) - \mathbf{l} \quad (3.5)$$

Po úpravě dostaneme linearizované rovnice oprav:

$$\mathbf{v} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \cdot \mathbf{dx} + \mathbf{l}' \quad (3.6)$$

Nebo zkráceně:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{dx} + \mathbf{l}' \quad (3.7)$$

kde $\mathbf{A}$ je matice plánu – matice derivací funkčních vztahů podle jednotlivých neznámých.

Pro vyrovnané přírůstky neznámých platí následující vztah:

$$\mathbf{dx} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{l}') \quad (3.8)$$

Výsledné vyrovnané neznámé pak určíme ze vztahu (3.3).

Pokud jsou neznámé ve funkčních vztazích lineární a separované, nebo provede-li se vhodná substituce těchto vztahů, nemusí se použít Taylorův rozvoj. Potom platí:

$$\left. \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{l} + \mathbf{v} \quad (3.9)$$

Po úpravě dostaneme lineární rovnice oprav:

$$\mathbf{v} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (3.10)$$

Nebo zkráceně:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (3.11)$$

Přímo pro vyrovnané neznámé platí následující vztah:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{l}) \quad (3.12)$$

3.2 Vyrovnání zprostředkujících měření s podmínkami

Vyrovnání zprostředkujících měření s podmínkami v našem případě využijeme pro výpočet transformačních parametrů při definovaných podmínkách návaznosti mapových listů. Toto vyrovnání lze definovat podmínkami:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{l}' \quad (3.13)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = 0 \quad (3.14)$$

kde $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ je vektor funkčních vztahů mezi hledanými neznámými $\mathbf{x}$ a měřenými veličinami $\mathbf{l}$ a $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ je vektor funkčních vztahů neznámých mezi sebou – podmínek. Po linearizaci funkčních vztahů dostáváme:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{dx} + \mathbf{l}' \quad (3.15)$$

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{dx} + \mathbf{b} = 0 \quad (3.16)$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{G}(\mathbf{x}_0) \quad (3.17)$$

Při n měřeních, k neznámých a r podmínkách dostáváme soubor $(n + r)$ rovnic. Musí platit, že $n > k > r$ a zároveň $n > (k + r)$. Pro společné vyrovnání měření zprostředkujících s podmínkami potom platí:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{dx} \\ \mathbf{k} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{l}' \\ \mathbf{b} \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

kde $\mathbf{k}$ je vektor korelát.

4 Teorie georeferencování

4.1 Identické body

Pod pojmem identický bod se rozumí objekt, který lze jasně identifikovat v transformovaném obraze a lze mu přiřadit souřadnice v cílovém souřadnicovém systému. Pro každý IB lze tedy určit dvojice různé souřadnice, obrazové a mapové. Obrazové souřadnice jsou v našem případě reprezentovány pixelovými souřadnicemi a mapové souřadnice představují souřadnice v S-JTSK. Tyto souřadnice následně figurují na levých a pravých stranách transformačních rovnic jednotlivých transformačních metod.

Při sběru IB se doporučuje zaměřit se nejprve na matematické prvky mapového obrazu, tzn. rohy mapového rámu nebo souřadnicovou síť v mapovém obraze. Předpokládá se, že známe nebo jsme schopni určit souřadnice těchto rohů a průsečíků souřadnicové sítě.

V případě I. vojenského mapování tato možnost zcela odpadá z důvodu, že mapy nebyly vytvářeny v žádném souřadnicovém systému. Souřadnice rohů mapového rámu nejsou známy a souřadnicová síť v mapovém obraze není. IB je proto nutné vyhledávat přímo v obraze mapy. Je nutné volit takové objekty, které lze dobře identifikovat a jejichž souřadnice je možné určit z pozdějších (současných) mapových podkladů. Které objekty jsou pro IB vhodné je popsáno v kapitole 6.

4.2 Nutné počty identických bodů

Minimální nutný počet identických bodů je takový, aby bylo možné určit všechny neznámé vystupující v transformačních rovnicích použité transformace.

Z řešených lineárních 2D transformací vystupuje nejvíce neznámých transformačních parametrů v afinní transformaci, a to 6 ($\omega_x, \omega_y, m_x, m_y, X_t, Y_t$). Z toho vyplývá, že pro jejich určení potřebujeme znát 6 rovnic (3 páry pixelových souřadnic a jim odpovídajících souřadnic v S-JTSK). To znamená, že je nutné sejmout alespoň 3 IB. Při získání 4 a více IB (nadbytečný počet) se k výpočtu transformačních

parametrů použije vyrovnaní MNČ, viz kapitola 4.4.3.

4.3 Transformace obecně

Následující obecný popis transformace byl převzat z [1].

Lineární 2D transformace lze obecně maticově popsat v tzv. homogenních souřadnicích. Platí následující **definice**: *uspořádaná trojice čísel $[x, y, w]$ představuje homogenní souřadnice bodu P s kartézskými souřadnicemi $[X, Y]$ ve dvou rozměrech, platí-li:*

$$X = \frac{x}{w} \quad Y = \frac{y}{w} \quad W \neq 0 \quad (4.1)$$

Pro parametr $w = 1$ dostaneme obecné maticové vyjádření transformace:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} \\ p_{20} & p_{21} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

kde x', y' jsou souřadnice v cílové soustavě, x a y jsou souřadnice ve výchozí soustavě a p_{nn} jsou transformační koeficienty.

Každou transformaci lze postupně popsat samostatnými operacemi – posunutím, otočením a změnou měřítko.

Posunutí (translace) je určena vektorem posunu $\mathbf{p} = (X_t, Y_t)$. Matice posunu $\mathbf{T}$ má tvar:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & X_t \\ 0 & 1 & Y_t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Otočení (rotace) kolem počátku soustavy souřadnic o úhly ω_x, ω_y je dána maticí rotace $\mathbf{R}$. Každý úhel představuje rotaci jedné ze souřadnicových os. Matice rotace $\mathbf{R}$ má tvar:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos(\omega_x) & -\sin(\omega_y) & 0 \\ \sin(\omega_x) & \cos(\omega_y) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Změna měřítka je určena koeficienty m_x a m_y , které definují zmenšení/zvětšení ve směru souřadnicových os. Matice změny měřítka $\mathbf{M}$ má tvar:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_x & 0 & 0 \\ 0 & m_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Tyto dílčí geometrické operace lze složit do výsledné transformace. Protože jsou všechny operace vyjádřeny v homogenních souřadnicích, lze skládání provést vynásobením jednotlivých matic mezi sebou:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{T} \mathbf{R} \mathbf{M} \mathbf{x} \quad (4.6)$$

Po roznásobení matic mezi sebou:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_x \cos(\omega_x) & -m_y \sin(\omega_y) & X_t \\ m_x \sin(\omega_x) & m_y \cos(\omega_y) & Y_t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Výsledné transformační rovnice:

$$x' = m_x \cos(\omega_x)x - m_y \sin(\omega_y)y + X_t \quad (4.8)$$

$$y' = m_x \sin(\omega_x)x + m_y \cos(\omega_y)y + Y_t \quad (4.9)$$

4.4 Řešené transformační metody

V této části budou popsány lineární 2D transformace, které byly v průběhu práce vyzkoušeny. Jejich popis je čerpán z [1]. Jedná se o:

- podobnostní transformaci
- 5-prvkovou afinní transformaci

- afinní transformaci

4.4.1 Podobnostní transformace

Podobnostní transformace představuje jednu z nejjednodušších transformací, kdy obraz není nijak deformován, prostorové vztahy v obraze jsou zachovány. Je realizována posunutím, rotací shodnou pro obě souřadnicové osy a změnou měřítka shodnou v obou osách. Transformační rovnice mají tedy následující tvar:

$$x' = m \cos(\omega)x - m \sin(\omega)y + X_t \quad (4.10)$$

$$y' = m \sin(\omega)x + m \cos(\omega)y + Y_t \quad (4.11)$$

V rovnicích se vyskytují 4 neznámé (m, ω, X_t, Y_t), potřebujeme tedy znát 4 souřadnice IB v obou soustavách (2 IB). Při znalosti více párů souřadnic se použije vyrovnaní MNČ. Zde narazíme na fakt, že parametr ω není v lineárním vztahu. Je proto výhodné použít substituci:

$$m \cos(\omega) = a \quad (4.12)$$

$$m \sin(\omega) = b \quad (4.13)$$

Poté můžeme počítat přímo s vyrovnanými neznámými (a, b, X_t, Y_t) a vyrovnané neznámé získat pomocí výrazu (3.12).

4.4.2 5–prvková afinní transformace

Jedná se speciální případ afinní transformace s tím rozdílem, že pro obě souřadnicové osy platí shodný rotační úhel. Je tedy realizována posunutím, změnou měřítka různou v obou osách a rotací shodnou pro obě souřadnicové osy. Tento typ transformace je vhodný pro použití u historických map, které nejsou přesné a neznáme srážku papíru (právě mapy I. vojenského mapování) protože nepřesnosti IB nezpůsobí zkosení obrazu a zároveň je eliminována srážka papíru. Metodu bohužel nelze použít při transformaci s podmínkami návaznosti hran listů, viz kapitola 5. Transformační rovnice mají následující tvar:

$$x' = m_x \cos(\omega)x - m_y \sin(\omega)y + X_t \quad (4.14)$$

$$y' = m_x \sin(\omega)x + m_y \cos(\omega)y + Y_t \quad (4.15)$$

V rovnicích se vyskytuje 5 neznámých ($m_x, m_y, \omega, X_t, Y_t$). Při nadbytečném počtu měření (souřadnic IB) se použije vyrovnaní MNČ. Parametr ω není v lineárním vztahu a nelze provést substituci tak, aby ve výsledných rovnicích byly neznámé lineární a separované. Je proto nutné použít přibližné hodnoty neznámých parametrů a vyrovnávat jejich přírůstky. Tyto neznámé hodnoty lze snadno získat řešením klasické afinní transformace na základě 3 libovolných IB, které neleží v přímce. Získáme tak 6 parametrů afinní transformace, které se použijí pro výpočet přibližných parametrů 5-prvkové afinní transformace. Následuje výpočet vyrovnaných přírůstků neznámých dle vztahu (3.8) a výsledné vyrovnané hodnoty transformačních koeficientů získáme pomocí vztahu (3.3).

4.4.3 Afinní transformace

Afinní transformace je realizována posunutím, změnou měřítka různou v každé ose a rotací různou v každé ose. Dochází zde tedy ke zkosení obrazu. Transformační rovnice mají následující tvar:

$$x' = m_x \cos(\omega_x)x - m_y \sin(\omega_y)y + X_t \quad (4.16)$$

$$y' = m_x \sin(\omega_x)x + m_y \cos(\omega_y)y + Y_t \quad (4.17)$$

V rovnicích se vyskytuje 6 neznámých ($m_x, m_y, \omega_x, \omega_y, X_t, Y_t$), jsou tedy potřeba minimálně 3 IB. Při nadbytečném počtu souřadnic IB se použije vyrovnaní MNČ. Parametry ω_x a ω_y nejsou v rovnicích v lineárním vztahu, lze ale použít následující substituci:

$$m_x \cos(\omega_x) = a \quad (4.18)$$

$$-m_y \sin(\omega_y) = b \quad (4.19)$$

$$m_x \sin(\omega_x) = c \quad (4.20)$$

$$m_y \cos(\omega_y) = d \quad (4.21)$$

Potom mají transformační rovnice následující tvar, kde neznámé jsou v lineárním vztahu:

$$x' = a x + b y + X_t \quad (4.22)$$

$$y' = c x + d y + Y_t \quad (4.23)$$

Poté můžeme pracovat přímo s vyrovňávanými neznámými (a, b, c, d, X_t, Y_t) a hodnoty vyrovnaných neznámých získat pomocí výrazu (3.12).

Vektor neznámých $\mathbf{x}$ je potom:

$$\mathbf{x} = (a, b, c, d, X_t, Y_t)^T \quad (4.24)$$

Matice plánu $\mathbf{A}$ má tvar:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_1 & y_1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & x_n & y_n & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

Vektor měření $\mathbf{l}$ má tvar:

$$\mathbf{l} = (x'_1, \dots, x'_n, y'_1, \dots, y'_n)^T \quad (4.26)$$

Hodnoty geometrických transformačních koeficientů získáme potom zpětnou substitucí:

$$m_x = \sqrt{a^2 + c^2} \quad (4.27)$$

$$m_y = \sqrt{b^2 + d^2} \quad (4.28)$$

$$\omega_x = \arctg(c/a) \quad (4.29)$$

$$\omega_y = \arctg(-b/d) \quad (4.30)$$

5 Transformace s podmínkami návaznosti hran listů

Při georeferencování jednotlivých mapových listů I. vojenského mapování dojde k tomu, že jednotlivé mapové listy na sebe nenavazují – vytvářejí se mezery nebo se listy překrývají. Lze proto provést vyrovnaní transformačních koeficientů všech listů společně se zavedenými podmínkami, aby hrany mapových listů na sebe navazovaly. Metodu navrhl Ing. Cajthaml, její popis je čerpán z [1].

Pro tuto metodu nelze ovšem použít jakoukoliv transformaci. Z řešených transformací lze využít afinní transformaci, zbylé dvě transformace (podobnostní a 5-prvková afinní) neumožňuje plnou funkčnost této metody. Transformace s podmínkami návaznosti listů byla tedy řešena za použití afinní transformace, pro kterou bude nyní také popsána.

Pro jednotlivé mapové listy platí následující transformační rovnice:

list 1:

$$x' = a_1 x + b_1 y + X_{t1} \quad (5.1)$$

$$y' = c_1 x + d_1 y + Y_{t1} \quad (5.2)$$

list n:

$$x' = a_n x + b_n y + X_{tn} \quad (5.3)$$

$$y' = c_n x + d_n y + Y_{tn} \quad (5.4)$$

Podmínky návaznosti hran mapových listů lze v případě lineární 2D transformace definovat jako identičnost společných rohů listů. Pro list 1 a 2 (viz obr. 5.1) tedy platí:

$${}^1x'_{PH} = {}^2x'_{LH} \quad (5.5)$$

$${}^1y'_{PH} = {}^2y'_{LH} \quad (5.6)$$

$${}^1x'_{PD} = {}^2x'_{LD} \quad (5.7)$$

$${}^1y'_{PD} = {}^2y'_{LD} \quad (5.8)$$

Souřadnice ${}^1x'_{PH}$ a další představují souřadnice rohů mapových listů po transformaci. Musíme tedy znát pixelové souřadnice rohů mapových listů, které je nutné odečíst podobně jako souřadnice IB. Ty dosadíme do transformačních rovnic a vložíme do rovností dle předchozích výrazů:

$$a_1 {}^1x_{PH} + b_1 {}^1y_{PH} + X_{t1} = a_2 {}^2x_{LH} + b_2 {}^2y_{LH} + X_{t2} \quad (5.9)$$

$$c_1 {}^1x_{PH} + d_1 {}^1y_{PH} + X_{t1} = c_2 {}^2x_{LH} + d_2 {}^2y_{LH} + X_{t2} \quad (5.10)$$

$$a_1 {}^1x_{PD} + b_1 {}^1y_{PD} + X_{t1} = a_2 {}^2x_{LD} + b_2 {}^2y_{LD} + X_{t2} \quad (5.11)$$

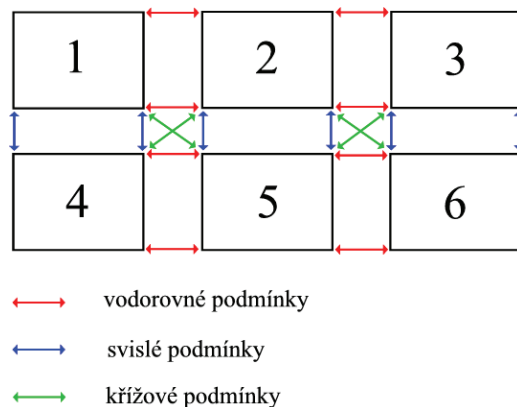
$$c_1 {}^1x_{PD} + d_1 {}^1y_{PD} + X_{t1} = c_2 {}^2x_{LD} + d_2 {}^2y_{LD} + X_{t2} \quad (5.12)$$

Rovnice podmínek vypadají potom takto:

$$a_1 {}^1x_{PH} + b_1 {}^1y_{PH} + X_{t1} - a_2 {}^2x_{LH} - b_2 {}^2y_{LH} - X_{t2} = 0 \quad (5.13)$$

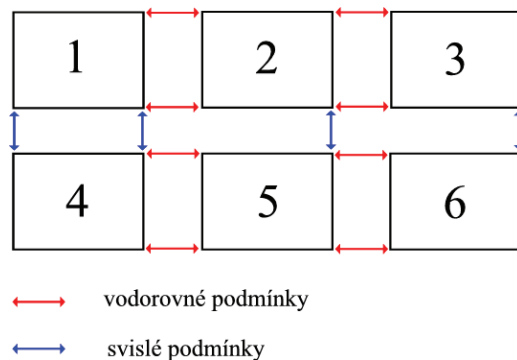
⋮

Obdobně lze vytvořit také další vodorovné, svislé nebo křížové podmínky viz obrázek 5.1.



Obr. 5.1: Možné podmínky návaznosti mapových listů

Při výpočtu vyrovnání ale nelze uvažovat všechny podmínky, které je možné vytvořit. Podmínky jsou potom již lineárně závislé a výsledná matice plánu je singulární. Je tedy nutné podmínky vhodně zredukovat. Možné je např. řešení na obrázku 5.2, které bylo také v praxi použito.



Obr. 5.2: Potřebné podmínky návaznosti mapových listů

Jak je vidět, byly úplně vynechány křížové podmínky, které nejsou potřeba (až na případ, který by ale v praxi neměl nastat, více viz kapitola 7.4) a dále byly vynechány některé svislé podmínky. Takto je zajištěno ztotožnění všech hran navazujících mapových listů (pokud žádný z listů nechybí, více opět viz kapitola 7.4).

Abychom mohli provést společné vyrovnaní zprostředkujících měření s podmínkami, je nutné sestavit matici plánu $\mathbf{A}$, matici podmínek $\mathbf{B}$ a vektor měření $\mathbf{l}$. Výhodou je skutečnost, že ve všech vztazích včetně podmínek jsou neznámé lineární a separované. Řešení má potom následující tvar:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{l} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

Matice $\mathbf{A}$ se sestaví z dílčích matic (4.25) pro jednotlivé listy:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{A}_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{A}_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{A}_6 \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

Matice $\mathbf{B}$ se sestaví z derivací rovnic podmínek (5.13) dle jednotlivých neznámých. Dílčí matice podmínek pro návaznost listu 1 a 2 vypadá následovně:

$$\mathbf{B}_{1,2} = \begin{pmatrix} {}^1x_{PH} & {}^1y_{PH} & 0 & 0 & 1 & 0 & -2x_{LH} & -2y_{LH} & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & {}^1x_{PH} & {}^1y_{PH} & 0 & 1 & 0 & 0 & -2x_{LH} & -2y_{LH} & 0 & -1 \\ {}^1x_{PD} & {}^1y_{PD} & 0 & 0 & 1 & 0 & -2x_{LD} & -2y_{LD} & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & {}^1x_{PD} & {}^1y_{PD} & 0 & 1 & 0 & 0 & -2x_{LD} & -2y_{LD} & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

Vektor měření $\mathbf{l}$ se sestaví z dílčích vektorů (4.26) pro jednotlivé listy:

$$\mathbf{l} = (\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \mathbf{l}_3, \mathbf{l}_4, \mathbf{l}_5, \mathbf{l}_6)^T \quad (5.17)$$

Výsledkem vyrovnání jsou transformační koeficienty všech řešených listů, které se aplikují na příslušné mapové listy. Výsledné georeferencované mapové listy tak na sebe přesně navazují svými rohy a díky tomu i hranami. V případě, že je tvar mapového rámu deformovaný (prohnutý, zvlněný) tak je návaznost v hraně poněkud zhoršena. Bylo by proto nutné před samotným zpracováním (sběrem IB) rekonstruovat skutečný tvar mapového rámu na původní. Toto však nebylo řešeno, pracovalo se se skutečnými tvary listů, aniž by tím výsledek nějak zásadně utrpěl.

Existují také jiné metody, jak dosáhnout návaznosti jednotlivých listů, a to například spojení obrazů listů ještě před georeferencováním do jednoho obrazu, nebo transformace samostatných listů, následný výpočet průměrů souřadnic rohů listů a projektivní transformace na tyto průměrné souřadnice.

První zmíněná alternativa je však v praxi velmi těžko použitelná vzhledem k obrovské velikosti výsledného obrazu, se kterým by bylo nutné pracovat. Oproti druhé zmíněné metodě je zde zase výhoda pouze jedné transformace. Nevýhodou řešeného postupu je skutečnost, že dojde-li ke změně jediného IB, je nutné celý proces opakovat, protože se změní koeficienty transformace všech listů.

6 Identické body na mapách I. vojenského mapování

Na mapách I. vojenského mapování lze nalézt několik typů trvalých objektů, které se více či méně hodí pro použití jako IB. Je třeba také zmínit, že provedení a viditelnost těchto objektů se může v rámci různých mapových listů lišit.

Kostely

Jako jedny z nejvhodnějších IB se jeví kostely. Jsou označeny poměrně výraznou mapovou značkou, která dominuje zobrazení daného sídla. Navíc lze předpokládat, že poloha kostelů se za poslední dvě a půl století většinou nezměnila. Jako mapový podklad byly brány RETM, viz kapitola 2.2.1. Problémem je bohužel jejich množství, v řešené oblasti je to průměrně 8 na mapový list (ale také třeba pouze 4), viz příloha A.2. Je tedy bezpodmínečně nutné doplnit je dalšími typy bodů, aby bylo dosaženo jednak potřebných počtů IB, tak také jejich rovnoměrného rozložení v ploše mapového listu.

Následující výřezy ukazují odlišnosti zobrazení kostelů na různých listech.



Obr. 6.1: Zobrazení kostelů – Horažďovice (vlevo), Chroboly (vpravo)

Statky

Dalšími dobře viditelnými IB jsou velké statky a zemědělské usedlosti. Vyskytují se často a ve II. vojenském mapování (viz kapitola 2.2.2) je lze dobře nalézt. Navíc

jsou často pojmenovány shodně v I. i II. vojenském mapování, což zlepšuje jejich identifikaci. Mnohdy lze jako IB určit i konkrétní roh stavby. Stejně dobře poslouží i zámky a jiné významné budovy.



Obr. 6.2: Zobrazení zemědělských usedlostí v I. a II. vojenském mapování

Kříže, boží muka

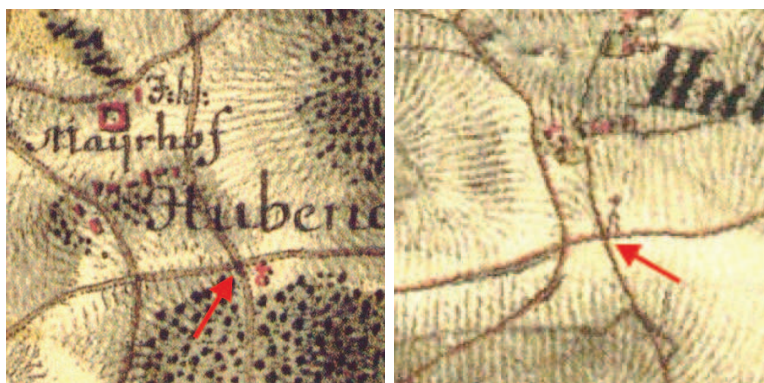
Velmi dobře viditelné jsou v I. vojenském mapování různé kříže a boží muka. To už bohužel zdaleka neplatí o II. vojenském mapování a současném stavu. Zde jich je zobrazeno podstatně méně a navíc i jejich poloha se často značně liší (často jiná strana cesty, znatelně jiná vzdálenost od sídla). Proto byly vybrány pouze ty, u kterých poloha odpovídá novějšímu nebo dokonce i současnému mapovému podkladu.



Obr. 6.3: Zobrazení křížů v I. a II. vojenském mapování

Křižovatky

Dále je možné volit různé křižovatky a křížení cest. Tyto body byly odečítány pouze vzhledem k II. vojenskému mapování, kde lze předpokládat, že se cesty ještě významně nezměnily. Tyto IB už ale nejsou příliš vhodné, protože cesty jsou v I. vojenském mapování znázorněny značně nepřesně.



Obr. 6.4: Zobrazení křížení cest v I. a II. vojenském mapování

Mlýny

Několik IB představují mlýny, které jsou na mapách I. vojenského mapování znázorněny speciální mapovou značkou.



Obr. 6.5: Zobrazení mlýnů v I. a II. vojenském mapování

Jako nouzovou variantu, pokud v daném území není nic lepšího, lze brát sídla a jako IB označit samoty, návsi vesnic atd. Tato možnost nebyla v řešeném území

využita.

Vodní toky a vodní plochy nebyly vůbec brány v úvahu. Například pouhé tvary rybníků se vůči II. vojenskému mapování velmi liší.

Doporučit lze tedy následující IB, řazeno od nejlepších:

- kostely, kaple, kláštery
- statky, zámky a jiné významné budovy
- kříže, boží muka
- křížení cest
- mlýny

7 Řešení

V následující kapitole je popsáno vlastní řešení. Podkapitoly jsou řazeny tak, jak postupně probíhaly práce na jednotlivých částech úlohy. Zhruba lze postup zpracování rozdělit do následujících kroků:

- příprava dat – sběr IB
- testování různých metod transformace
- ověření funkčnosti transformace s podmínkami návaznosti hran listů
- tvorba programu pro výpočet transformace s podmínkami návaznosti v C++
- georeferencování obrazů mapových listů, maskování mimorámových údajů listů
- porovnání s metodou průměrování souřadnic rohů listů

Všechny práce s rastrovými obrazy mapových listů probíhaly v softwaru ArcGIS verze 10.0, viz [6], který je pro práci s velkým množstvím prostorových dat velmi vhodný, autor navíc během studia absolvoval několik kurzů zaměřených na tento systém. Testování různých metod transformace a ověření funkčnosti navrhované metody bylo provedeno v softwaru Matlab ve verzi R2011a, viz [5]. Tento matematický systém bylo výhodné použít vzhledem k velkému množství implementovaných maticových operací, jednoduchosti načítání textových dat a celkově pohodlné a rychlé práci. Bohužel tyto zdrojové kódy vyžadují instalaci Matlabu a proto nejsou vhodné pro širší využití. Pro finální vyzkoušený výpočet bylo tedy nutné napsat samostatně spustitelný program. Vybrán byl programovací jazyk C++.

7.1 Volba souřadnicového systému

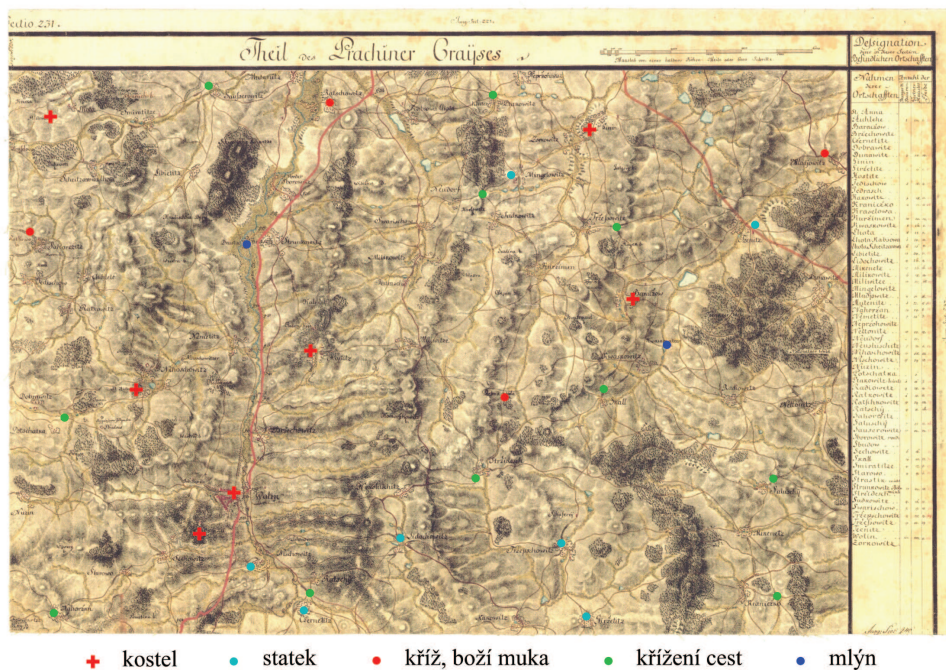
Před vlastním sběrem IB bylo nutné zvolit souřadnicový systém, ve kterém budou probíhat veškeré práce. Vzhledem k tomu, že se práce zabývá transformací mapových listů zobrazujících území ČR, byl pro zpracování vybrán národní souřadnicový systém S-JTSK (je ovšem možné zvolit jiný systém, musí být ale shodný pro všechny

listy). Ten se v ArcGIS označuje *S-JTSK_Krovak_East_North*. Oproti skutečnému S-JTSK má prohozené souřadnicové osy se zápornými hodnotami pro území ČR ($Y_{skut} = -X_{ArcGIS}$, $X_{skut} = -Y_{ArcGIS}$), to ale nepředstavuje žádný problém.

7.2 Sběr IB

V prostředí softwaru ArcGIS probíhá sběr IB pomocí modulu *Georeferencing*. Jako mapový podklad pro odečítání souřadnic IB byly použity WMS popsané v kapitole 2. Typy a vhodnost IB jsou popsány v předchozí kapitole 6.

Práce probíhala tak, že zpracovávaný rastr se nejdříve prohlédl v softwaru na prohlížení fotografií (IrfanView), kde lze s rastrem rychle a pohodlně manipulovat. Tak byly nalezeny a poznamenány obce, ve kterých v době mapování existovaly kostely. Ty lze označit jako jedny z nejlepších IB. Poté byly v ArcGISu vytvořeny tyto IB, obraz mapového listu se zhruba georeferencoval. Následoval sběr dalších IB, které představují statky, křížení cest atd. Záměr byl samozřejmě najít kvalitní a pokud možno v ploše mapového listu rovnoměrně rozložené IB. Příklad rozložení IB je na obrázku 7.1.

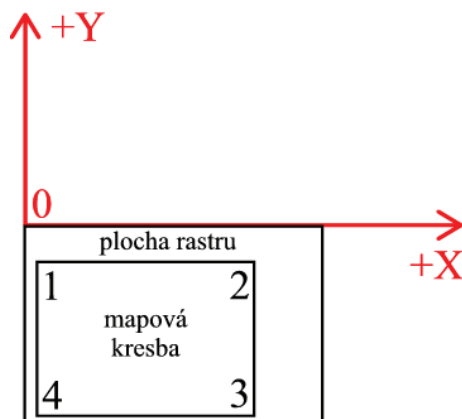


Obr. 7.1: Typy a rozložení IB, list 231 z území Čech

Po nalezení dostatečného množství IB pro daný list (nebo spíše vyčerpání všech smysluplných možností na daném mapovém listě) byl seznam s IB uložen do textového souboru. Soubor byl pojmenován tak, aby bylo jasné, ke kterému mapovému listu se vztahuje, např. *c231_ib.txt*. Uložení se provádí po otevření okna *Link Table*. Jednotlivé IB jsou uloženy v řádcích, kdy sloupce představují: x_{pix} y_{pix} x_{map} y_{map} .

Takto se podařilo nalézt kolem 30 IB na mapový list a je možné předpokládat, že v hustěji obydlených oblastech to bude ještě více, protože řešená oblast patří spíš k pohraničním územím. Přehled počtů IB viz příloha A.2.

Kvůli podmínkám návaznosti listů bylo ještě nutné získat obrazové (pixelové) souřadnice rohů mapového rámu. Ty byly odečteny také v modulu *Georeferencing*, na mapových souřadnicích nezáleží, z uloženého souboru jsou vymazány. Seznam souřadnic rohů byl uložen opět do textového souboru s názvem odpovídajícím danému listu, např. *c231_rohy.txt*. V řádcích jsou uloženy pixelové souřadnice rohů vždy v pořadí LH, PH, PD, LD, sloupce představují: x_{pix} y_{pix} .



Obr. 7.2: Orientace a počátek soustavy pixelových souřadnic v ArcGIS

7.3 Testování různých metod transformace

Dříve než byla veškerá pozornost upřena na realizaci navrhované metody transformace s podmínkami návaznosti, bylo rozhodnuto otestovat některé jednoduché metody transformace pro georeferencování samostatných listů. Jedná se o:

- podobnostní transformaci
- 5-prvkovou afinní transformaci
- afinní transformaci

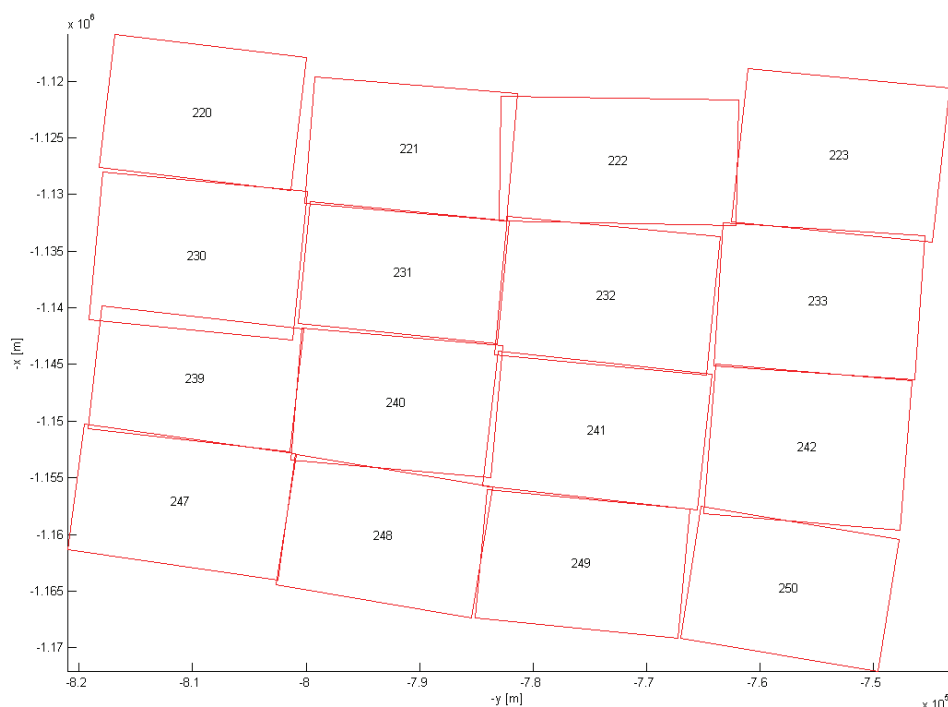
Při testování bylo na základě aposteriorní směrodatné odchylky (7.1) transformace jednotlivých listů určováno, která z metod zaručuje nejlepší přizpůsobení mapových listů skutečnosti. Výsledná transformační metoda potom byla použita pro návaznosti mapových listů metodou průměrování souřadnic rohů listů.

$$\sigma_{apos} = \sqrt{\frac{\sum v v}{n - k}} \quad (7.1)$$

Dle předpokladu je touto výslednou metodou afinní transformace, která pro většinu listů zajistí nejlepší přizpůsobení listu skutečnému stavu. Tabulka s konkrétními hodnotami odchylek je v příloze B.1.

Pro testování byl napsán výpočetní skript v softwaru Matlab, který počítá transformační parametry zvolené metody dle postupů popsaných v kapitole 4.4. Před spuštěním výpočtu stačí zadat, kterou transformaci budeme počítat a také jména adresářů, ve kterých jsou uloženy textové soubory se souřadnicemi IB a rohů. Poté, co výpočet proběhne, jsou zobrazeny aposteriorní odchylky jednotlivých listů a graf, ve kterém jsou znázorněny polohy georeferencovaných mapových listů. Volitelná je možnost, zda chceme vypočítat průměry souřadnic rohů listů a zobrazit graf s takto vytvořenými návaznostmi mapových listů. Výpočetní skript je v příloze B.2.

Výsledné grafy také velmi dobře ukazují základní slabinu I. vojenského mapování – absenci geometrického základu mapování a z toho plynoucí zkreslení a následnou nenávaznost georeferencovaných mapových listů, viz obrázek 7.3. Výsledky jednotlivých transformací jsou v příloze A.4.



Obr. 7.3: Poloha georef. mapových listů, 5-prvková afinní transformace

7.4 Transformace s podmínkami návaznosti hran listů

Metoda využívá afinní transformaci, protože zbylé dvě testované transformace (podobnostní, 5-prvková afinní) není možné použít. Jejich vlastnosti totiž neumožní vytvořit návaznosti mezi všemi listy.

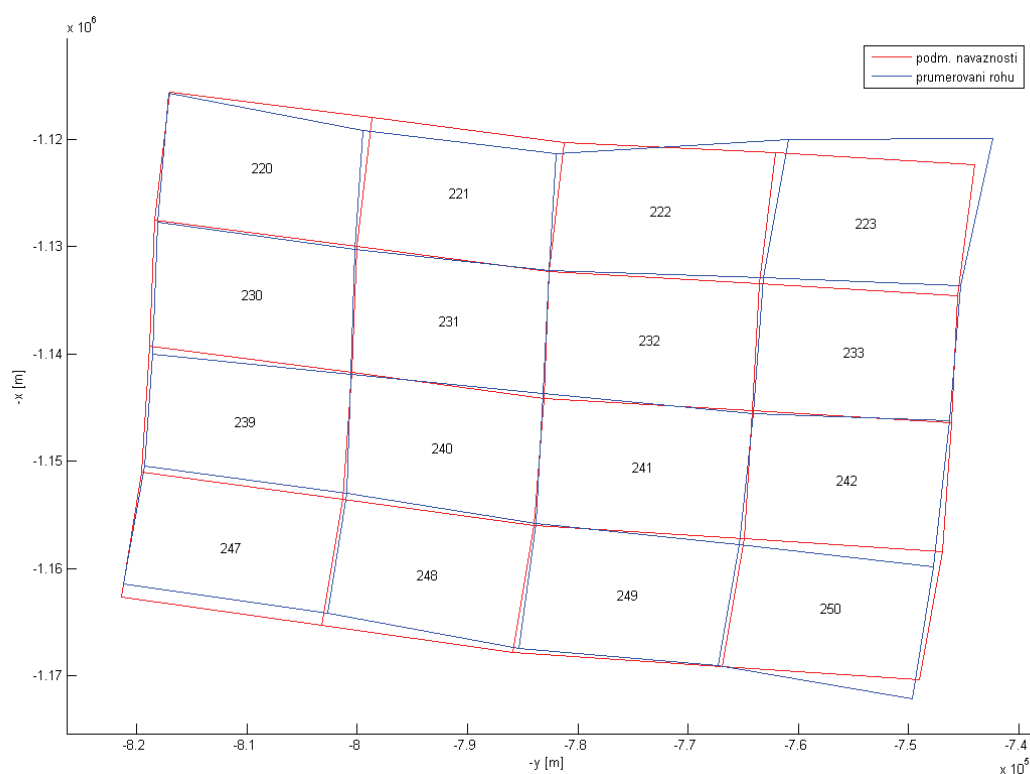
Podobnostní transformace zahrnuje posun, rotaci shodnou v obou osách a změnu měřítka shodnou v obou osách. Je proto možné spojit mapové listy například v řádcích, ale potom už nelze provést napojení ve sloupcích a obráceně. Konstantní změna měřítka neumožní upravit velikost rastrů tak, aby na sebe navazovaly v obou směrech.

Zdálo by se, že problém tedy odstraní použití 5-prvkové afinní transformace, která má změnu měřítka ve směru souřadnicových os různou. Bohužel ani to nepomůže, protože pro obě osy shodný rotační úhel ω nezaručí návaznost listů. Mapové listy by totiž na sebe musely hranami navazovat již před transformací.

Pro otestování funkčnosti metody byl napsán zdrojový kód v Matlabu. Bylo zjištěno, že při použití afinní transformace funguje vše tak, jak je uvedeno v teoretickém

postupu [1]. Výpočet transformačních koeficientů probíhá podle postupu popsaného v kapitole 5.

Před spuštěním kódu je nutné nadefinovat matici, která určuje rozložení mapových listů. Pokud nějaký list chybí, uvede se místo čísla listu 0. Také je potřeba zadat jména adresářů se soubory IB a souřadnicemi rohů. Volitelná je možnost použít jinou transformační metodu a zvolit, které podmínky návaznosti (vodorovné, svislé, žádné) budou použity. Zde ale výpočet končí singulární maticí $\mathbf{A}$, pokud zvolíme takové podmínky, které neodpovídají možnostem použité transformační metody (viz výše). Pokud nejsou vybrány žádné podmínky návaznosti, výpočet proběhne jako klasická transformace samostatných listů. Volitelná je také možnost zobrazení porovnání výsledků transformace s podmínkami návaznosti a metody průměrování souřadnic rohů (obrázek 7.4). K tomu musíme mít připravený soubor průměrných souřadnic rohů listů, který je výstupem skriptu popsaném v předešlé kapitole.

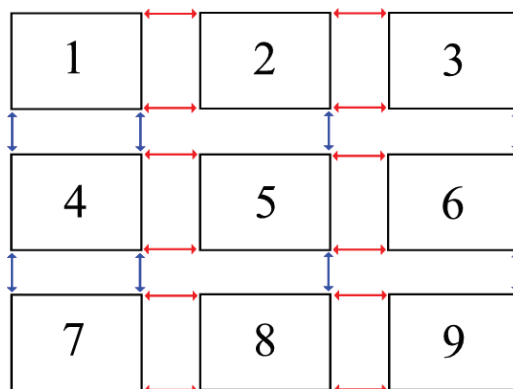


Obr. 7.4: Afinní transformace – porovnání tr. s podmínkami návaznosti a metody průměrování souř. rohů

Tvorba podmínek návaznosti

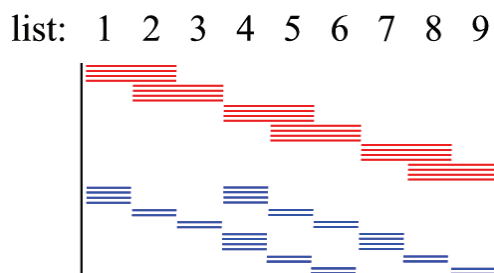
Nejzajímavější částí celého výpočtu je řešení podmínek návaznosti mapových listů. Jde o to, aby se podmínky vytvořily automaticky, bez nutnosti cokoliv v kódu měnit pro konkrétní případ. Proto je na začátku výpočtu nutné nadefinovat matici s rozložením mapových listů, která určuje vzájemnou polohu konkrétních listů. V případě, že chceme vytvořit úplné podmínky návaznosti, použije se schéma podmínek zobrazené na obrázku 5.2. Je tedy vidět, že se vytvoří úplné vodorovné podmínky. Svislé podmínky jsou úplné pouze v prvním sloupci listů, v dalších jsou pouze pravé podmínky návaznosti.

Důležité je, aby se jednotlivé derivace rovnic podmínek doplnily ve vznikající matici **B** na správné místo. Každá z podmínek musí zaujímat své místo tak, aby odpovídala pozici derivací transformačních rovnic listu, ke kterému se vztahuje. Pracujeme-li s následujícím rozložením listů:



Obr. 7.5: Rozložení mapových listů pro ukázkou tvorby podmínek

matice podmínek **B** má potom tvar:

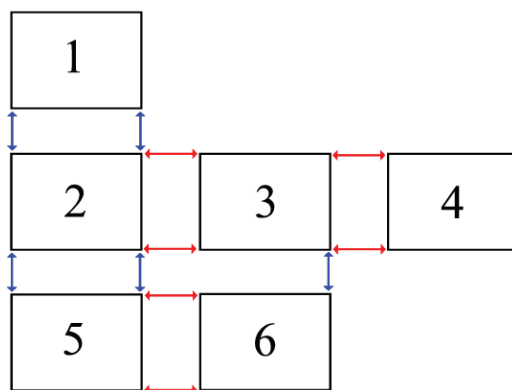


Jedna návaznost (shodnost souřadnic rohu dvou sousedních listů) představuje vždy dvojici podmínek – pro souřadnici x a y rohu listu. Derivacím úplných podmínek (viz (5.16)) odpovídá tedy čtveřice linek, redukovaným (pravým) podmínkám odpovídá dvojice linek. Na všech ostatních místech výsledné matice $\mathbf{B}$ jsou 0.

Podmínky v případě chybějících mapových listů

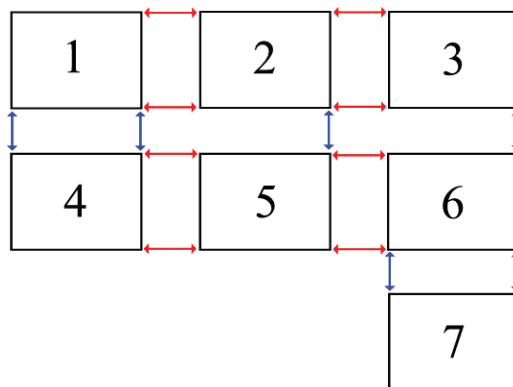
Předchozí část popsala tvorbu podmínek návaznosti pro případ, kdy mapové listy tvoří ideální čtverec / obdélník. Taková situace ale nenastane, zahrneme-li okrajové mapové listy, nebo chceme jednoduše některé listy vynechat.

V případě, kdy chybí mapové listy zprava, tak je vše v pořádku. Listy navazují tak jak mají – žádná z podmínek zaručující návaznost okolních listů nechybí, viz následující obrázek.



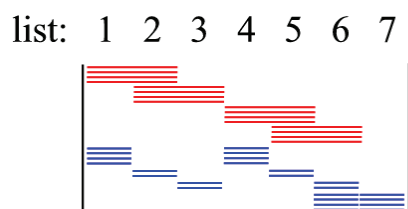
Obr. 7.6: Podmínky návaznosti – listy chybí zprava

Pokud listy chybí zleva, nebo tvoří díru, tak budou chybět některé podmínky pro návaznost levých rohů okolních listů. Tento problém se vyřeší tak, že pokud se narazí na chybějící list při tvorbě svislých podmínek (ať horní nebo dolní), je nutné aby vedlejší svislé podmínky byly úplné, tak jak ukazuje obrázek 7.7.



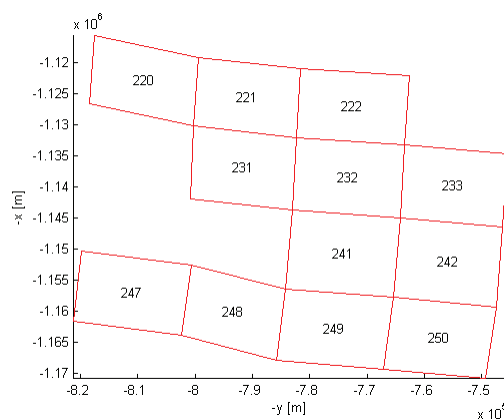
Obr. 7.7: Podmínky návaznosti – listy chybí zleva

Matice podmínek $\mathbf{B}$ má potom tvar:



Jediný případ, který není ošetřen, nastává pokud chybí několik listů po úhlopříčce. Potom se neztotožní dotýkající se rohy zbylých listů. Tento případ ale v praxi, vzhledem k rozložení mapových listů, nastat nemůže. Proto nebyl řešen. Nejsnáze by ho vyřešilo přidání potřebné křížové podmínky, viz obrázek 5.1.

Zdrojový kód pro Matlab je v příloze B.2.



Obr. 7.8: Ukázka návaznosti v případě chybějících listů

7.5 Program pro výpočet transformace s podmínkami návaznosti v C++

Po odladění výpočtu v Matlabu přišel na řadu program pro výpočet transformačních koeficientů, který nebude závislý na instalaci prostředí Matlab.

Pro tvorbu programu *georeferencovani* bylo použito volně dostupné vývojové prostředí Qt Creator [7] a rovněž volně dostupné vývojové prostředí Dev-C++ [8], určené pro operační systém Windows. Qt Creator byl použit pro vlastní tvorbu zdrojového kódu, která je v tomto vývojovém prostředí uživatelsky velmi přívětivá. Protože je ale program po kompilaci závislý na sdílené knihovně *mingwm10m.dll* a také aby se vyzkoušel překlad programu ve více prostředích, je výsledný program zkompileován pomocí Dev-C++.

Program využívá knihovny jazyka C++ *iostream*, *string*, *fstream*, *stdio.h*, *stdlib.h*, *sstream*, *cstring* a *dirent.h*. Pro operace s maticemi je použita maticová knihovna *matvec*, viz [9].

Program *georeferencovani* je konzolová aplikace, která očekává zadání několika vstupních argumentů. Jsou jimi:

- transformační metoda (zatím pouze afinní tr.) [**afi**]
- použité podmínky návaznosti (žádné, vodorovné, svislé, všechny) [**zdn**, **vdr**, **svs**, **vse**]
- název textového souboru s rozložením listů, např. *rozlozeni.txt*
- relativní cesta k souborům s IB
- relativní cesta k souborům s pixelovými souřadnicemi rohů listů

Příkaz pro spuštění může tedy vypadat následovně:

```
georeferencovani afi vse rozlozeni.txt IB ROHY
```

Po spuštění programu proběhne test, zda jsou zadány všechny potřebné argumenty a zda mají správný tvar. Poté se na základě načteného textového souboru

vytvoří matice s rozložením mapových listů. Dále program zjistí, které textové soubory IB a pixelových souřadnic rohů jsou k dispozici a otestuje, zda nechybí některý potřebný soubor. V dalším průběhu jsou soubory načítány a postupně se vytvoří matice plánu **A**, vektor měření **l** a matice podmínek **B**. Podmínky se vytváří tak, jak je popsáno v předchozí kapitole. Následuje výpočet vyrovnaných koeficientů transformace a tvorba výstupů, které zahrnují:

- textové soubory tr. koeficientů jednotlivých listů, např. *c239_koeficienty.txt*
- textové soubory výsledných souřadnic IB jednotlivých listů, např. *c239_IB.txt*
- textový soubor *rohy_krovak.txt*, který obsahuje souřadnice rohů listů v S-JTSK

V programu nejsou ošetřeny výjimky, kdy např. vstupní soubory nemají požadované formátování nebo neobsahují potřebná data. Ošetření všech takových výjimek přesahuje rozsah práce, ve které je tvorba výpočetního programu pouze dílčí částí. Předpokládá se, že uživatel je obeznámen s problematikou a bude postupovat dle vypracovaného návodu (v příloze A.1).

Spustitelný program a zdrojový kód jsou součástí přílohy B.2.

7.6 Georeferencování mapových listů, maskování mimorámových údajů

Výsledné georeferencování mapových listů bylo provedeno v softwaru ArcGIS. Soubory s přetransformovanými IB máme k dispozici jako výstup z programu *georeferencovani*. Jednotlivé rastry se tedy georeferencují pomocí těchto IB, rezidua na všech IB jsou nulová. Rastry se zatím ale překrývají, kromě mapové kresby totiž obsahují mimorámové údaje a okraje.

Maskování rastrů

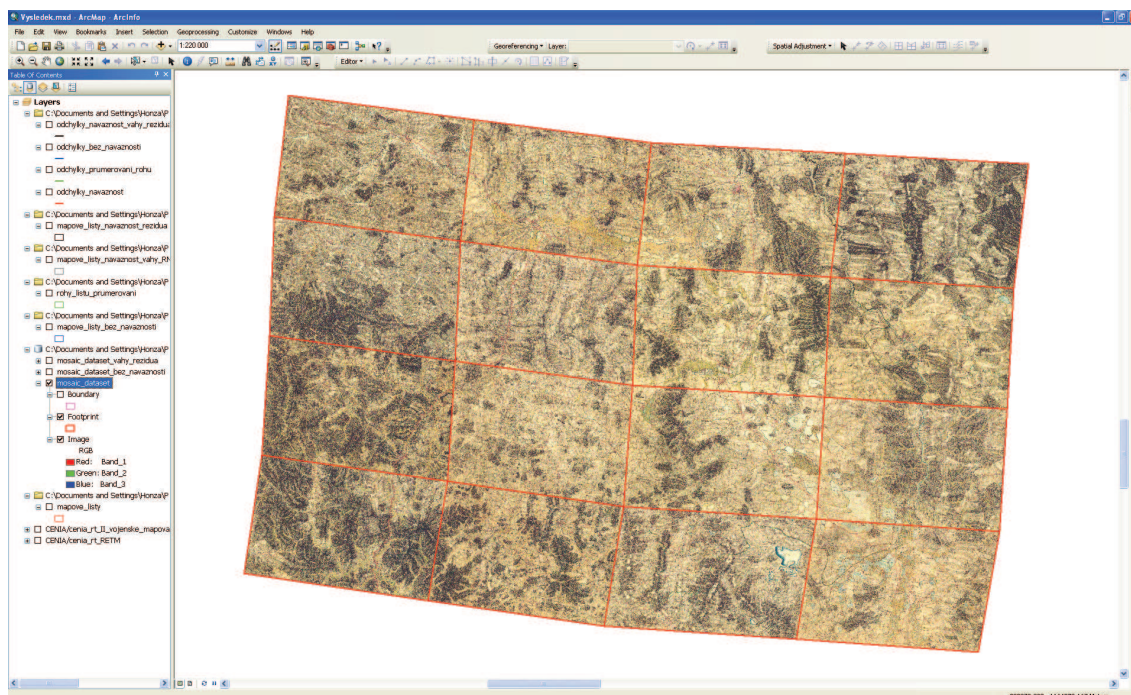
Aby bylo možné provést maskování rastrů, je jedním z výstupů aplikace *georeferencovani* textový soubor se souřadnicemi rohů georeferencovaných mapových listů



Obr. 7.9: Mapový list georeferencovaný podle transformovaných IB

v S-JTSK. Ten byl načten do ArcGISu a rohy zobrazeny volbou *Display XY Data*. Potom je možné provést export dat do shapefilu, čímž nám vzniknou bodová data ve formátu vhodném pro ArcGIS. Následně byla bodová data převedena na polygony, které představují plochy jednotlivých mapových listů (pouze mapová kresba). Každý polygon má atribut s číslem příslušného listu.

Aby bylo možné všechny rastry vymaskovat hromadně, bylo nutné vytvořit souborovou geodatabázi v ArcGIS a v ní prázdný tzv. *Mosaic Dataset*. Do tohoto datasetu se přidávají georeferencované rastry. Nyní stačí již pouze provést aktualizaci tzv. *Footprints* – polygonové vrstvy představující hranice rastrových dat. K tomu účelu je použita naše polygonová vrstva představující jednotlivé navazující mapové listy. Výsledkem jsou svými rohy (a díky tomu i hranami, až na drobné deformace) přesně navazující mapové kresby jednotlivých listů, tak jak ukazuje obrázek 7.10. Navazující mapová kresba je součástí přílohy B.1.

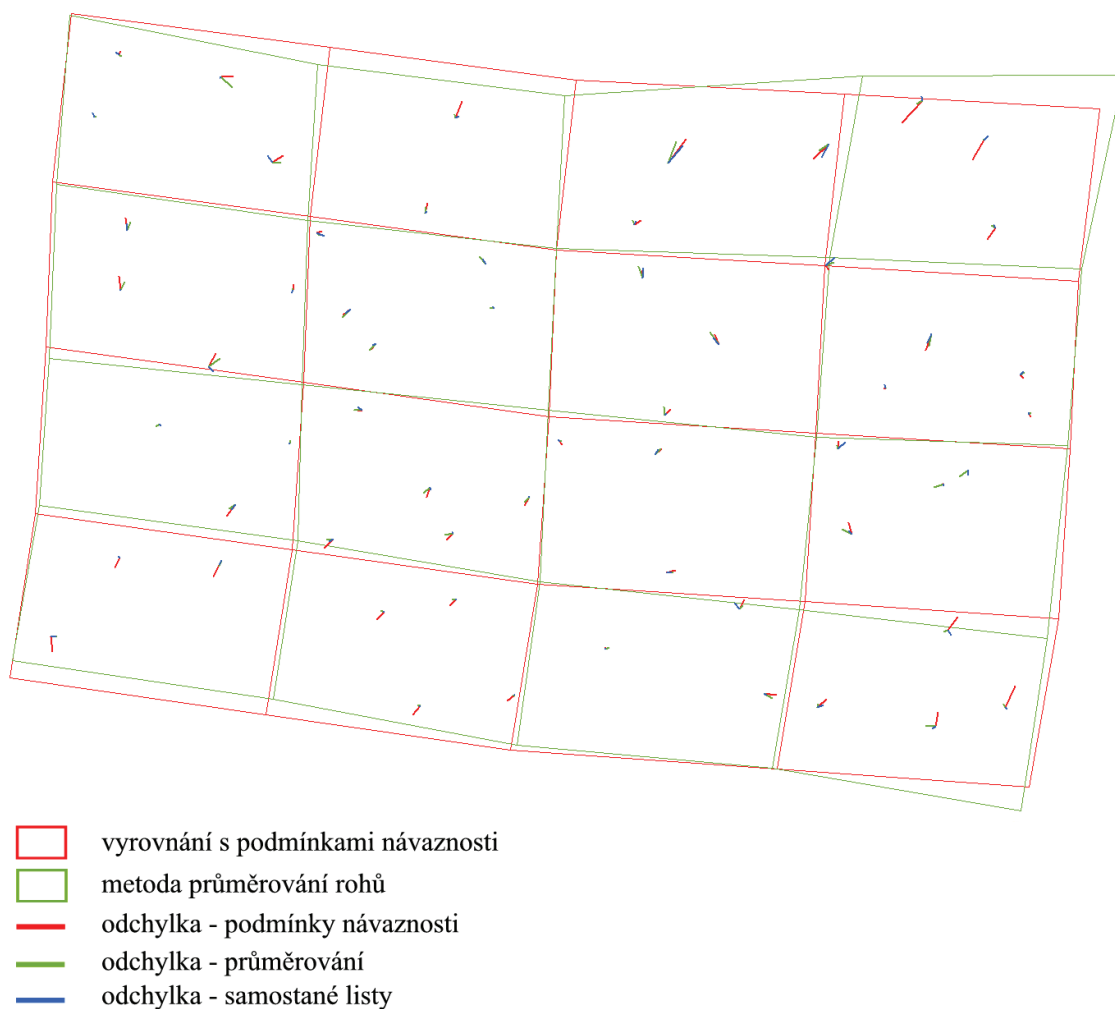


Obr. 7.10: Výsledné zamaskované mapové listy v ArcGIS

7.7 Porovnání s metodou průměrování souřadnic rohů

Pro porovnání, která z metod je ve výsledku přesnější, bylo v rámci všech testovacích mapových listů vybráno 58 bodů, které odpovídají IB (kostelům). Na těchto bodech byly zjištěny velikosti odchylek mezi skutečnou polohou a obrazem bodu. Odchylna byla odečtena pro samostatně transformované listy, pro listy spojené metodou průměrování souřadnic rohů a pro listy spojené vyrovnaním s podmínkami návaznosti. Ve všech případech byla použita afinní transformace.

Průměry souřadnic rohů listů pro zobrazení v ArcGIS byly vypočteny v Matlabu. Opět byla vytvořena polygonová vrstva představující mapové rámy navazujících listů. Transformaci rastrů je nyní potřeba provést pomocí projektivní transformace na rohy mapového rámu. Zde narážíme na problém, protože ArcGIS zatím nepodporuje projektivní transformaci rastrů, ale pouze vektorových dat (modul *Spatial Adjustment*). Z jednotlivých listů byly tedy vytvořeny velmi jednoduché bodové shapefiley, které obsahují rohy mapového rámu a vybrané body zájmu. Potom byla provedena projektivní transformace na rohy mapového rámu a odečteny odchylky

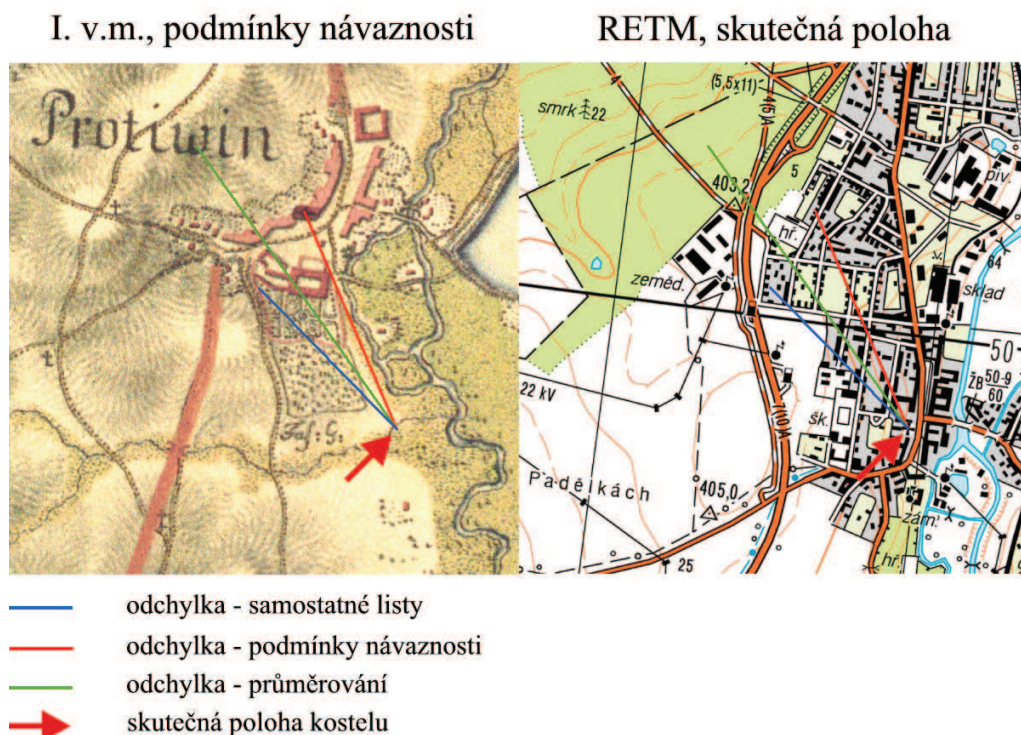


Obr. 7.11: Odchyly od skutečných poloh bodů

bodů od skutečné polohy (WMS, viz kapitola 2.2).

Přibližně ve 2/3 případů jsou odchylky dle očekávání nejmenší pro samostatně georeferencované listy. Je vidět, že pro vnitřní listy jsou odchylky obou metod srovnatelné. V případě krajních listů jsou odchylky menší při použití metody průměrování. To je dáno skutečností, že průměry vznikají z méně listů, hlavně rohové listy si více zachovávají tvar a polohu danou transformací samostatných listů.

Hodnoty odchylek jsou v příloze A.3.1.



Obr. 7.12: Ukázka odchylky od skutečné polohy bodu

7.8 Zavedení vah do výpočtu vyrovnání

Na závěr bylo provedeno několik pokusů zavést do výpočtu vyrovnání váhy. Pro tyto účely byl upraven výpočetní program pro Matlab. Váhy se zavedou do výpočtu vyrovnání takto:

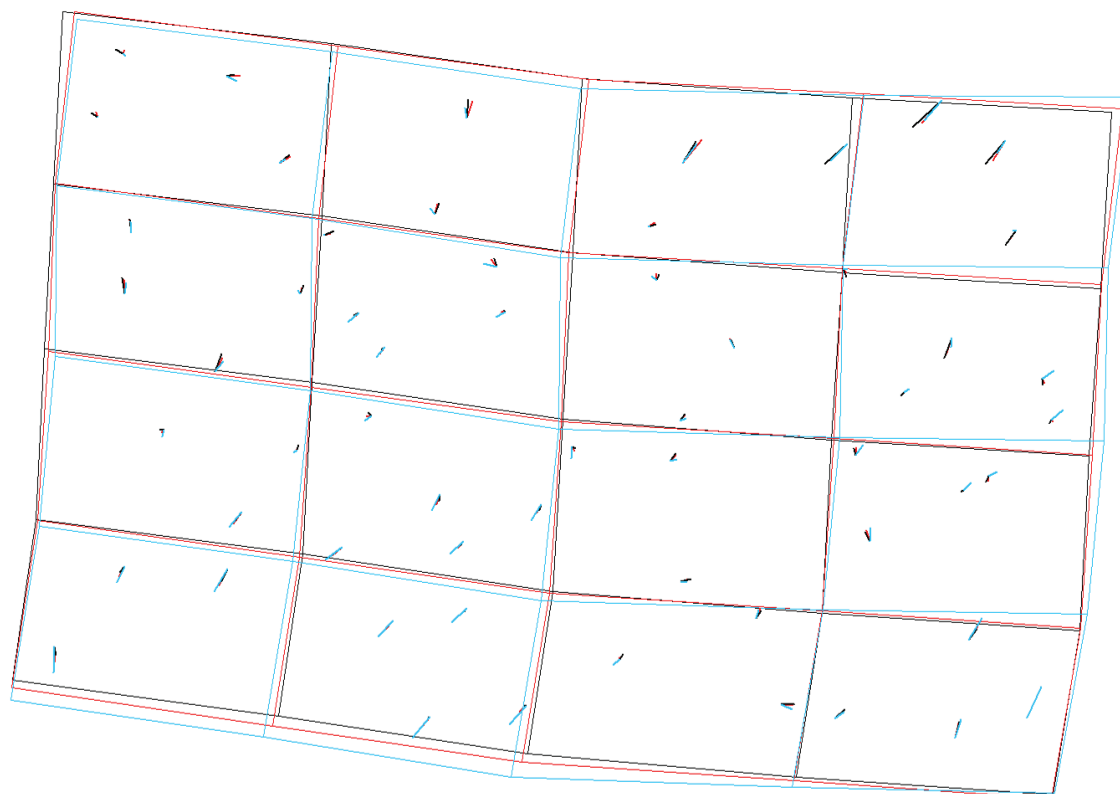
$$\begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}' \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

kde $\mathbf{P}$ je diagonální matice vah jednotlivých měření.

Nejprve byly jako váhy jednotlivých IB byly zvoleny převrácené hodnoty reziduí jednotlivých IB po transformaci samostatných listů (získané při sběru IB). Záměr byl upřednostnit pro výpočet transformačních koeficientů ty IB, které mají nejlepší přesnost. Poté bylo pro 58 bodů uvedených v kapitole 7.7 provedeno porovnání odchylek obrazů bodů od jejich skutečných poloh. Odchylky výpočtu s vahami se porovnávaly s řešením bez vah, viz příloha A.3.2. U více než poloviny odchylek (32) ale došlo k jejich zhoršení. Průměrná hodnota zhoršení je 186 m, průměrné zlepšení

odchylek je 245 *m*.

Jako druhá varianta bylo vyzkoušeno řešení, kdy se použijí přímo hodnoty reziduí. Tak by se při výpočtu vyrovnání upřednostnily IB s většími odchylkami. Listy by se tedy na těchto IB měly více přiblížit skutečnosti, za cenu celkového zhoršení přesnosti. Výsledkem bylo výrazné zhoršení odchylek u více než poloviny bodů (opět 32). Průměrná hodnota zhoršení je 513 *m*, průměrné zlepšení odchylek je 257 *m*.



- vyrovnání s podmínkami návaznosti, bez vah
- vyrovnání s podmínkami návaznosti, váhy jsou převrácené hodnoty reziduí
- vyrovnání s podmínkami návaznosti, váhy jsou hodnoty reziduí
- odchylka - podmínky návaznosti bez vah
- odchylka - podmínky návaznosti, váhy převrácené hodnoty reziduí
- odchylka - podmínky návaznosti, váhy hodnoty reziduí

Obr. 7.13: Odchylky od skutečných poloh bodů při použití vah IB

Výsledné odchylky prvního výpočtu s vahami byly porovnány s odchylkami metody průměrování souřadnic rohů. Byl zaznamenán drobný nárůst počtu bodů, na kterých jsou odchylky metody s podmínkami návaznosti a s vahami lepší oproti

podmínkám návaznosti bez vah. Průměrná hodnota lepších odchylek je ale nižší a průměr horších odchylek vyšší, viz příloha A.3.3.

Hlavní nevýhoda je v obou případech bohužel to, že ArcGIS neumožňuje uložení IB společně s jejich odchylkami. Nejdou dokonce z výpisu IB v ArcGIS ani zkopírovat. Pro tyto testovací účely bylo tedy nutné všechny odchylky opsat. Takové řešení je ale v praxi nemyslitelné, protože jen na 16 testovacích mapových listech je cca 430 IB. Proto nebyly váhy zaváděny do finálního programu *georeferencovani*.

8 Výsledky

Soubory IB pro jednotlivé listy

Pro každý z 16 testovacích mapových listů vznikl soubor IB (viz příloha B.2), které jsou reprezentovány kostely, kaplemi, statky, kříži, křižovatkami a mlýny. Ke každému listu vznikl také soubor pixelových souřadnic rohů mapového rámu (viz příloha B.2). Ty byly následně používány při dalším zpracování.

Ověření funkčnosti transformace s podmínkami návaznosti hran listů

Na podkladě teoretického návodu [1] byl nejprve v matematickém softwaru Matlab napsán program, který počítá transformační koeficienty transformace s podmínkami návaznosti mapových listů. Bylo zjištěno, že z řešených transformačních metod lze použít afinní transformaci, pro kterou je možné bezproblémově aplikovat navrhovaný postup. Výstupem skriptů v Matlabu (příloha B.2) jsou grafická znázornění polohy georeferencovaných listů.

Pro vyzkoušený a odladěný postup byla napsána konzolová aplikace *georeferencovani* v C++, jejímž výstupem jsou soubory transformačních koeficientů, dále soubory přetransformovaných IB, které se použijí při georeferencování obrazů listů v ArcGISu a pro maskování rastrů potřebný soubor s rohy mapových rámu. Aplikace a její zdrojový kód je součástí přílohy B.2.

Grafické znázornění výsledků

Na základě výstupů z aplikace *georeferencovani* byly v softwaru ArcGIS georeferencovány všechny testovací mapové listy. Dále byly zamaskovány mimorámové údaje, čímž vznikla požadovaná spojitá mapová kresba (viz příloha B.1).

Porovnání s metodou průměrování souřadnic rohů listů

Výsledky řešené metody byly porovnány s metodou průměrování souřadnic rohů listů, aby bylo možné posoudit, která z metod je pro daný účel lepší. Na základě výsledků porovnání (viz příloha A.3.1) lze říci, že řešená metoda dává srovnatelné výsledky pro vnitřní listy.

9 Zhodnocení

Hlavním výsledkem práce je bezesporu úspěšné ověření funkčnosti navrhované metody na georeferencování mapových listů I. vojenského mapování s podmínkami návaznosti listů. Pro ověření a odladěný výpočet byla v programovacím jazyce C++ napsána aplikace *georeferencovani*, která zajistí výpočet koeficientů transformace všech řešených listů. Její výstupy jsou přizpůsobeny pro co nejjednodušší další zpracování.

Máme-li hodnotit přesnost řešené metody v porovnání s metodou průměrování souřadnic rohů, je nutné říci, že metoda průměrování rohů zajišťuje lepší celkovou shodu výsledných georeferencovaných listů se skutečností. To především v případě krajních listů. V případě vnitřních listů rozložení jsou výsledky obou metod plně srovnatelné. Aby bylo možné výsledky potvrdit, bylo by nutné zpracovat více navazujících listů. Tady ovšem narážíme na velkou časovou náročnost sběru IB, který pro jeden list zabere i několik hodin.

Řešená metoda má ovšem oproti průměrování rohů podstatnou výhodu v tom, že nevyžaduje projektivní transformaci. Také tvary mapových listů jsou v případě průměrování více zkreslené a navíc nezachovávají rovnoběžnost hran mapového rámu.

Pokus použít váhy pro jednotlivé IB dle jejich přesnosti přinesl jen velmi drobné a nepříliš prokazatelné zlepšení shody obrazů listů se skutečností. Váhy tedy nebyly ve finálním řešení uvažovány, a to hlavně vzhledem k nemožnosti získat hodnoty reziduí jinak než jejich opsáním.

Příjemné překvapení přinesla prohlídka navazujících hran po zobrazení transformovaných listů. Přes hlavní nedostatek mapování, absenci geometrického základu, navazují významnější prvky mapové kresby velmi slušně. Odchyly zde samozřejmě jsou, očekávaly se však podstatně větší.

Závěr

V závěru bych chtěl vyzdvihnout především skutečnost, že hlavní cíl práce, ověření funkčnosti metody georeferencování map I. vojenského mapování navržený Ing. Cajthamlem, se podařil. Stejně tak byly úspěšně splněny i doplňující úkoly, jako například tvorba programu pro řešení uvedené transformace.

Metoda si jistě zasluhuje pozornost, neboť dosavadní výsledky vypadají velmi slibně. Ty by bylo dobré ověřit nejlépe zpracováním většího množství mapových listů. To je ale pro jednoho člověka velmi zdlouhavá práce. Je ovšem možné bez problému navázat na mé výsledky a rozšířit tak řešenou oblast. Vhodná by také mohla být rekonstrukce obrazů mapových listů na ideální tvar mapového rámu před samotným zpracováním, nebo zavedení vah IB do výpočtu.

Při práci jsem využil jak znalosti práce v GIS, tak také programátorské dovednosti, získané během studia. Při řešení daného úkolu se nevyskytl žádný problém, který by zásadním způsobem ovlivnil výsledek a mohu tak říct, že jsem s výsledky spokojen.

Použité zdroje

- [1] CAJTHAML, J. *Analýza starých map v digitálním prostředí na příkladu Mülle-rových map*. Dosud nevydáno, předpokládané datum vydání 2012. [s.l.] : [s.n.].
- [2] Oldmaps – Staré mapy *I. vojenské mapování – josefské* [online]. [cit. 2011–12–06].
Dostupné z URL: <http://oldmaps.geolab.cz/map_root.pl?z_height=800&lang=cs&z_width=1000&z_newwin=1&map_root=1vm>.
- [3] Sekce I. vojenského mapování
© 1st Military Survey, Section No. 220, 221, 222, 223, 230, 231, 232, 233, 239, 240, 241, 242, 247, 248, 249, 250, Austrian State Archive/Military Archive, Vienna
© Laboratoř geoinformatiky Univerzita J.E. Purkyně - <http://www.geolab.cz>
© Ministerstvo životního prostředí ČR - <http://www.env.cz>
- [4] Národní geoportál INSPIRE *Prohlížečské služby* [online]. [cit. 2011–12–06].
Dostupné z URL: <<http://geoportal.gov.cz/web/guest/wms/>>.
- [5] MathWorks *MATLAB – The Language Of Technical Computing* [online]. [cit. 2011–12–06].
Dostupné z URL: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>.
- [6] Esri *ArcGIS* [online]. [cit. 2011–12–06].
Dostupné z URL: <<http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis10/index.html>>.
- [7] qt.nokia.com *Qt – Cross-platform application and UI framework* [online]. [cit. 2011–12–06].
Dostupné z URL: <<http://qt.nokia.com/>>.
- [8] Bloodshed Software *Dev-C++* [online]. [cit. 2011–12–06].
Dostupné z URL: <<http://www.bloodshed.net/devcpp.html>>.

[9] GeoWikiCZ *Matvec* [online]. [cit. 2011–12–06].

Stránka byla naposledy editována 13. 11. 2007 v 17:22.

Dostupné z URL: <<http://geo.fsv.cvut.cz/gwiki/Matvec>>.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

IB identický bod

WMS Web Map Service - webová mapová služba

MNČ metoda nejmenších čtverců

GIS geografický informační systém

LH levý horní roh

PH pravý horní roh

PD pravý dolní roh

LD levý dolní roh

Seznam příloh

A	Tištěné přílohy	57
A.1	Návod pro zpracování	57
A.2	Počty IB	61
A.3	Odchyly	62
A.3.1	Porovnání odchylek s metodou průměrování	62
A.3.2	Porovnání odchylek při výpočtu bez vah a s vahami	64
A.3.3	Porovnání odchylek výpočtu s vahami a průměrování	66
A.4	Grafická znázornění výsledků různých transformačních metod	68
B	Přílohy na DVD	70
B.1	Netištěné přílohy	70
B.2	Datové přílohy	70

A Tištěné přílohy

A.1 Návod pro zpracování

Následující návod popisuje, jakým způsobem je ideální postupovat, chceme-li provést georeferencování I. vojenského mapování metodou vyrovnání s podmínkami návaznosti mapových listů. Slouží tak jako návod pro zpracovatele, kteří chtějí rozšířit již georeferencovanou testovací část území, nebo chtějí georeferencovat území jejich zájmu.

Návod je psán pro ArcGIS verze 10.0, proto se v jiných verzích mohou některé popsané metody lišit. Vyloučena není ani možnost použití jiného GIS softwaru. Důležité je, abychom získali soubory IB ve formátu popsaném dále.

Postup zpracování lze rozdělit do několika základních kroků:

- sběr IB v softwaru ArcGIS
- spuštění programu pro výpočet georeferencování s podmínkami návaznosti mapových listů
- transformace mapových listů dle výsledků výpočtu v ArcGIS
- zamaskování mimorámových údajů georeferencovaných listů v ArcGIS

Začátek práce v softwaru ArcGIS

Jako první krok je třeba zvolit souřadnicový systém, ve kterém budeme pracovat. To bude S-JTSK, v ArcGIS označovaný jako *S-JTSK_Krovak_East_North*. Výběr provedeme po otevření *Data Frame Properties*, záložka *Coordinate System*.

Dále je nutné připojit mapové podklady, ze kterých budeme odečítat souřadnice IB. K tomu je možné použít SOAP služby ArcGIS Serveru. V diplomové práci byly použity služby Národního geoportálu INSPIRE–CENIA, konkrétně RETM (rastrové ekvivalenty topografických map) a II. vojenské mapování. Připojení provedeme následujícím způsobem: zvolíme *Add Data*, zde vybereme *GIS Servers* a vybereme *Add ArcGIS Server*, zadáme adresu služeb `<http://geoportal.gov.cz/arcgis/services>`. Potom vybereme požadovanou službu.

Nakonec musíme otevřít rastry jednotlivých mapových listů (*Add Data*). To je vhodné dělat postupně, vždy otevřít jeden rastr a teprve po jeho zpracování další. Při přidávání rastru se nás ArcGIS zeptá, zda chceme vytvořit pro daný rastr pyramidy (*Create Pyramids for ...*). To chceme, značně se zrychlí následné prohlížení rastru (jsou vytvořeny výřezy pro různá zvětšení). Následuje sběr IB.

Způsob sběru IB

V prostředí softwaru ArcGIS probíhá sběr IB po spuštění modulu *Georeferencing*. Zde je nutné vybrat příslušný rastr a zvolit nástroj *Add Control Points*. Poloha IB se označí nejprve v transformovaném rastru a poté ve skutečnosti (mapovém podkladu). Seznam již vytvořených IB lze zobrazit volbou *View Link Table*.

Uložení souboru IB

Máme-li sebrány IB (rovnoměrně rozložené po celé ploše listu, co největší množství, alespoň 20), uložení souboru provedeme v okně se seznamem IB (*Link Table*). Soubor je třeba pojmenovat ve formátu, který očekává program pro výpočet transformace. Požadovaný tvar je následující:

`c239_ib.txt`

kde *c* značí klad pro Čechy, *239* je číslo listu. Výsledný soubor má IB uloženy v řádcích, sloupce jsou postupně: x_{pix} y_{pix} x_{map} y_{map} .

Obrazové souřadnice rohů mapového rámu

Pro podmínky návaznosti mapových listů potřebujeme znát pixelové souřadnice rohů mapového rámu. Ty odečteme stejným způsobem jako při sběru IB, na mapových souřadnicích nezáleží, z uloženého souboru rohů je vymažeme. Pořadí sběru je LH, PH, PD a LD roh. Soubor uložíme stejným způsobem jako IB, ve tvaru:

`c239_rohy.txt`

Výsledný soubor má rohy uloženy v řádcích, sloupce jsou postupně: x_{pix} y_{pix} .

Výpočet transformačních parametrů – program *georeferencovani*

Všechny soubory IB máme připravené v jediném adresáři, např. *IB*. Stejně tak soubory rohů, např. v adresáři *rohy*. Dále si musíme připravit textový soubor s rozložením mapových listů, např. *rozlozeni.txt*, ve tvaru:

```
220 221 222 223
```

```
230 231 232 233
```

```
239 240 241 0
```

0 doplníme místo čísla listu v případě, že daný list chybí nebo ho nechceme do řešení zahrnout. Rozložení listů musí ale vždy tvořit úplnou matici (chybí-li listy na rohu, doplníme potřebné množství 0).

Program *georeferencovani* vyžaduje několik argumentů při spuštění. Jsou to:

- transformační metoda (zatím pouze afinní tr.) [**afi**]
- použité podmínky návaznosti (žádné, vodorovné, svislé, všechny) [**zdn**, **vdr**, **svs**, **vse**]
- název textového souboru s rozložením listů, např. *rozlozeni.txt*
- relativní cesta k souborům s IB
- relativní cesta k souborům s pixelovými souřadnicemi rohů listů

Příkaz pro spuštění může tedy vypadat následovně:

```
georeferencovani afi vse rozlozeni.txt IB ROHY
```

Výstupem jsou textové soubory transformačních koeficientů pro každý list (adresář *TRANSFORMACNI_KOEFICIENTY*), soubory přetransformovaných IB pro každý list (adresář *VYSLEDNE_IB*) a soubor souřadnic rohů listů v S-JTSK *rohy_krovak.txt*.

Transformace obrazů mapových listů v ArcGIS dle výsledků výpočtu

V ArcGIS otevřeme jednotlivé rastry mapových listů (*Add Data*) a provedeme **afinní transformaci** podle výsledných souborů IB. Postupujeme tak, že v modulu *Georeferencing* zvolíme rastr, který chceme georeferencovat a v okně *Link Table* pro

něj načteme odpovídající soubor IB. Vidíme, že list se na IB transformuje přesně, rezidua jsou nulová. Zvolíme *Update Georeferencing* a pokračujeme dalším listem. Ve výsledku máme všechny listy georeferencovány, zatím ale nemůžeme vidět, zda listy navazují – překrývají se jejich mimorámové údaje. Ty musíme ještě zamaskovat.

Maskování mimorámových údajů

Nejprve musíme vytvořit polygonovou vrstvu, podle které budeme rastry maskovat. K tomu slouží soubor *rohy_krovak.txt*, který nahrajeme do ArcGIS (*Add Data*) a zvolíme pro něj *Display XY Data*. Poté můžeme data exportovat do shapefile – bodového.

Dále použijeme funkci *Minimum Bounding Geometry*, vstupní vrstva je vygenerovaný bodový shapefile. Parametry funkce zvolíme *Convex Hull*, v *Group Option* vybereme „list“, v *Group Field* zvolíme také „list“. Tak získáme polygony, které představují plochy mapové kresby jednotlivých listů. Polygony mají potřebný atribut s názvem listu.

Nyní musíme vytvořit souborovou geodatabázi (*File Geodatabase*, pomocí *Catalog Window*). V ní vytvoříme prázdný *Mosaic Dataset* a přidáme do něj georeferencované rastry (*Add Rasters To Mosaic Dataset*).

Nakonec provedeme aktualizaci tzv. *Footprints* (vektorových ohraničení jednotlivých rastrů). K tomu využijeme funkci *Import Mosaic Dataset Geometry*. Vstupem je vytvořený *Mosaic Dataset*, vstupní vrstva jsou polygonové plochy mapových kreseb. Jako *Target Join Field* zvolíme pole „Name“ a jako *Input Join Field* zvolíme pole „list“.

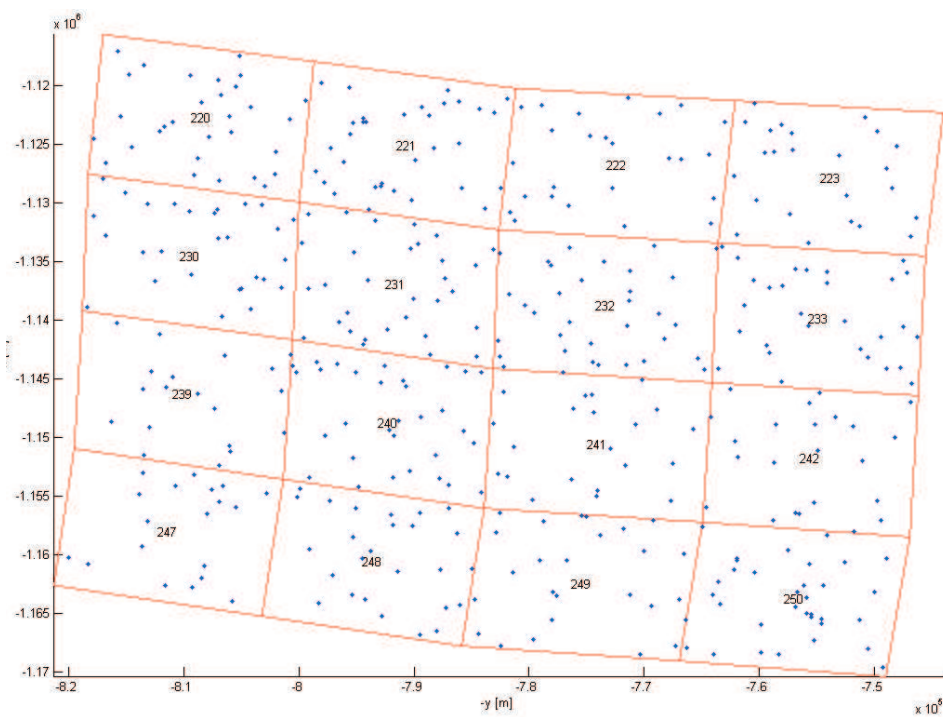
Pokud nedojde k zamaskování rastrů, musíme otevřít *Properties* našeho *Mosaic Dataset*, otevřít záložku *Defaults* a zde povolit položku *Always Clip the Image to its Footprint*.

Výsledkem je navazující mapová kresba.

A.2 Počty IB

Mapový list	Počet IB	Z toho kostelů
220	30	13
221	33	12
222	25	9
223	24	7
230	28	10
231	31	7
232	34	12
233	29	6
239	19	5
240	31	11
241	21	6
242	23	6
247	19	4
248	26	7
249	26	5
250	33	10
Celkem	432	130

Zobrazení IB



A.3 Odchyly

A.3.1 Porovnání odchylek s metodou průměrování

	Bez ná vaznosti	Podmínky ná vaznosti	Průměrování
Kostel v obci	Odchylka [m]	Odchylka [m]	Odchylka [m]
Hradešice	258,0	257,3	226,6
Horažďovice	103,3	893,0	1077,5
Radomyšl	269,1	1218,1	240,8
Strakonice	155,8	708,4	406,6
Putim	249,0	530,3	295,5
Písek	1602,7	2116,9	1616,4
Bernartice	265,1	2160,6	491,5
Rataje	401,0	1640,1	67,0
Bechyně	234,7	996,1	329,6
Vacov	465,4	1077,5	986,3
Žihobce	444,4	889,2	624,5
Volyně	236,3	562,7	655,0
Jinín	385,7	677,3	685,9
Protivín	613,7	736,6	1077,0
Heřman	651,9	509,5	831,6
Vodňany	163,0	576,0	581,6
Týn	733,5	1265,7	904,8
Albrechtice	884,7	345,4	645,6
Vimperk	450,2	1015,2	539,3
Zdíkovec	157,9	279,2	272,1
Vlachovo Březí	200,9	752,3	620,7
Husinec	139,1	647,6	608,2
Netolice	353,7	640,3	483,4
Bavorov	148,2	315,2	139,0
Purkarec	127,4	40,2	734,5
Dříteň	716,5	545,7	274,6
Korkusova huť	356,2	1299,6	455,7
Knížecí Pláně	318,5	1075,1	367,3
Nový Svět	174,0	765,5	95,3
Prachatice	50,1	644,5	259,7
Záblatí	20,7	739,4	251,4
Lhenice	87,0	137,6	278,6
Němčice	558,9	740,8	320,0
Dubné	442,8	841,3	214,1
České Budějovice	280,2	1002,3	691,4
Kladruby	589,0	884,1	585,3
Budětice	331,8	331,1	121,0

Chřešřovice	1088,9	1583,5	838,1
Strašín	88,3	975,5	629,8
Němčice	209,3	740,8	320,0
Kraselov	581,8	408,0	287,8
Nihošovice	465,7	654,8	850,0
Paračov	114,7	286,4	326,6
Temelín	223,5	118,8	99,4
Žimutice	257,8	323,3	312,5
Modrá Hůrka	125,0	174,2	155,3
Zbytiny	84,7	832,8	194,0
Chroboly	53,9	640,9	132,0
Čakov	227,0	861,9	656,8
Hosín	387,9	1135,7	320,6
Rudolfov	170,2	1668,8	241,8
Bohumilice	81,7	39,2	229,8
Malenice	358,9	322,7	606,6
Šumavské Hoštice	361,7	900,7	468,0
Strunkovice	58,2	688,5	484,6
Chelčice	393,2	605,2	583,7
Zahájí	303,7	827,0	757,2
Kostelec	349,9	318,6	802,9

odchylka je horší než při tvorbě návazností

lepší hodnota odchylky

A.3.2 Porovnání odchylek při výpočtu bez vah a s vahami

	Bez vah	S vahami
Kostel v obci	Odchylka [m]	Odchylka [m]
Hradešice	257,3	585,1
Horažďovice	893,0	477,8
Radomyšl	1218,1	1232,9
Strakonice	708,4	821,5
Putim	530,3	543,0
Písek	2116,9	1828,1
Bernartice	2160,6	2801,4
Rataje	1640,1	2160,3
Bechyně	996,1	1325,4
Vacov	1077,5	1305,4
Žihobce	889,2	933,6
Volyně	562,7	297,4
Jinín	677,3	597,8
Protivín	736,6	643,7
Heřman	509,5	452,6
Vodňany	576,0	611,6
Týn	1265,7	1483,0
Albrechtice	345,4	624,6
Vimperk	1015,2	775,1
Zdíkovec	279,2	304,9
Vlachovo Březí	752,3	494,1
Husinec	647,6	372,2
Netolice	640,3	713,9
Bavorov	315,2	272,4
Purkarec	40,2	225,1
Dříteň	545,7	480,5
Korkusova huť	1299,6	953,4
Knížecí Pláně	1075,1	619,8
Nový Svět	765,5	540,2
Prachatice	644,5	276,9
Záblatí	739,4	280,9
Lhenice	137,6	400,7
Němčice	740,8	655,5
Dubné	841,3	947,0
České Budějovice	1002,3	1115,0
Kladruby	884,1	922,9
Budětice	331,1	586,5

Chřešřovice	1583,5	2070,9
Strašín	975,5	1102,8
Němčice	380,2	655,5
Kraselov	408,0	679,7
Nihošovice	654,8	396,1
Paračov	286,4	158,4
Temelín	118,8	316,5
Žimutice	323,3	412,5
Modrá Hůrka	174,2	248,2
Zbytiny	832,8	155,0
Chroboly	640,9	127,8
Čakov	861,9	947,3
Hosín	1135,7	980,4
Rudolfov	1668,8	1691,5
Bohumilice	39,2	355,4
Malenice	322,7	318,8
Šumavské Hoštice	900,7	584,5
Strunkovice	688,5	462,3
Chelčice	605,2	652,6
Zahájí	827,0	744,2
Kostelec	318,6	449,0

 lepší hodnota odchylky

A.3.3 Porovnání odchylek výpočtu s vahami a průměrování

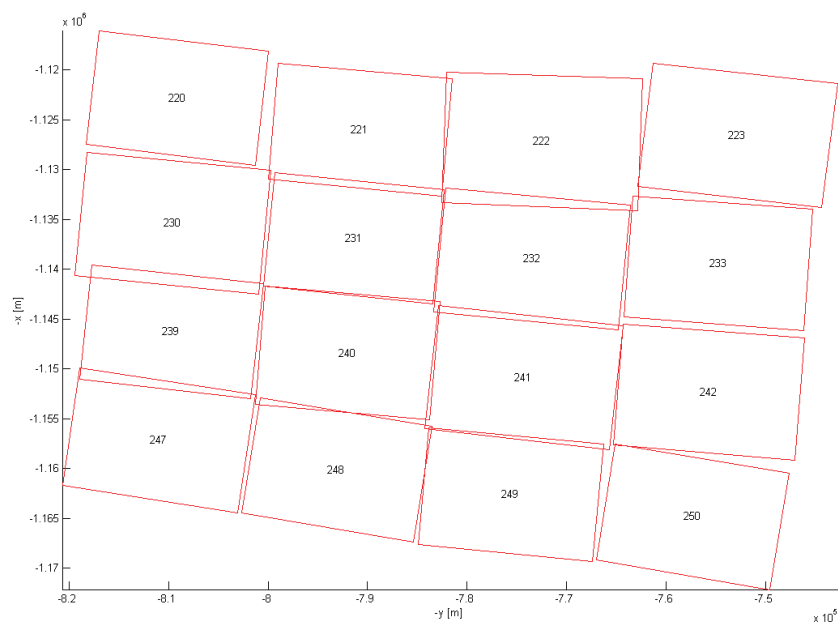
	Podmínky návaznosti, s vahami	Průměrování
Kostel v obci	Vzdálenost	Vzdálenost
Hradešice	585,1	226,6
Horaždovice	477,8	1077,5
Radomyšl	1232,9	240,8
Strakonice	821,5	406,6
Putim	543,0	295,5
Písek	1828,1	1616,4
Bernartice	2801,4	491,5
Rataje	2160,3	67,0
Bechyně	1325,4	329,6
Vacov	1305,4	986,3
Žihobce	933,6	624,5
Volyně	297,4	655,0
Jinín	597,8	685,9
Protivín	643,7	1077,0
Heřman	452,6	831,6
Vodňany	611,6	581,6
Týn	1483,0	904,8
Albrechtice	624,6	645,6
Vimperk	775,1	539,3
Zdíkovec	304,9	272,1
Vlachovo Březí	494,1	620,7
Husinec	372,2	608,2
Netolice	713,9	483,4
Bavorov	272,4	139,0
Purkarec	225,1	734,5
Dříteň	480,5	274,6
Korkusova huť	953,4	455,7
Knížecí Pláně	619,8	367,3
Nový Svět	540,2	95,3
Prachatice	276,9	259,7
Záblatí	280,9	251,4
Lhenice	400,7	278,6
Němčice	655,5	320,0
Dubné	947,0	214,1
České Budějovice	1115,0	691,4
Kladruby	922,9	585,3
Budětice	586,5	121,0

Chřešřovice	2070,9	838,1
Strašín	1102,8	629,8
Němčice	655,5	130,8
Kraselov	679,7	287,8
Nihošovice	396,1	850,0
Paračov	158,4	326,6
Temelín	316,5	99,4
Žimutice	412,5	312,5
Modrá Hůrka	248,2	155,3
Zbytiny	155,0	194,0
Chroboly	127,8	132,0
Čakov	947,3	656,8
Hosín	980,4	320,6
Rudolfov	1691,5	241,8
Bohumilice	355,4	229,8
Malenice	318,8	606,6
Šumavské Hoštice	584,5	468,0
Strunkovice	462,3	484,6
Chelčice	652,6	583,7
Zahájí	744,2	757,2
Kostelec	449,0	802,9

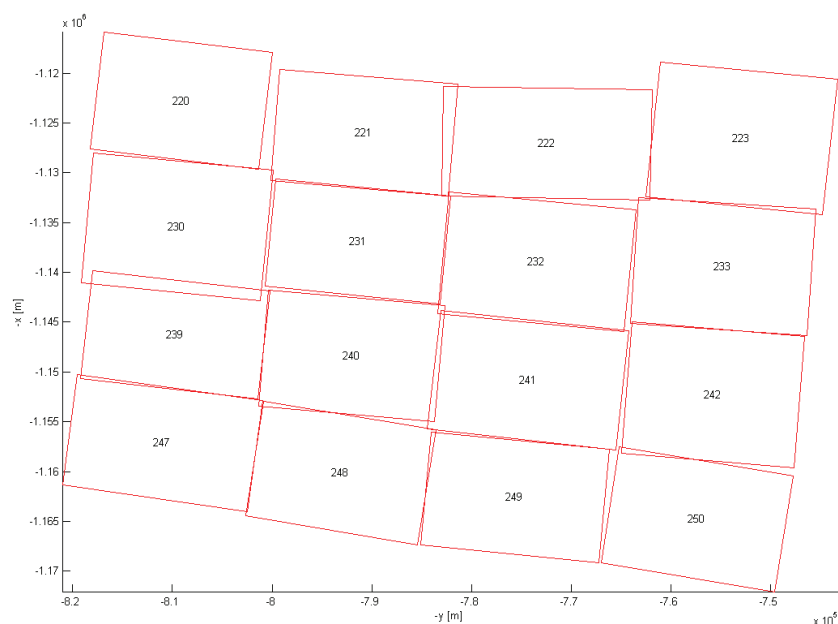
 lepší hodnota odchylky

A.4 Grafická znázornění výsledků různých transformačních metod

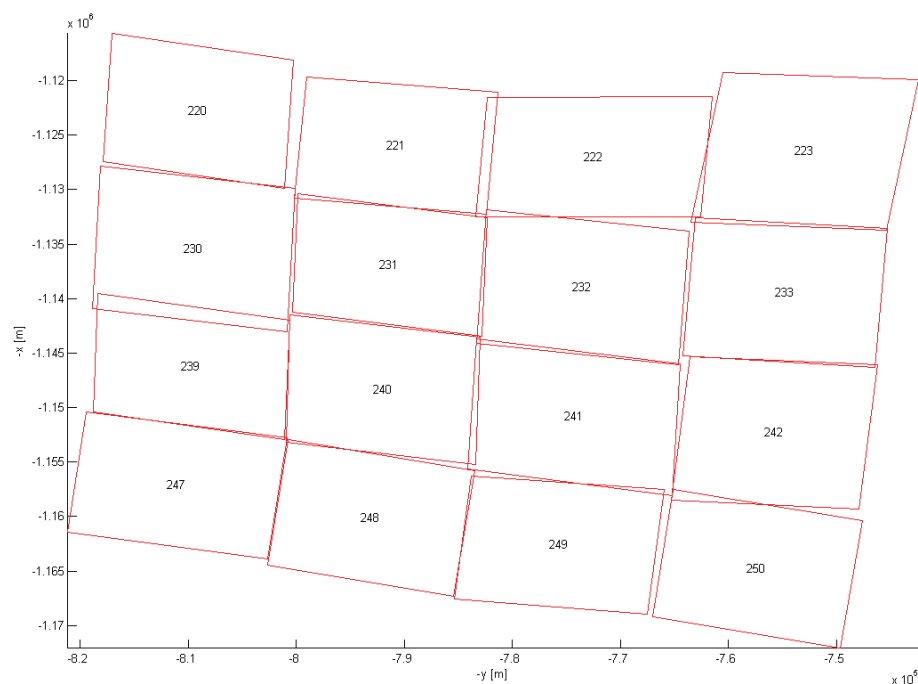
Podobnostní transformace



5-prvková afinní transformace



Afinní transformace



Porovnání transformací



B Přílohy na DVD

Následující přílohy jsou odevzdány elektronickou formou na DVD. Data jsou přehledně rozdělena do složek.

B.1 Netištěné přílohy

- hodnoty směrodatných odchylek listů při různých transformacích
- popis dat projektu v ArcGIS

B.2 Datové přílohy

- program *georeferencovani*
- soubory IB
- soubory s rohy rámců mapových listů
- soubor rozložení mapových listů
- zdrojový kód programu v C++
- zdrojové kódy pro Matlab
- projekt v ArcGIS
- porovnání odchylek vybraných bodů v MS Excel
- mapové listy I. vojenského mapování
- text práce v pdf