

**UNIVERZITA KARLOVA**

**Přírodovědecká fakulta**

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Študijný program: Geografie

Študijný odbor: Kartografie a geoinformatika



# **ANALÝZA MÁP NEBESKEJ SFÉRY**

## **ANALYSIS OF THE CELESTIAL MAP**

Diplomová práce

Juraj Považan

Vedúci diplomovej práce: doc. Ing. Tomáš Bayer

Praha 2020

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Bc. Juraj Považan**

Studijní obor: **Kartografie a geoinformatika**

Garant studijního programu/oboru vám schválil přidělení této diplomové práce:

Název práce:

### **Analýza map nebeskej sféry**

#### **Předběžná náplň práce**

Cílem diplomové práce bude návrh metodického postupu pro analýzu starých map nebeské sféry s cílem stanovení úplnosti a přesnosti zákresu nebeských těles (kartometrická/semiotická analýza).

Praktické ověření metodiky bude provedeno na vybraných mapách nebeské sféry z fondu Mapové sbírky PŘF UK. Výsledky budou vizualizovány prostřednictvím vhodných metod tematické kartografie.

Navržená metodika by měla komplexně pokrýt problematiku analýzy map nebeské sféry, zejména eliminovat vliv kartografického zobrazení analyzované mapy, zohlednit důsledky některých astronomických jevů (např. precese) na polohu nebeských těles, s cílem umožnit identifikaci jednotlivých hvězd/souhvězdí a určit přesnost jejich zákresu v mapě.

Sběr identických bodů (tj. jednotlivých hvězd) by měl proběhnout (semi) automatizovaně, a to s využitím metody obrazové korelace.

Jednotlivé kroky analýzy budou implementovány ve formě skriptů ve vybraném programovacím jazyce (Python, Matlab script, ...), vizualizace výsledků proběhne v některém z vhodných SW (Matlab, ArcGIS).

Součástí bude rešerše zaměřená na problematiku analýz starých map nebeské sféry.

**Rozsah průvodní zprávy:** 40–60 stran.

**Rozsah grafických prací:** 5–10 stran.

**Seznam odborné literatury:**

THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. 2006. *Pattern recognition*. 3. vyd. San Diego: Academic Press, 2006. 837 s. ISBN 978-0-12-369531-4

WOODWARD, D. a spol. 2007. *The History of Cartography. Cartography in the European Renaissance*. 3. vyd. Chicago: University of Chicago Press, 2007. 2272 s. ISBN 9780226907321

KABELÁČ, J.; KOSTELECKÝ, J. 2009. *Geodetická astronomie 10*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2009. 251 s. ISBN 978-80-01-04322-6

LEWIS, J. P. 2001. *Fast Normalized Cross-Correlation*. Industrial Light & Magic, 10

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Bayer. Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: 13. prosince 2017

Termín odevzdání diplomové práce: dle harmonogramu příslušného akademického roku

V Praze dne 13. prosince 2017

.....  
Garant studijního programu/oboru

.....  
Vedoucí práce

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 31.07.2017

.....

Juraj Považan

## **PodĎakovanie**

Rád by som sa týmto poĎakoval môjmu školiteľovi docentovi Ing. Tomášovi Bayerovi, Ph.D. za odborné a precízne vedenie mojej bakalárskej práce, cenné rady a odporúčania. Ďakujem taktiež pánu Ing. Cyrilovi Ronovi z Astronomického ústavu AV ČR za pomoc pri orientovaní v oblasti astronomických veličín a zákonitostí, Bc. Igorovi Erziakovi za technickú výpomoc a predovšetkým pánu docentovi RNDr. Stanislavovi Danišovi, Ph.D. z Matematicko-fyzikální fakulty UK za neoceniteľnú výpomoc pri spracovávaní skriptov, mimoriadnu trpezlivosť a ochotu pri konzultovaní ako aj pripomienky, ktoré pomohli zlepšiť výsledky. Ďalej Ďakujem pracovníkom Mapové sbírky Univerzity Karlovy, hlavne PhDr. et Mgr. Eve Novotnej a Ing. Markéte Hyndrákovej za všestrannú pomoc pri hľadaní mapových podkladov a za ich poskytnutie.

# **Analýza máp nebeskej sféry**

## **Abstrakt**

Diplomová práca sa zaoberá kartometrickou analýzou máp nebeskej sféry s využitím obrazovej korelácie. Hlavným cieľom práce bolo navrhnúť algoritmus na identifikáciu hviezd na starých mapách hviezdnej oblohy pomocou normalizovanej krížovej korelácie a aplikácie mediánového a gaussovho filtra. Samotná analýza prebieha na mapách malých mierok resp. celej viditeľnej oblohy rozdelenej na dve hemisféry, znázornené v stereografickej projekcii a berie do úvahy aj vplyv kartografického zobrazenia mapy na polohu objektov, ktorý sa snaží eliminovať pomocou Helmertovej transformácie a taktiež vplyv precesie, ktorá ovplyvňuje polohu astronomických objektov v čase. Zhodnotenie presnosti zákresu polôh objektov prebieha pomocou izočiar vykreslených na základe polohových súradníc. Algoritmus bol implementovaný v programovacom prostredí Matlab a ako testovacie dáta boli použité staré mapy z Mapové sbírky PŘF a 5. vydanie Bright Star Catalogue, ktorý obsahuje polohy hviezd s presne určenými súradnicami. Dosiahnuté výsledky sú prezentované formou obrázkov zachytených objektov a vytvorených izolínií nad starými mapami a tiež tabuľkami troch najbližších susedov najvýznamnejších zakreslených hviezd.

**Kľúčové slová:** krížová korelácia, mediánový filter, gaussov filter, stereografická projekcia, precesia

## **Analysis of the spheric map**

### **Abstract**

The master thesis deals with cartometric analysis of maps of the celestial sphere using image correlation. The main goal of this work was to design an algorithm for the identification of stars on old maps of the starry sky using a normalized cross-correlation and the application of a median and Gaussian filter. The analysis itself takes place on small scale maps or the whole visible sky divided into two hemispheres, shown in a stereographic projection and also takes into account the influence of the cartographic map display on the position of objects, which it tries to eliminate by Helmert transformation, and also the influence of precession, which affects the position of astronomical objects over time. The accuracy of the drawing of the positions of the objects is evaluated by means of isolines drawn on the basis of positional coordinates. The algorithm was implemented in the Matlab programming environment and old maps from the Mapová sbírka PŘF and the 5th edition of Bright Star Catalogue were used as test data, which contains the positions of stars with precisely determined coordinates. The achieved results are presented in the form of images of captured objects and created isolines over old maps as well as tables of the three nearest neighbors of the most important drawn stars.

**Keywords:** cross correlation, median filter, Gaussian filter, stereographic projection, precession

# Obsah

Zoznam použitých skratiek .....	11
Zoznam Obrázkov .....	12
Zoznam Tabuliek .....	16
1. Úvod.....	17
1. 1. Ciele práce .....	18
2. Rešerš súčasného stavu .....	19
2.1 Zdroje podkladových dát .....	19
2.2 Analýza máp nebeskej sféry .....	20
2.3 Automatizovaná detekcia pixelových súradníc .....	23
2.3.1 Subpixelová korelácia .....	25
2.3.2 Postprocessing rastra .....	28
3. Znázornenie nebeskej sféry.....	31
3.1 Hviezdne glóbusy .....	31
3.2 Hviezdne mapy .....	33
3.3 Kartografické znaky máp.....	41
3.3.1 Znakový kľúč .....	41
3.3.2 Matematicko konštrukčné prvky .....	42
3.3.3 Popis mapy .....	43
3.3.4 Kompozičné prvky mapy .....	43
4. Analýza hviezdnych máp .....	44
4.1 Zdrojové dáta .....	44
4.2 Metodika analýz máp hviezdnej oblohy .....	48
4.2.1 Analýza kartografického zobrazenia .....	49
4.2.2 Automatická detekcia hviezd .....	52
4.2.3 Transformácia pixelových súradníc na rovníkové.....	66
4.2.3.2 Transformácia ekliptikálnych súradníc na rovníkové .....	69
4.2.4 Zmena astronomických súradníc .....	71
4.2.4.5 Identifikácia hviezd .....	78



4.4.2.6 Hodnotenie presnosti a vykreslenie izolínií .....	78
5. Implementácia metód pre analýzu máp nebeskej sféry .....	80
5.1 Detekcia hviezd s využitím obrazovej korelácie .....	81
5.2 Transformácia súradníc.....	83
5.3 Zohľadnenie vplyvu precesie.....	84
5.4 Vykreslenie izolínií so započítaním vplyvu precesie.....	85
5.5 Poloautomatizovaná identifikácia vybraných hviezd .....	86
5.6 Vykreslenie izolínií bez započítania vplyvu precesie .....	88
6. Dosaiahnuté výsledky .....	89
6.1 Planisfero del globo celeste .....	89
6.1.1 Automatická detekcia hviezd .....	90
6.1.2 Analýza presnosti mapy s využitím izočiar.....	94
6.1.3 Analýza polohovej presnosti mapy s využitím polohových odchýlok vybraných hviezd .....	95
6.1.4 Analýza zmien polôh hviezd s využitím izočiar.....	99
6.2 Planiglobium coeleste.....	101
6.2.1 Automatická detekcia hviezd .....	101
6.2.2 Analýza presnosti mapy s využitím izočiar.....	104
6.2.3 Analýza polohovej presnosti mapy s využitím polohových odchýlok vybraných hviezd .....	106
6.2.4 Analýza zmien polôh hviezd s využitím izočiar.....	109
6.3 PLANISPHAERIUM COELESTE.....	111
6.3.1 Automatická identifikácia hviezd.....	111
6.3.2 Analýza presnosti mapy s využitím izočiar.....	114
6.3.3 Analýza polohovej presnosti mapy s využitím polohových odchýlok vybraných hviezd .....	116
6.3.4 Analýza zmien polôh hviezd s využitím izočiar.....	119
7. Záver .....	121
Zoznam literatúry .....	123
Elektronické zdroje: .....	128



## **Zoznam použitých skratiek**

PNG                      Portable Network Graphics

TIFF                     Tagged Image File Format

JPEG                    Joint Photographic Experts Group Image File Format

## Zoznam Obrázkov

Obr. 1: Severná hemisféra Dunghuangského čínskeho neba, zdroj: Bonnet-Bidaud, Whitfield (2009), upravené (2019).....	21
Obr. 2: príklad mapového výstupu z výskumu Weber, Knipping a Alt (1993), zdroj: Weber, Knipping a Alt (1993), upravené (2019).....	22
Obr. 3: Delaunayova triangulácia, zdroj: Weber, Knipping a Alt (1993), upravené (2019).....	22
Obr. 4: výsledky algoritmu softassign, zdroj: Gold, Rangarajan, Lu, Pappu, Mjolsness (1997)	23
Obr. 5: výsledok metódy Crack Tree, Zou, Cao, Li, Mao, Wang (2011) .....	30
Obr. 6: Nebeský glóbus od Muhammada ibn Hilal al-Munajjim al-Mawsiliho, zdroj: (British Library, 2020) .....	31
Obr. 7: Coronelli celestial globe, zdroj: Trove (2020).....	32
Obr. 8: Přemyslovský glóbus zo zbierky českého kráľa Přemysla Otakara II., zdroj: Česká Astronomická Společnost (2020).....	33
Obr. 9: Zákres supernovy na kamennej doske z Burzahami, zdroj: Joglekar, Vahia, Sule, (2011) .....	34
Obr. 10: Bronzový disk z Nebry, zdroj: Dathe, Krüger (2018).....	34
Obr. 11: Jedna z troch máp v lichobežníkovom zobrazení od Conrada z Dyffenbachu z roku 1426, zdroj: Dathe, Krüger (2018).....	36
Obr. 12: Model spojených mapových listov hviezdneho „glóbusu“ od Ignaca Gastona Pardiesa, zdroj: David Rumsey Map Colletction (2020).....	39
Obr. 13: Ukážka mapy komét od Paola dal Pozza Toscanelliho, zdroj: Woodward (2007).....	40
Obr. 14: Znázornenie hviezdy Vega (súhvezdie Lyra) na mape Nieuwe Hemels Spiegel (vľavo), Door Dit HEMELS PLEYN (v strede) a Planisfero del globo celeste (vpravo), zdroj: Mapová sbírka UK (2019) .....	41
Obr. 15: Znázornenie súhvezdia Auriga (Prievozník) na mape Nieuwe Hemels Spiegel (vľavo), Door Dit HEMELS PLEYN (v strede) a Planisfero del globo celeste (vpravo), zdroj: Mapová sbírka UK (2019) .....	42
Obr. 16: Mapa Hemels Pleyn od Remmeta Teunissa Backera, zdroj: Mapová sbírka UK (2019) .....	42
Obr. 17: Mapa Planiglobium coeleste, zdroj: Mapová sbírka UK (2019) .....	45
Obr. 18: Mapa Planisfero del globo celeste, zdroj: Mapová sbírka UK (2019).....	45
Obr. 19: Mapa PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Mapová sbírka UK (2019).....	46
Obr. 20: Umiestnenie identických bodov na mape Planisfero del globo celeste a referenčnej mape v softwari detectproj, zdroj: Vlastný (2019).....	50
Obr. 21: Výsledné zobrazenie mapy Planisfero del globo celeste v softwari detectproj podľa tabuľky presnosti, zdroj: Vlastný (2019) .....	51

Obr. 22: Obrázok výsledného zobrazenia mapy Planisfero del globo celeste v softwari detectproj podľa tabuľky presnosti, zdroj: Vlastný (2019) .....	51
Obr. 23: Príklady zobrazenia hviezd na mape Planisfero del globo celeste (vľavo), Planiglobium coeleste (v strede) a PLANISPHAERIUM COELESTE (vpravo), zdroj: Mapová Sbíрка PŘF UK (2019) .....	52
Obr. 24: Riadok pixelov prechádzajúci stredom vybranej hviezdy v súhvezdí Veľký pes, zdroj: Mapová Sbíрка PŘF UK (2019) .....	53
Obr. 25: Graf hodnoty intenzity pixelov pozdĺž zvolenej úsečky prechádzajúcej stredom hviezdy v súhvezdí Veľký pes, zdroj: Vlastný (2019) .....	54
Obr. 26: Zvýraznené hodnoty pixelov pred (vľavo) a po vykonaní normalizovanej krížovej korelácie (vpravo), bez stanovenia prahovej hodnoty, zdroj: Vlastný (2019) .....	56
Obr. 27: Graf hodnoty korelačného koeficientu $\gamma$ pozdĺž zvolenej úsečky prechádzajúcej stredom hviezdy v súhvezdí Veľký pes, červenou čiarou nastavená prahová hodnota koeficientu $\gamma_{min} = 0.51$ , zdroj: Vlastný (2019) .....	57
Obr. 28: Aplikácia prahovej hodnoty $\gamma_{min}$ na riadok pixelov s použitým vzorom hviezdy (súhvezdie Veľký pes), zdroj: Vlastný (2019) .....	57
Obr. 29: Aplikácia prahovej hodnoty $\gamma_{min}$ na časť rastra s použitým vzorom hviezdy (súhvezdie Veľký pes), zdroj: Vlastný (2019) .....	58
Obr. 30: Graf hodnoty korelačného koeficientu $\gamma$ po aplikácii mediánového filtra, zdroj: Vlastný (2020) .....	59
Obr. 31: Vybraná hviezda pred (vľavo) a po úprave Mediánovým filtrom (vpravo), zdroj: Vlastný (2020) .....	60
Obr. 32: Vybraná hviezda po úprave Gaussovým filtrom (vpravo), zdroj: Vlastný (2020) .....	61
Obr. 33: Graf hodnoty korelačného koeficientu $\gamma$ po aplikácii Gaussovho filtra, zdroj: Vlastný (2020) .....	62
Obr. 34: Identifikácia regionálnych maxím hviezd v súhvezdí Malý pes, zdroj: Vlastný (2020) .....	62
Obr. 35: Ukážka viacnásobnej detekcie lokálnych maxím v niektorých prípadoch, zdroj: Vlastný (2020) .....	64
Obr. 36: Odstránenie viacnásobných lokálnych maxím metódou $k$ najbližších susedov, zdroj: Vlastný (2020) .....	65
Obr. 37: Príklad Detekovaných lokálnych maxím v miestach (čísla, písmená, okraj mapy), ktoré nepredstavujú hviezdy, zdroj: Vlastný (2020) .....	66
Obr. 38: Merané vzdialenosti k okrajovým bodom mapového poľa, od stredu mapy, použité na výpočet polomeru sféry, zdroj: Vlastný (2020) .....	68
Obr. 39: Transformácia pomocou rotačnej osy X, zdroj: Kabeláč, Kostecký (2009) .....	69

Obr. 40: Rozdiel medzi ekliptikánou [ $S_e$ ] a rovníkovou súradnicovou sústavou [ $S_{r2}$ ], zdroj: Kabeláč, Kostelecký (2009).....	70
Obr. 41: Zjednodušený zakres precesného pohybu, zdroj: (Kabeláč, Kostelecký, 2009).....	72
Obr. 42: Prechod od rovníkovej sústavy epochy $t_1$ do rovníkovej sústavy epochy $t_2$ , zdroj: (Kabeláč, Kostelecký, 2009).....	74
Obr. 43: Gravitačný ohyb svetla, zdroj: Kabeláč, Kostelecký, 2009 .....	77
Obr. 45: Mnohocića, šestcića a bledšia a tmavšia päćcića hviezda použitá ako vzorový príklad na identifikáciu hviezd na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019) .....	90
Obr. 46: Idetifikácia hviezd na severnej (vľavo) a južnej (vpravo) hemisfére na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019) .....	90
Obr. 47: Ukážka chybne identifikovaných objektov (okraj mapového poľa, kartuš, písmo, číslice) na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019) .....	91
Obr. 48: Ukážka niektorých neidentifikovaných hviezd (v strede obrázka) na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019) .....	92
Obr. 49: Ukážka pomerne vysokého množstva správne detekovaných hviezd na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019) .....	93
Obr. 50: Izolínie presnosti zakresu (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019) .....	94
Obr. 51: Izolínie presnosti zakresu (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019) .....	95
Obr. 52: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019).....	96
Obr. 53: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019).....	97
Obr. 54: Izolínie zmeny zakresu objektov (bez započítania vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019).....	99
Obr. 55: Izolínie zmeny zakresu objektov (bez započítania vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019) .....	100
Obr. 56: deväćcića, osemcića, sedemcića a šestćcića hviezda použitá ako vzorový príklad na identifikáciu hviezd na mape Planiglobium coeleste .....	101
Obr. 57: Idetifikácia hviezd na severnej (vľavo) a južnej (vpravo) hemisfére na mape Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019).....	102
Obr. 58: Ukážka chybne identifikovaných objektov (okraj mapového poľa, kartuš, písmo, číslice) na mape Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019) .....	102
Obr. 59: Ukážka pomerne vysokého množstva správne detekovaných hviezd na mape Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019).....	103

Obr. 60: Izolínie presnosti zákresu (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019).....	104
Obr. 61: Izolínie presnosti zákresu (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019).....	105
Obr. 62: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019) .....	106
Obr. 63: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019) .....	107
Obr. 64: Izolínie presnosti zákresu (bez započítania vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019) .....	109
Obr. 65: Izolínie presnosti zákresu (bez započítania vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019) .....	110
Obr. 66: Osemcípa, šesťcípa, štvorcípa a trojcípa hviezda použitá ako vzorový príklad na identifikáciu hviezd na mape PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019) .....	111
Obr. 67: Idetifikácia hviezd na severnej (vľavo) a južnej (vpravo) hemisfére na mape PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019).....	112
Obr. 68: Ukážka chybne identifikovaných objektov (okraj mapového poľa, zemepisná sieť, písmo, číslice) na mape PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019).....	112
Obr. 69: Ukážka pomerne vysokého množstva správne detekovaných hviezd na mape PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019).....	113
Obr. 70: Izolínie presnosti zákresu (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019).....	114
Obr. 71: Izolínie presnosti zákresu (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019).....	115
Obr. 72: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019).....	116
Obr. 73: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019).....	117
Obr. 74: Izolínie presnosti zákresu (bez započítania vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019).....	119
Obr. 75: Izolínie presnosti zákresu (bez započítania vplyvu precesie) na a južnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019).....	120

## Zoznam Tabuliek

Tab. 1: Vybrané hviezdy na poloautomatizovanú detekciu presnosti zakresu, zdroj: Vlastný (2020).....	87
Tab. 2: Ukážka miery presnosti algoritmu pomocou percentuálneho zastúpenia identifikácie objektov na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2020).....	93
Tab. 3: Vybrané hviezdy na posúdenie presnosti mapy Planisfero del globo celeste , zdroj: Vlastný (2019) ), stredná polohová chyba = $406.3056623^\circ$ , pozn.: čísla označujú poradie najbližších susedov z katalógu Bright Star Catalogue; B. n. = Bez názvu.....	98
Tab. 4: Ukážka miery presnosti algoritmu pomocou percentuálneho zastúpenia identifikácie objektov na mape Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2020).....	103
Tab. 5: Vybrané hviezdy na posúdenie presnosti mapy Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019), stredná polohová chyba = $1123.193829^\circ$ , pozn.: čísla označujú poradie najbližších susedov z katalógu Bright Star Catalogue; B. n. = Bez názvu.....	108
Tab. 6: Ukážka miery presnosti algoritmu pomocou percentuálneho zastúpenia identifikácie objektov na mape PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2020) .....	113
Tab. 7: Vybrané hviezdy na posúdenie presnosti mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019), stredná polohová chyba = $407.6451977^\circ$ pozn. čísla označujú poradie najbližších susedov z katalógu Bright Star Catalogue; B. n. = Bez názvu.....	118



# 1. Úvod

Hviezdna obloha predstavovala pre človeka odpradáva neodmysliteľného spoločníka a nie je preto prekvapivé, že človek sa ju taktiež už odpradáva snažil spoznávať, skúmať, ale aj zakresľovať. Hviezdy nevytvárajú len zaujímavé obrazce na oblohe, pomáhajú pri orientácii na zemskom povrchu alebo určovaní ročných období.

Rovnako nie len astronómia a s ňou spojený výskum nebeských telies, ale aj astronomická kartografia, hrajú dodnes pre ľudstvo významnú rolu. Najstaršie zákresy hviezdnej oblohy siahajú tisíce rokov do minulosti, avšak k väčšiemu rozvoju kartografických diel, zachytávajúcich nebeskú sféru došlo až v období Antiky, spoločne s dielami mapujúcimi zemský povrch. Keďže astronomické kartografické diela, ktoré už podliehajú matematickým zákonitostiam vyžadujú značné znalosti nielen po matematickej stránke, je pochopiteľné že ich konštrukcia bola a dodnes je výsadou odborníkov. História mapových diel bude podrobnejšie popísaná v 2. kapitole.

Hlavnou témou výskumu je automatická detekcia hviezd z pixelových súradníc naskenovaných máp tak aby na základe vstupného súboru bolo možné hviezdy na mape presne lokalizovať a dohľadať aj im blízke hviezdy, ktoré na mape nie sú znázornené.

Výber tejto témy bol zvolený ako nadväznosť na moju bakalársku prácu s názvom „Analýza kartografických zobrazení atlasových máp planisféry v 17. storočí“, ktorá sa zameriavala na zisťovanie kartografických zobrazení povrchu Zeme v softwari detectproj, kde bolo zistené, že najpoužívanejším kartografickým zobrazením bola v tej dobe stereografická projekcia.

Pre aktuálny výskum teda boli vybrané mapy nebeskej sféry zostrojené v stereografickej projekcii, všetky z prelomu 17. až 18. storočia zachycujúce všetky hviezdy resp. obe hemisféry, podrobnejší popis dát je v 3. kapitole spolu so stereografickou projekciou.

Hlavným predpokladom sa stala zmena polohy nebeských telies na mapách oproti aktuálnemu stavu. Na polohu astronomických objektov majú totiž vplyv viaceré pohyby Zeme, ktoré budú podrobnejšie opísané v 4. kapitole. Metodika tohto postupu bude zhrnutá v kapitole 5. a podrobné výsledky v kapitole 6. Kapitola 7. je venovaná záveru.

Tieto poznatky budú viesť nie len k lepšej predstave o zmenách na nebeskej sfére a k lepšiemu poznaniu práce vtedajších kartografov a astronómov, ale mohli by v budúcnosti poslúžiť aj ako podklady pre vývoj argumentovanej reality či dokonca k nájdeniu už neexistujúcich telies na oblohe.

## **1. 1. Ciele práce**

Hlavným cieľom je vykonanie analýzy na mapách nebeskej sféry z prelomu 17. až 18. storočia zachytávajúcích severnú aj južnú hemisféru za účelom zisťovania zmien, ktoré vplyvom pohybov Zeme nastali v súčasnosti. Druhotným cieľom bude aj samotná presnosť zákresu starých máp, pretože z aktuálnych prepočtov je možné presne zistiť polohu astronomických telies v minulosti a tým aj presnosť mapy.

Na vykonanie analýzy budú vytvorené skripty v prostredí Matlab a PyScharm, ktoré budú slúžiť na automatickú detekciu hviezd resp. pixelových súradníc z naskenovaných máp a tým k určeniu zmeny polohy hviezdy, ale aj k vyhľadávaniu hviezd, ktoré na mapách zachytené neboli.

## 2. Rešerš súčasného stavu

Hviezdna obloha bola, na rozdiel od našej Zeme, pozorovateľná a objavovaná inak ako zemský povrch. Ten sa ľuďom podarilo dostatočne prebádať až ku koncu 20. storočia nášho letopočtu. Naopak hviezdna obloha bola pozorovateľná v plnej kráse každý večer a tak niet divu, že sa stala taktiež centrom snahy o jej zachytenie na mapách.

### 2.1 Zdroje podkladových dát

Podobne ako mapy sveta aj mapy hviezdnej oblohy sú kartografickým dielom mimoriadneho významu. Ten je jasne viditeľný hlavne v tom, že svoje zastúpenie, adekvátny prístup o ich starostlivosť ako aj využitie kartografických zobrazení majú na rovnakej úrovni ako mapy sveta.

Medzi najvýznamnejšie zbierky hviezdnych máp patria David Rumsey Map Collection (<https://www.davidrumsey.com/>), ktorá celkovo obsahuje až 150 000 máp. Ďalšou je napríklad Library of Congress (<https://www.loc.gov/>) založená v roku 1800, obsahuje viac ako 164 miliónov položiek v 470 jazykoch, z toho približne 650 kusov astronomických máp a cca 62 atlasov, ktoré astronomické mapy nejakým spôsobom obsahujú. Podobne aj British Library (<https://www.bl.uk/>), národná knižnica Spojeného kráľovstva, ktorá obsahuje približne 170 miliónov artefaktov (presný počet astronomických máp sa zistiť nepodarilo) alebo Harvard Map Collection (<https://library.harvard.edu/libraries/harvard-map-collection>), v ktorej sa nachádza približne 300 diel s astronomickou tematikou, pričom približne jedna tretina sú astronomické mapy, či Norman B. Leventhal Map & Education Center (<https://www.leventhalmap.org/>), ktorá vlastní približne 35 máp a atlasov zachytávajúcich alebo obsahujúcich astronomickú tematiku. Všetky vyššie zmienené údaje boli zistené na základe emailovej komunikácie priamo s danými inštitúciami.

V našich končinách je zrejme najvýznamnejšou jednoznačne Mapová sbírka Univerzity Karlovy (<http://www.mapovasbirka.cz/>), ktorej katalóg obsahuje viac ako 62 000 bibliografických záznamov z čoho 96 sú diela s astronomickou tematikou (mapy, telesá, glóbusy atď.), ale najvyšší počet starých máp v Česku uchováva Národní archiv v Praze, ten však neobsahuje astronomické mapy. Jednou z inštitúcií, ktorá ešte astronomické mapy uchováva je Národní knihovna ČR (<https://www.nkp.cz/>), v nej sú astronomické mapy súčasťou približne 35 atlasov. Zvyšné mapové zbierky, Mollova mapová zbierka, Moravský zemský archiv, Oldmapsonline či Česká geologická služba mapy nebeskej sféry nezahŕňajú.

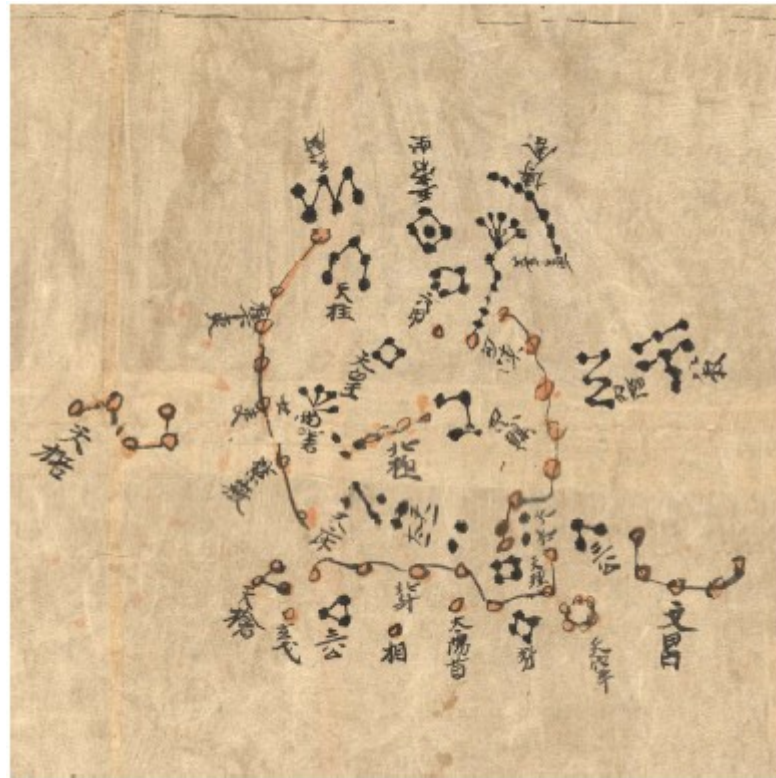
## 2.2 Analýza máp nebeskej sféry

Napriek tomu, že mapy nebeskej sféry zaznamenali podobný vývoj ako mapy zachycujúce zemský povrch ich analýza a výskum sú dodnes v úzadí a dokonca by sa dalo povedať, že dosahujú úplne zanedbateľnú úroveň.

Prác zachytávajúcej dejiny, vývoj či popis astronomických máp je niekoľko. Jednou z nich je napríklad publikácia *The History of Cartography* od Woodwarda a spol. (2007). Táto obsiahla publikácia zahŕňa vývoj kartografie so značným dôrazom na renesančné obdobie a okrem máp sa venuje aj glóbusom. Hviezdne mapy sú tu popísané hlavne v časti venujúcej sa renesancii a je uvedené ich delenie, zameranie aj kompozičné prvky. Publikácia, ktorá už opisuje aj konkrétnych autorov, napríklad Petra Apiana, ktorý vytvoril mnohé diela, nie len astronomické a ktorý ovplyvnil tvorbu nasledujúcich autorov, je kniha *Uncharted Constellations: Asterisms, Single-Source and Rebrands* od Barentine (2016). Medzi publikácie s bohatým vizuálnym obsahom patrí zdobená publikácia *Atlasy hviezd: Cesta do nebe a zlatý vek kartografie* od Eleny Percivaldi (2018) obsahujúca mnoho obrázkov hviezdnych atlasov ako aj popis histórie astronomických máp. Všetky tieto publikácie sa venovali histórii, popisu a mechanickému výskumu mapových diel. U žiadneho nebola zaznamenaná snaha o automatizovanú detekciu objektov, či celkovo o automatizovaný výskum a hlavne išlo o všeobecný výskum skupín máp, jednotlivšie boli opísané len autori.

Napriek tomu sa problematika analýzy máp nebeskej sféry v niekoľkých prípadoch riešila. Uvedieme preto najpodstatnejšie z nich. Francúzsky astrofyzik Jean-Marc Bonnet-Bidaud a Susan Whitfield (2009) skúmali čínsku mapu tzv. Dunhuangská čínska obloha (viz Obr. 1), približne z roku 700 n. l. so zákresom súhvezdí severnej nebeskej oblohy, objavenú v roku 1907 Aurelom Steinom. V tomto výskume najprv prebehlo zisťovanie jednotlivých hviezd. Presný postup nebol uvedený, preto sa predpokladá, že išlo o klasický mechanický výskum na základe vizuálnej podobnosti a nie o automatizované detekcie či postupy. Následne bolo zistené kartografické zobrazenie mapy. Záverom bolo viac a do úvahy prichádzali valcové zobrazenie, stereografická projekcia a azimutálne zobrazenie. Po zistení zobrazenia, sa tým zamerával na polohu hviezd. Keďže už vedeli ktorá hviezda je ktorá, mohli na základe hviezdnych katalógov určiť ich deklináciu a rektascenziu v danom roku, ako aj v súčasnosti. Tieto súradnice boli potom porovnávané, kvôli presnosti zákresu. Hviezdy sú za tak dlhú dobu ovplyvnené precesiou, takže došlo k ich posunu. Precesia bola v tomto výskume

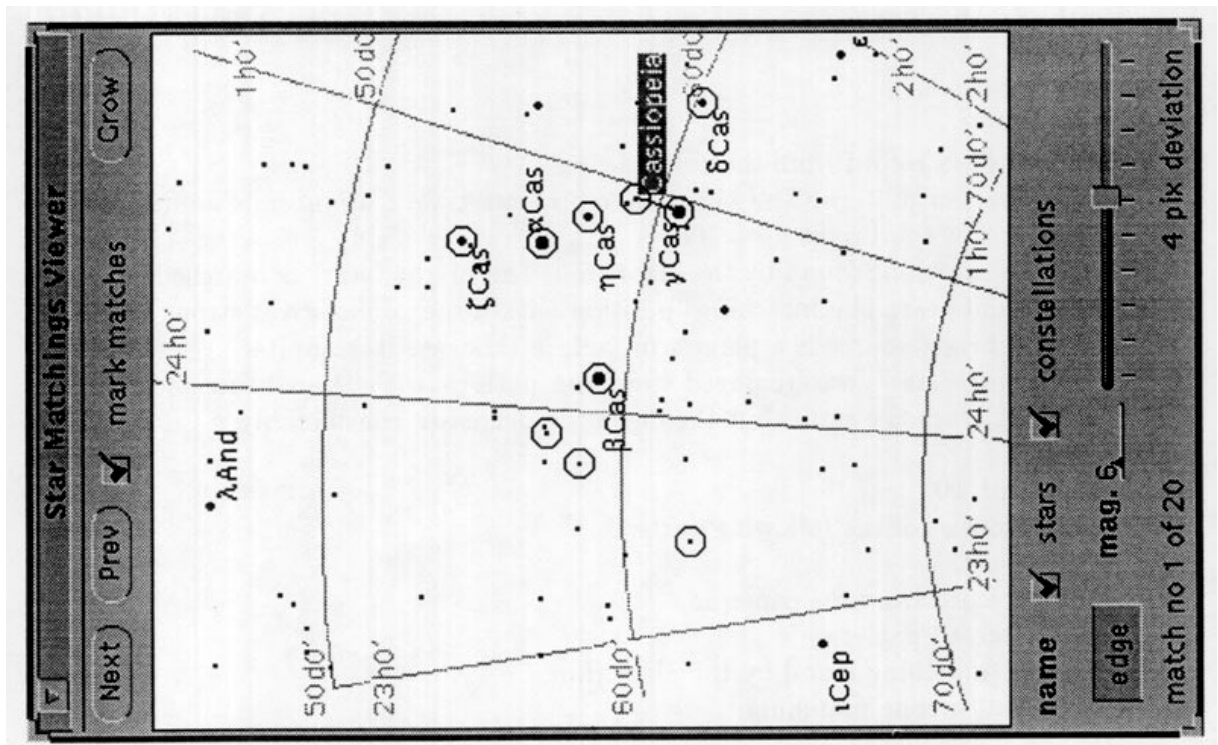
využitá na zistenie presného alebo aspoň presnejšieho roku vyhotovenia mapy. Výsledky boli prekvapivé a došlo k záveru, že mapa je na svoju dobu relatívne presná. Táto časť nebude v našom výskume zahrnutá, pretože vieme, keď nie presný tak aspoň približný, rok vyhotovenia analzovanej mapy. Navyše nami skúmané obdobie je pomerne krátke.



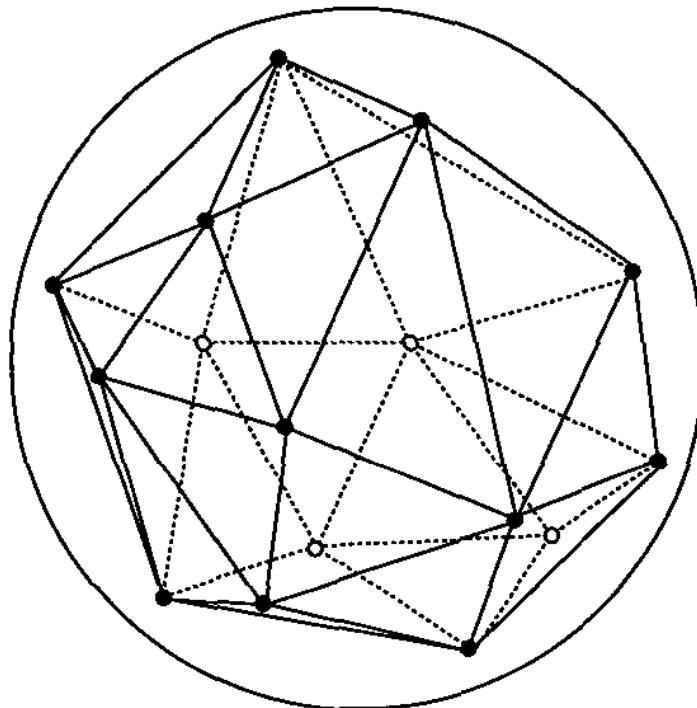
Obr. 1: Severná hemisféra Dunghuangského čínskeho neba, zdroj: Bonnet-Bidaud, Whitfield (2009), upravené (2019)

Ďalší výskum prebehol opäť v Ázii, konkrétne v Kórei, ten sa však zameriaval na novodobšie mapy, z 19. storočia a využil podobný postup ako v predošlom prípade. Celkovo neboli nájdené výskumy máp s využitím automatických postupov, .

Napriek tomu, že automatizovaný výskum na polohu objektov na nebeských mapách nebol objavený, predsa len sa nájde aspoň podobný výskum aplikovaný priamo na polohu hviezd. Použili ho Weber, Knipping a Alt (1993). Tu však ide o satelitné meranie polohy hviezd priamo na oblohe s využitím hviezneho katalógu a mapové výstupy sú skôr nákresy zaznamenaných zmien (viz Obr. 2), hoci dochádzalo aj k porovnávaniu sád hviezd s využitím Delaunayovej triangulácie (viz Obr. 3).



Obr. 2: príklad mapového výstupu z výskumu Weber, Knipping a Alt (1993), zdroj: Weber, Knipping a Alt (1993), upravené (2019)

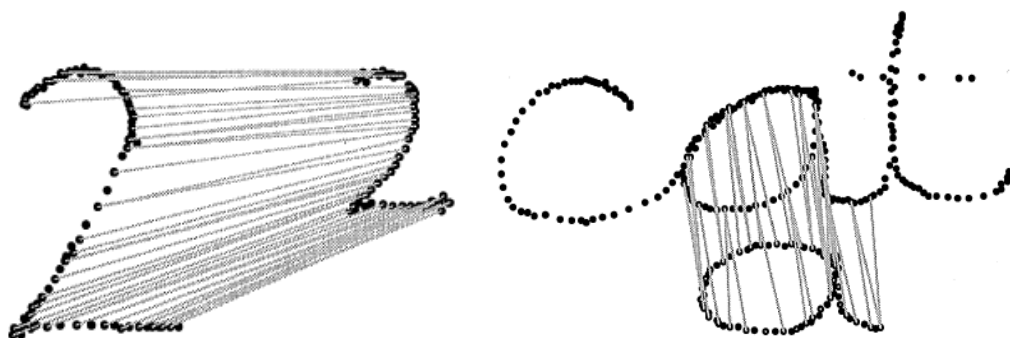


Obr. 3: Delaunayova triangulácia, zdroj: Weber, Knipping a Alt (1993), upravené (2019)

## 2.3 Automatizovaná detekcia pixelových súradníc

Algoritmy na automatizovanú detekciu pixelových súradníc z obrázka už použité boli. Táto problematika bola riešená v rade odborných článkov. Avšak ani jeden sa netýkal máp nebeskej sféry, dokonca ani máp všeobecne. Niekoľko príkladov je uvedených v tejto podkapitole.

Gold, Rangarajan, Lu, Pappu, Mjolsness (1997) zmodifikovali algoritmus softassign tak, aby minimalizoval obmedzenia jeho predchodcov. Použili napríklad deterministické žíhanie či aproximácia Potts-Glass modelu. Výsledkom je rýchlejší a presnejší algoritmus, ktorý sa skladá z dvoch druhov a to 2D a 3D. Prvý využíva affinnú transformáciu a druhý rieši problémy odhadu stavu s neznámou korešpondenciou. Od prvého sa líši hlavne neprítomnosťou parametru šmyku a mierky. Príklad je uvedený na Obrázku 4.



Obr. 4: výsledky algoritmu softassign, zdroj: Gold, Rangarajan, Lu, Pappu, Mjolsness (1997)

Jain a Li (2004) zhrnuli doterajšie algoritmy point matchingu do súvislého reportu a vymenovali nasledovné typy algoritmov:

**1. Iterative Closest Point (ICP) Algorithm** - prvý krát ho použili Chen a Medioni v roku 1991 a Besl a McKay v roku 1992. Ide o algoritmus pozostávajúci z dvoch krokov. 1. nájdenie korešpondencie (najbližšieho suseda), 2. nájdenie transformačných parametrov a transformácie (rotácie a translácie). Algoritmus potom iteruje medzi týmito dvoma krokmi. Na tomto algoritme bola založená aj práca Morphological iterative closest point algorithm od Pitasa, Kapoutsisa, Vavoulidisa (1999), ktorá algoritmus ešte rozšírila aplikáciou na 3D plochy. Algoritmus v roku 2003 opäť použili a upravili na verziu Dual-Bootstrap Iterative Closest Point Stewart, Tsai, Roysam v roku

2003, ktorý využíva na transformáciu obrazu malé plochy obrázka, pomocou ktorých potom rozširuje zavádzaciu oblasť. Ide v podstate o robustnejšiu verziu základného ICP Algorithm. Ďalším rozšírením sa stal Trimmed iterative closest point algorithm od Chetverikova, Stepanova, Krseka (2005), ktorý využíva metódu najmenších štvorcov a je rýchly, použiteľný na prekrývanie pod 50 %, robustný pre chybné a neúplné merania a má ľahko nastaviteľné parametre. Jedným z posledných modifikácií ICP algoritmu je Scaling iterative closest point algorithm od Du, Zheng, Xiong, Ying, Xue (2010), ktorý integruje maticu mierky s hranicami do pôvodného algoritmu ICP na registráciu mierky. ICP je presný a rýchly pre registráciu súpravy bodov v rovnakej mierke, ale nezaobera sa prípadom s rôznymi mierkami, to práve rieši táto jeho nová verzia.

**2. Picky ICP Algorithm** - ide v podstate o úpravu predošlého algoritmu, aby bol robustnejší a efektívnejší. Vylepšenia spočívajú v hierarchickom vzorkovaní bodov a ich používaní a výpočtoch po úrovniach, nie hromadne. Pri výpočte korešpondencie sa použije K-D tree. Na záver dochádza k odmietnutiu chybných párov bodov resp. po nájdení zodpovedajúceho modelového bodu pre každý dátový bod sa chybné páry môžu vyselektovať. Bodová korešpondencia môže byť bijektívna, čo znamená že modelový bod môže byť len v jednom páre a všetky ostatné sú odmietnuté. Tento algoritmus upravili Zinßer, Schmidt a Niemann (2003).

**3. Spektrálna korešpondencia** - tento prístup založený na charakterizácii bodov z hľadiska ich vzťahu k iným bodom zaviedli Shapiro a Brady (1992). V prípade 2D množín sa pracuje s euklidovskou vzdialenosťou, v prípade 3D množín potom s geodetickými vzdialenosťami medzi bodmi a s uhlovými vzdialenosťami medzi normálami v týchto bodoch.

**4. Affinný point matching** - porovnávanie sád bodov s využitím affinnej transformácie. Túto metódu po prvá krát predstavili Sprinzak a Werman v roku 1992. Vtedy išlo o prípad porovnávania dvoch sád bodov, medzi ktorými nebola známa zhoda, boli nejakým spôsobom posunuté alebo zdeformované a ukázali algoritmus na porovnávanie množín  $d$ -rozmerných bodov v rámci afinnej transformácie, ktorá trvá  $n \log n$  času v dvoch rozmeroch. Použitý bol znova v roku 1997, taktiež na dve bodové sady v 2D, ktoré bolo nutné spárovať, jeho doplnkom sa stal tzv. Softassign, ktorý umožňuje optimalizáciu problémov vyžadujúcich riešenie obojsmerných obmedzení bez použitia akýchkoľvek sankčných výrazov v objektívnych funkciách. Ho, Yang, Rangarajan,



Vemuri v roku 2007 navrhli nový algoritmus affinnej registrácie, ktorý nevyžaduje žiadnu optimalizáciu a pri absencii dátového šumu algoritmus obnoví presnú afinnú transformáciu a neznámu korešpondenciu. Algoritmus najprv redukuje všeobecný afinitný prípad na ortogonálny prípad a neznáma rotácia sa počíta ako korene polynómu nízkeho stupňa s komplexnými koeficientmi. Algebraické a geometrické myšlienky navrhovanej metódy sú jasné a transparentné a ich implementácia je priama. Algoritmus overujeme na rôznych syntetických 2D bodových sadách, ako aj na hlavných bodoch na obrázkoch skutočných objektov.

**5. E-M algoritmus** - táto metóda prešla postupným vývojom Edwina R. Hancocka. Najprv začínala na párovaní dvojrozmerných sád bodov. 2-D body triangulujú v množine a vybudujú množinu pozostávajúcu zo všetkých susedov stredového bodu. Neskôr došlo k modifikácii s využitím spektrálnej korešpondencie. Nastal globálny odhad celého súboru údajov, ktorý je robustnejší než predošlý vzorec. Najnovšie využíva hierarchickú spektrálnu metódu korešpondenčného zápasu. V každej iterácii obsahuje algoritmus E-M dva kroky maximalizácie, prvým je aktualizácia transformačnej matice maximalizáciou pravdepodobnosti. Potom pomocou aktualizovanej transformačnej matice odhadne korelačnú maticu.

### 2.3.1 Subpixelová korelácia

V tejto podkapitole bude uvedený prehľad najvýznamnejších publikácií týkajúcich sa problematiky subpixelovej korelácie, ktoré majú väzbu na riešenie problematiky.

Prvé algoritmy na sub-pixelovú koreláciu popísali v roku 1985 Tians a Huhns v článku Algorithms for Subpixel Registration. Predstavujú tu 4 základné algoritmy na registráciu obrazu pomocou subpixelovej korelácie. Ide konkrétne o:

1. korelačnú interpoláciu - jeden zo spôsobov, ako určiť presnosť registrácie subpixelov, je vypočítať diskretnú korelačnú funkciu medzi dvoma obrázkami, umiestniť interpolovaný povrch na vzorky tejto funkcie a potom presne vyhľadať maximum tohto povrchu. Keď sú obrázky vzorkované pri dostatočne vysokej frekvencii, zodpovedajúca diskretná korelačná funkcia je pomerne plynulá a interpolácia 2. rádu môže poskytnúť presnú reprezentáciu.

2. Interpoláciu intenzity - registrácia subpixelu sa dá dosiahnuť pomocou interpolácie intenzity, aby sa pre vybrané časti referenčných snímok vytvorila omnoho hustejšia mriežka. Na týchto častiach sa potom uskutoční vyhľadávanie pomocou cieľového obrázka.

3. Diferenčná metóda - táto metóda sa používa na odhadovanie dvojrozmerných translácií na spracovanie sekvencie televíznych obrazov. Kľúčovou myšlienkou je priradiť rozdiel medzi dvoma postupnými snímkami ku gradientu priestorovej intenzity prvého obrazu.

4. Fázová korelácia - Technika fázovej korelácie bola použitá na implementáciu obrazového korelačného procesora obrazu. Dosahuje presnosť sub-pixelov s relatívnou citlivosťou na obsah scény, rozdiely v osvetlení a úzkopásmový šum. Je založená na skutočnosti, že väčšina informácií o relatívnych posunoch objektu medzi dvoma obrázkami je obsiahnutá vo fáze ich priečneho výkonového spektra.

V roku 2002, Szeliski a Scharstein predstavili novú modifikovanú metódu Symmetric Sub-Pixel Stereo Matching a tým aj nové predpisy na párovanie. Nové predpisy sú založené na interpolovaných obrazových signáloch a sú motivované frekvenčnou analýzou obrazu súvislého disparitného priestoru. Poznatky vedú k zlepšeniu výkonnosti pri porovnávaní, najmä vo vysokofrekvenčných obrazových oblastiach. Ďalšou výhodou je to, že informácie o čiastkových pixeloch odvodené pri počiatočnom výpočte nákladov sa môžu na konci obnoviť pre výsledné rozdiely, aj keď proces sprostredkovania zodpovedá operáciám s celočíselnými disparitami.

Lin, Chen, Wei (2006) v článku New method for subpixel image matching with rotation invariance by combining the parametric template method and the ring projection transform process navrhujú nový postup porovnania šablón subpixelov, ktorý kombinuje metódu parametrickej šablóny a proces transformácie azimutálnej projekcie. Nielenže dosahuje presnosť subpixelov v polohe, ale tiež ponúka invarianciu rotácie pri porovnávaní šablón subpixelov. Je okrem toho koncepčne jednoduchý, ľahko implementovateľný a veľmi efektívny, pretože sa neskladá z iteratívnych krokov.

V práci od Jiao, Fang a He (2008) An integrated feature based method for sub-pixel image matching je po analýze algoritmu na prispôbenie obrazu navrhnutá integrovaná metóda na detekciu bodových prvkov pomocou kombinovaných výhod

Harrisovho operátora (použitý na detekciu bodových prvkov) a Förstnerovho operátora (použitý na orientáciu sub-pixelov). Navrhovaná metóda bola testovaná na troch pároch prekrývajúcich sa obrázkov. Výsledky ukazujú, že presnosť zhody sa môže dostať na sub-pixel a poloha je presná. Táto metóda je tiež robustná, efektívna a vhodná na uskutočnenie automatického porovnávania obrázkov.

Karybali, Psarakis, Berberidis, Evangelidis (2008) v článku *An efficient spatial domain technique for subpixel image registration* uvádzajú novú techniku na vykonanie párovania snímok s presnosťou na sub-pixel. Navrhovaná technika, ktorá je založená na maximalizácii korelačného koeficientu, nevyžaduje rekonštrukciu hodnôt intenzity a poskytuje riešenie problému odhadu translácie v uzavretom tvare. Okrem toho sa navrhuje účinná iteratívna schéma, ktorá výrazne znižuje celkové výpočtové náklady na problém s registráciou obrazu. Táto schéma správne kombinovaná s technikou sub-pixelovej presnosti vedie k rýchlejšej technike priestorovej domény na registráciu sub-pixelov.

Vylepšenie algoritmu pokračovalo vo výskume, ktorý viedli Lv, Feng, Qi (2008) *A study of sub-pixel interpolation algorithm in digital speckle correlation method* a ktorý sa snažil zvýšiť rýchlosť pôvodného algoritmu pomocou použitia vylepšeného Taylorovho rozširovacieho radu v gradientovom algoritme. Súčasne sa navrhuje nová metóda kubickej konvolučnej interpolačnej metódy, aby sa získala extrémne vysoká presnosť. A o vylepšenie rýchlosti a presnosti sa pokúšali aj Miclea, Vancea, Nedevschi (2015) vo svojej práci *New Sub-Pixel Interpolation Functions for Accurate Real-Time Stereo-Matching Algorithms*, kde algoritmus obohacujú o metódu *Semi-Global Matching (SGM)*.

Xie, Mo, Yang, Li, Tian (2016) *A novel sub-pixel matching algorithm based on phase correlation using peak calculation* predstavujú subpixelovú metódu fázovej korelácie pomocou výpočtu maxima na zlepšenie presnosti párovania. Normalizovaný krížový operátor, ktorý znamená odchýlku subpixelových bodov, je možné získať pomocou výpočtu maxima, podľa vlastného geometrického vzťahu, ktorý je generovaný inverzným normalizovaným spektrom krížovej korelácie a nesúhlasné body sú odmietnuté dvoma stratégiami: obmedzenie vyhľadávacieho okna a korelačného koeficientu, ktorý je účinný pri odstraňovaní chybných párovacích bodov pre satelitné obrazy.

Ma, Sun, Men, Men, Li, (2017) v článku A Subpixel Matching Method for Stereovision of Narrow Baseline Remotely Sensed Imagery navrhujú presnú a efektívnu metódu porovnávania snímok založená na fázovej korelácii pre odhad rozdielnosti s presnosťou na subpixel, ktorá sa používa na prehliadanie úzkych základných vzdialených snímok. Odhad rozdielnosti je rozdelený do dvoch krokov: vnútropixelové a subpixelové párovanie. Potom je vzťah zodpovedajúcich bodov stanovený pod vedením celočíselných nerovností. Podobrazy sa extrahujú výberom zodpovedajúcich bodov ako centrum. Nakoniec sa subpixelová rozdielnosť získa porovnaním subobrazov pomocou nového variantu prístupu fázovej korelácie. Výsledky experimentu ukazujú, že navrhovaná metóda môže porovnávať rôzne druhy veľkých úzkych základných línií na diaľku snímaných obrazov a automaticky odhadovať rozdielnosti s presnosťou subpixelov.

Feng, Deng, Shu, Wang, Deng, Ji (2012) v článku A Subpixel Registration Algorithm for Low PSNR Images predstavujú rýchly algoritmus na získanie vysoko presného subpixelového prenosu obrázkov s nízkou PSNR (peak signal-to-noise ratio). Namiesto umiestnenia maximálneho bodu na vzorkách bez vzorkovania alebo prispôbenia vrcholu korelačnej plochy je navrhnutý algoritmus založený na vyhľadanie centroidu na povrchu korelačnej plochy modifikovanou momentovou metódou. Boli testované syntetické obrazy, skutočné solárne obrazy a štandardné testovacie obrazy s pridaným gaussovským šumom a výsledky ukazujú, že presnosť algoritmu je porovnateľná s inými technikami sub-pixelovej registrácie a rýchlosť spracovania je vyššia.

### **2.3.2 Postprocessing rastra**

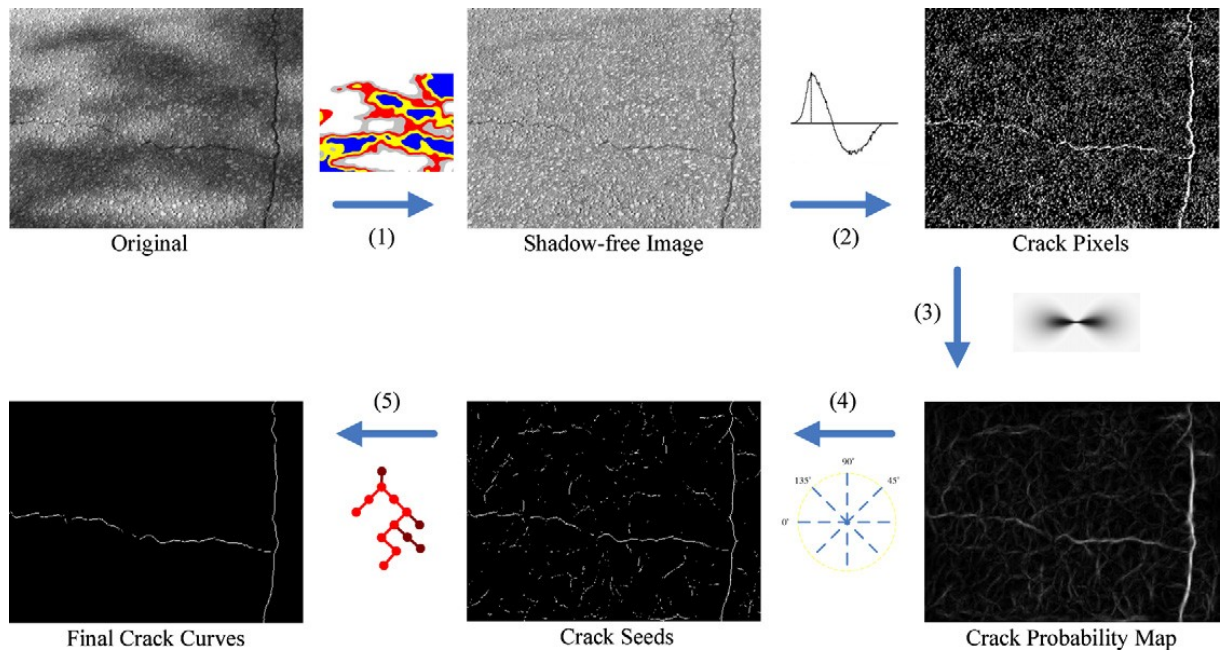
Po aplikácii obrazovej korelácie bude vykonaný postprocessing rastra. Cieľom bude, aby sa zviditeľnili a zvýraznili hviezdy na mape zachytené.

Každý obrázok je pred spracovaním ovplyvnený šumom, ktorý je nežiadúcim signálom v obraze. Šum na obrázku môže byť jeden z troch typov šumu: Salt and Pepper, impulzný šum, gaussovský šum. Cieľom predbežného spracovania je zlepšiť kvalitu obrázka a vylepšiť jeho vlastnosti pre ďalšie spracovanie. Na zlepšenie obrazu a spresnenie výsledkov bude použitý mediánový filter, ktorý slúži na odstránenie prvého typu šumu. Mediánový filter pracuje cez obraz po pixeloch a nahrádza ho strednou hodnotou susedných pixelov, pracuje pomocou vyhľadávacieho okna (3x3 alebo 5x5)

výberom strednej intenzity v okne, ktoré posúva pixel po pixeli po celom obrázku. Výsledný obraz je trochu rozmazaný, ale chybné pixely (napríklad biele v čiernom poli a čierne v bielom poli) odstraňuje dobre. Výhody použitia mediánového filtra sú jeho robustná stredná hodnota a tiež zachováva ostré hrany. Taktiež sa stanovuje prahová hodnota, ktorá sa získa počas charakterizácie šumu a použije sa na pixely. Podobný postup bol použitý v článku od Hemalatha, Sumathi (2016) s názvom Preprocessing Techniques of Facial Image with Median and Gabor Filters, kde sa mediánový filter používa na normalizáciu farieb a redukciu šumu.

Druhým použitým filtrom bude Gaussovský filter, ktorý pracuje s 2D rozdelením ako funkcia bodového rozptylu. Jeho základom je Gaussova krivka. Ide o nejednotný nízko-frekvenčný filter. Koeficienty jadra sa znižujú so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od stredu jadra. Stredové pixely majú vyššiu váhu ako pixely na periférii. Použitý bude preto, že sa nehodí práve na odstraňovanie prvého typu šumu, na ktorý bol použitý mediánový filter. Gaussov filter je dobrý na vyhladenie obrázkov, jeho nevýhodou môže byť to, že nezachováva hrany avšak zvýrazňuje ich. To je podstatné aj pre náš výskum, kde potrebujeme zvýrazniť okraje hviezdy a zosvetliť obraz. Na tento účel bol zameraný aj výskum Yaji, Sarkar, Manikantan, Ramachandran (2012) DWT feature extraction based face recognition using intensity mapped unsharp masking and laplacian of gaussian filtering with scalar multiplier.

Zou, Cao, Li, Mao, Wang (2012) tiež navrhli novú globálnu metódu nazývanú „Crack Tree“ pre automatickú detekciu trhlín na vozovke. Tá sa skladá z detekcie tieňov na vozovke a následne aplikácie Gassovho filtra. Potom nastáva rozdelenie vyhladeného obrazu do sady geodetických úrovní, vo výsledku dôjde k výberu podľa intenzity: nízke = s tieňom, vysoké = bez tieňa (viz Obr. 5).



Obr. 5: výsledok metódy Crack Tree, Zou, Cao, Li, Mao, Wang (2011)

V našom prípade bude aplikovaný Gaussovský a morfológický filter s rozmerom 3x3. Rovnaké rozmery použili aj Kim, Lee, Kweon (2004) či Gonzalez, Melin, Castro, Castillo, Mendoza (2016).

### 3. Znázornenie nebeskej sféry

Tak ako zemský povrch sa človek už od dávneveku snažil rôznymi spôsobmi mapovať aj hviezdnu oblohu. Napokon jej podmanivá krása a možno aj na prvý pohľad jednoduchšie znázornenie k tomu priam vyzývajú. Zachytenie nebeskej sféry je podobne ako pri mapovaní zemského povrchu možné viacerými, avšak rovnakými spôsobmi a to nákresmi, mapami a glóbusmi.

#### 3.1 Hviezdne glóbusy

Nie len v znázorňovaní sveta, ale aj nebies majú glóbusy svoje zastúpenie. Napokon najstarší dochovaný glóbus zachytáva práve nebeskú sféru. Pochádza z obdobia Antiky, konkrétne starovekého Ríma a má priemer až 65 cm (Čapek, Mikšovský, Mucha, 1992). Ide o Farnésky glóbus, ktorý drží na ramenách obor Atlas a nachádza sa v Národnom múzeu v Neapole.

Hvieznych glóbusov vznikli desiatky avšak v Európe ich rozmach počas stredoveku nebol veľký a toto obdobie majú svoje zastúpenie najmä v arabskej kartografii. Príkladom je mosadzný glóbus od mosulského astrológa Muhammada ibn Hilal al-Munajjim al-Mawsiliho zostrojený v Marághe medzi rokmi 1275 až 1276, zachycujúci 48 konštelácií hviezd (viz. Obr. 6) alebo rovnako mosadzný glóbus od neznámeho autora, pochádzajúci z obdobia rokov 1430 až 1431, vyrobený v Iráne a zachytávajúci 60 hviezd (British Library, 2020).



Obr. 6: Nebeský glóbus od Muhammada ibn Hilal al-Munajjim al-Mawsiliho, zdroj: (British Library, 2020)

Zvrat v Európe nastal až s príchodom renesancie, kedy začali z blízkeho východu aj k nám prenikať poznatky z Antiky, dochované v Oriente. Jedným z najstarších dochovaných glóbusov z tohto obdobia je drevorytový glóbus „Globi stelliferi, sive sphaerae stellarum fixarum usus et explicationes“ od Johanna Schönera pochádzajúci z roku 1534 (University of Oxford, Museum of the history of science, 2020). V roku 1600 zostrojil nebeský glóbus Willem Janszoon Blaeu, pod názvom „Sphaera Stellisera“, ktorý zachytáva 48 ptolemaiových súhvezdí a je rozdelený na 12 sférických trojuholníkov. Okrem vyobrazení súhvezdí, znázornených ako umelecké diela, sú na glóbe aj podobizne Tycha de Brahe a princa Mauritsa z Nassau. Ďalším, už mosadzným európskym glóbusom, ktorý však nemá názov a ani dochované meno autora je glóbus zostrojený v okolí Paríža v roku 1659 (British Library, 2020), podobne bez názvu je aj glóbus od Vincenza Coronelliho z roku 1692, ide o farebný barokový glóbus hviezdnej oblohy, na stojane so štyrmi podperami (viz Obr. 7). Hviezdy a konštelácie sú označené taliansky, francúzsky, latinsky, grécky a arabsky (Virtual map collection, 2020). Ďalšími glóbusmi, ktoré vznikali v skúmanom období sú napríklad nemenovaný glóbus od Johanna Ludwiga Andrae a Samuela Fabera, s medenou potlačou otáčajúci sa okolo mosadznej osi (Virtual map collection, 2020) či nebeský glóbus od Matthæia Seutteriho z roku 1710 a výškou 35 cm, skladajúci sa z 20 medirytových papierových dielov na sadre (Mapová sbírka PřF UK, 2020). Za obdobím, ktoré je predmetom výskumu možno ešte spomenúť astronomický glóbus od Franza Ludwiga Gössefelda z roku 1798, ktorý je taktiež zachytený na medirytových papierových dieloch a má priemer 10,2 cm (Mapová sbírka PřF UK, 2020).



Obr. 7: Coronelli celestial globe, zdroj: Trove (2020)



V našich končinách je zrejme najznámejším Přemyslovský glóbus (viz Obr. 8) zo zbierky kráľa Přemysla Otakara II. a je najstarším glóbusom pochádzajúcim z kresťanskej Európy. Taktiež je unikátny tým, že je konštruovaný ako tzv. univerzálny precesný glóbus zhotovený podľa návodu Ptolemaiovho Almagestu (Mapová sbírka PřF UK, 2020). Jeho výskumu sa venujú manželia Petr Hadrava a Alena Hadravová, ktorý svoje poznatky publikujú v diele „Sphaera Octava. Mýty a věda o hvězdách“.



Obr. 8: Přemyslovský glóbus zo zbierky českého kráľa Přemysla Otakara II., zdroj: Česká Astronomická Společnost (2020)

V neskorších dobách sú určite významnými tvorcami glóbov Felkl a syn, ktorý jeden nebeský glóbus zostrojili na prelome 19. a 20. storočia. Keďže glóbusy nie sú predmetom výskumu, nebudeme sa im ďalej viac venovať.

### 3.2 Hviezdne mapy

Najstarší zákres nebeských telies je datovaný približne do roku 4600 p. n. l. Ide o kamennú dosku s rozmermi 48 x 27 cm (zrejme nedochovanú v celku), objavenú v pohorí Kašmír v regióne Burzahama v Indii, na ktorej sú znázornené 2 veľké nebeské telesá blízko vedľa seba (viz Obr. 9). Vedci sa domnievajú, že jedno z nich je Slnko alebo Mesiak a tým druhým supernova (Joglekar, Vahia, Sule, 2011).



Obr. 9: Zákres supernovy na kamennej doske z Burzahami, zdroj: Joglekar, Vahia, Sule, (2011)

Za najstaršie prenosné astronomické zobrazenie nočnej oblohy, je považovaný tzv. Disk z Nebry. Ide o bohato zdobený bronzový tanier so zlatými symbolmi, interpretovanými ako Slnko, Mesiac a 32 hviezd (viz. Obr. 10). Jeho priemer činí 32 cm a vek je odhadovaný na 1600 rokov p. n. l. Bol objavený v roku 1999 v blízkosti obce Nebra v Sasku (Dathe, Krüger, 2018).



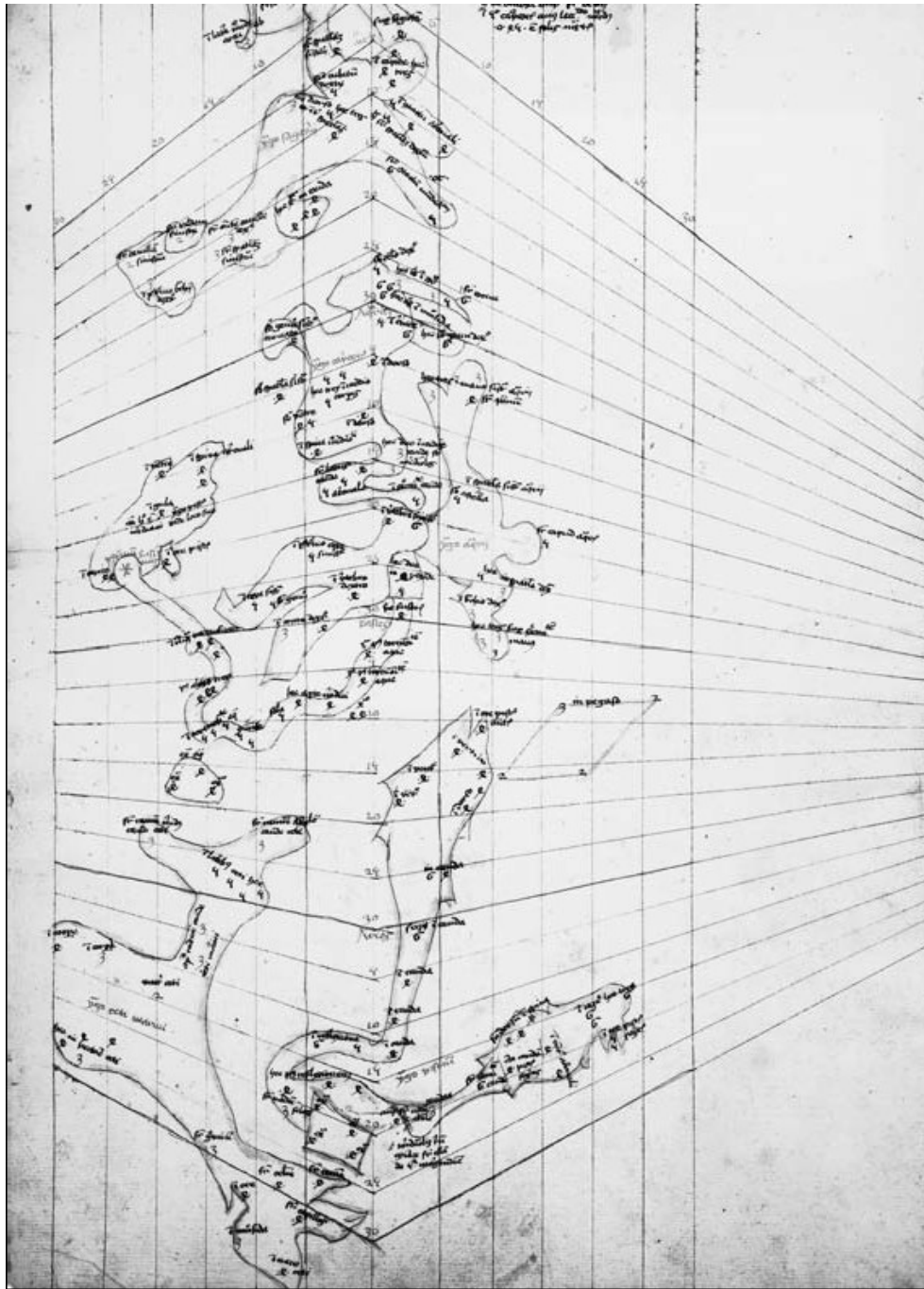
Obr. 10: Bronzový disk z Nebry, zdroj: Dathe, Krüger (2018)

Podobne ako pri mapovaní zemského povrchu a vývoji kartografických projekcií aj astronomické mapy zaznamenali najvýraznejší vývoj v antickom období. Z tohto obdobia napokon pochádza aj prvý krát, práve na zachytenie hviezdnej oblohy, použitá

stereografická projekcia, zostrojená Hipparchom z Nikaie (Čapek, Mikšovský, Mucha, 1992). Výpočty pomocou hviezdnych meraní ako aj pozorovania hviezd či bádanie po záhadách vesmíru v tomto období ani v najmenšom nezaostávali, preto môžeme Antiku označiť za prvé vrcholné obdobie astronomickej kartografie ako aj astronómie.

V stredoveku naopak nastal, aspoň v kresťanskej Európe, výrazný úpadok, ktorý astronomickej kartografii v našich končinách neprial tak ako Antika, avšak astronomická kartografia toto obdobie prečkávala v arabskom svete. Práve tu vznikali kartografické diela, ktoré čerpali napríklad z Ptolemaiovho *Almagestu*, v ktorom sa nachádza prepracovaná matematická teória pohybu vesmírnych telies, prepracoval ju napríklad Abu al-Husayn, (Woodward, 2007). Abu al-Husayn spísal ešte aj veľké dielo „*Kitab al-Kawatib al-Thabit al-Musawwar*“ v preklade *Kniha fixných hviezd*. Táto kniha popisuje štyridsaťosem súhvezdí a hviezdy, z ktorých sú zložené. V knihe Al-Sufi porovnával grécke a arabské súhvezdia a hviezdy.

V stredovekom období sa astronómii venovali aj v Číne, Japonsku či dokonca Amerike. Obnovený záujem o hviezdne mapy, nastal v Európe až s príchodom renesancie. V tomto období boli opätovne do Európy prinesené poznatky z antického sveta vďaka objavným plavbám do Orientu. Za najstaršie existujúce mapy hviezdnej oblohy, je považovaný manuskript pripisovaný Conradovi z Dyffenbachu z roku 1426, Tento rukopis obsahuje 4 mapy, avšak s pomerne malým počtom hviezd a obrysmi konštalácií, pomocou skicovania. Prvé tri mapy sú zostrojené v netradičnom lichobežníkovom zobrazení, podobnom Ptolemaiovmu zobrazeniu (viz Obr. 11). Posledná mapa z rukopisu je v azimutálnej ekvidištančnej projekcii a predpokladá sa, že dala základ neskorším atronomickým mapám, ktoré azimutálne projekcie používali (Woodward, 2007). Všeobecne na prelome 15. a 16. storočia dochádza k prechodu z azimutálnej ekvidištančnej projekcie do stereografickej projekcie (Woodward, 2007).



Obr. 11: Jedna z troch máp v lichobežníkovom zobrazení od Conrada z Dyffenbachu z roku 1426, zdroj: Dathe, Krüger (2018)

Od začiatku pätnásteho storočia, začali mapy hviezdnej oblohy prechádzať z nepresných zákresov s často výraznými dekoratívnymi ilustráciami k sofistikovaným dokumentom so systematickou hviezdou nomenklatúrou a vznikali aj prvé atlasy. Za ten najstarší je považovaný atlas „De le stelle fisse“ od Alessandra Piccolominiho z roku 1540, ktorý je prekvapivo napísaný v Taliančine a nie Latinčine, čím sa približuje

k bežnému človeku tej doby a nie len učencom. Obsahoval mapy pre každú z Ptolemaiových konštalácií samostatne, avšak súhvezdia zakreslil pomerne jednoducho bez ozdobných prvkov a tiež nepoužil mriežku na jednoduchšiu identifikáciu a určenie polohy hviezd (Woodward, 2007). V roku 1588 vznikol prvý moderný atlas hviezd od benátskeho kartografa a spisovateľa Giovanniho Paola Galuccia s názvom „Theatrum Mundi et Temporis“ s dodržaním geometrických zásad projekcie (Švejda, 1981).

Za najvýznamnejšieho autora nebeských máp renesančného obdobia je však považovaný Peter Apian narodený 16. apríla 1495 v meste Leisnig v Sasku. Podľa moderných štandardov ho možno považovať za jedného z najlepších matematikov svojej doby a obdobie jeho pôsobenia je nazývané aj „Vekom prieskumu“. Vyštudoval astronómiu, matematiku a kosmografiu a jeho prvou publikáciou bola mapa sveta, „Typus Orbis Universalis“ z roku 1520, po ktorej nasledovalo jeho prvé najvýznamnejšie dielo na poli astronómie, „Cosmographicus liber Petri Apiani mathematici studiose collectus“, neskôr nazývané „Cosmographia“. Vytlačil tiež jednu samostatnú mapu severnej oblohy, „Imagines syderum coelestium“, zachycujúcu 48 konštelácií, na ktorej popísal aj nové prvky a po nej nasledovalo rozsiahle dielo „Astronomicum Caesareum“, vydané v roku 1540, obsahujúce množstvo vtedy nových vedeckých nápadov, ako napríklad metódu výpočtu zemepisnej dĺžky pozorovaním zatmenia Slnka a prvé publikované tvrdenie, že chvosty komét vždy smerujú od Slnka (Barentine, 2016). Už niektoré diela od Petra Apiana sa vyznačujú vysokou presnosťou a evidentne neboli určené len ako umelecké diela (Barentine, 2016).

Celkovo sa vyčlenili 3 typy astronomických renesančných máp (Barentine, 2016):

*dekoratívne* - hviezdne mapy s bohatou výzdobou, maľbami zobrazujúcimi súhvezdia v najrozličnejších podobách a s nepresným zákresom objektov

*rigorózne* - hviezdne mapy s presným zaznačením hviezd

*špecializované* - hviezdne mapy určené na zákresy astronomických úkazov

Dalo by sa povedať, že typický vzhľad astronomických máp po matematickej stránke stanovil Albrecht Dürer (1471–1528), keď v roku 1515 vydal dvojicu máp, rozdelenú na 2 hemisféry (severnú a južnú) v azimutálnej projekcii. Táto forma znázorňovania oblohy bola v neskoršom období častá. Taktiež bolo bežným javom, že južná hemisféra zostávala buď neúplne zakreslenou alebo len odhadovane zakreslenou.

Južné súhvezdia, boli známe približne po obratník Kozorožca (Woodward, 2007). Tento stav zmenili až výpravné plavby Pietera Dirksza Keysera a Frederika de Houtmana na južnú pologuľu a ktorý zmapovali polohy južných hviezd v polovici 90-tych rokov 16. storočia. Peter Plancius z nich potom v rokoch 1597 až 1598 v spolupráci s Jodocusom Hondiusom mladším vytvoril dvanásť nových konštelácií, ktoré boli prvýkrát publikované na nebeskom glóbus (Woodward, 2007). Tento glóbus bol klasifikovaný pod názvom „Hondius A“ (Royal Museums Greenwich, 2020).

Prelomovým dielom sa stala „Uranometria“ bavorského kartografa Johanna Bayera (1572–1625), ktorý v tomto atlase ako prvý vyobrazil celú nebeskú sféru, celkový počet hviezd je odhadovaný na 1200 (Švejda, 1981). Vydaná bola v Augsburgu v roku 1603 a prekonala akýkoľvek nebeský atlas alebo mapu pred tým, v rozsahu aj v umení a stala sa štandardom pre svojich nástupcov. Bayer vykreslil hviezdy v Uranometrii na lichobežníkovú projekciu a určil polohy hviezd podľa katalógu Tycha de Braheho, ktorý bol druhým významným katalógom po Ptolemaiovom Almageste. Na zakreslenie južnej pologule použil poznatky výpravnej cesty Pietera Dirksza Keysera a Frederika de Houtmana. Najväčším prínosom diela je však nový systém označovania hviezd, ktorý sa používa dodnes. Hviezdy v nej dostali nový spôsob označovania písmenami gréckej abecedy podľa ich jasnosti. V každom súhvezdí dostala najjasnejšia hviezda označenie prvým písmenom gréckej abecedy a ostatné boli podľa klesajúcej jasnosti označené ďalšími písmenami (Woodward, 2007). Niet preto divu, že inšpirovala ďalšie atlasy tejto doby považované za odvodeniny z Uranometrie napríklad „Harmonia Macrocosmica“ z roku 1660 od holandsko-nemeckého kartografa Andrea Celaria alebo atlas „Uranographia“ z konca 17. storočia od gdaňského astronóma Johanna Hevelia, ktorý ju dokonca týmto dielom prekonal (Švejda, 1981). Netradičným zobrazením nebies sa do dejín kartografie zapísal koncom 17. storočia Ignace Gaston Pardies, francúzsky jezuit a profesor matematiky v Paríži, ktorý vytvoril sériu šiestich krásnych máp a súhvezdí. Všetkých šesť mapových dosiek sa spojí a vytvorí jednotný pohľad na Nebesá, ako je to vidieť zo Zeme. Pardies nakreslil mapy s využitím gnomónickej projekcie, ktorá namiesto planéty vizualizovala vesmír ako šesťstrannú kocku (viz Obr. 12). Táto metóda umožňuje presné meranie priamkami medzi ktorýmkoľvek bodom na mape. Ukázal tiež cesty mnohých dôležitých komét od roku 1577 do roku 1682, ktoré sa pohybovali konšteláciami. Týchto 6 máp bolo

publikovaných samostatne ako atlas „Globi coelestis in tabulas planas redacti descriptio“ v roku 1674 (David Rumsey Map Collection, 2020).



Obr. 12: Model spojených mapových listov hviezdneho „glóbusu“ od Ignaca Gastona Pardiesa, zdroj: David Rumsey Map Collection (2020)

Z obdobia, ktoré už nie je predmetom výskumu môžeme spomenúť napríklad Johna Hilla, britského botanika, zaoberajúceho sa aj astronómiou, ktorý v roku 1754 vydal dielo „Urania: or, A Compleat View of the Heavens“ a predstavil v nej 15 nových konštalácií (Barentine, 2016) alebo mapu „Planisferio celeste settentrionale tagliato sull' equatore“, zachytávajúcu južnú pologuľu, od Antonia Zatta z roku 1777 (A World of Antique Maps, 2020).

Od obdobia renesancie kartografia nebeskej sféry zaznamenávala neustály pokrok a okrem zakresľovania súhvezdí pokračovalo aj mapovanie konkrétnych nebeských telies, predovšetkým Mesiaca.

Samostatnú kategóriu tvoria tzv. špecializované hviezdne mapy zaznamenávajúce polohu astronomických javov, predovšetkým komét. Tie boli zaznačované ako líniové prvky. Kométové mapy často obsahovali ich dĺžku a smer chvosta. Najstaršie dochované avšak bližšie nepomenované mapy komét sú mapy od Paola dal Pozza Toscanelliho (viz Obr. 13), sledujúce cesty komét 1433, 1449–50 a 1456 a dva v roku 1457. Mapy spoločnosti Toscanelli sa líšia v spôsobe mapovania, od verzií od ruky po verzie s mriežkami a mierkami a mapovali kométy, minimálne na svoju dobu, presne. Tradícia mapovania komét sa neskôr usídlila v Nemecku a venoval sa jej aj Peter Apian vo svojom diele „Astronomicum Caesareum“ (Woodward, 2007).



Obr. 13: Ukážka mapy komét od Paola dal Pozza Toscanelliho, zdroj: Woodward (2007)

Ako je zrejmé z vyššieho popisu. Aj objavovanie a mapovanie nebeskej sféry prebiehalo postupne. Najprv sa znázorňovali len tie najzákladnejšie objekty, neskôr celé konštelácie, ktoré boli postupne tiež dopĺňané a bohato vyobrazené. Postupným objavovaním Zemegule dochádzalo aj k objavovaniu neba, zachytávaniu južných súhvezdí a jednotlivých hviezd, ale menil sa aj vývoj samotného zobrazovania, či už po



stránke matematickej (zmena projekcie) alebo estetickej, resp. umeleckej. Renesančné mapy znamenali veľký pokrok v mapovaní nebeskej sféry a trvalo ovplyvnili ďalší vývoj astronomickej kartografie (Woodward, 2007).

### 3.3 Kartografické znaky máp

Na základe historického vývoja sa menilo aj znázorňovanie objektov na mapách a tiež kompozičné prvky mapy. Zatiaľ čo v prvotných dielach išlo len o znázornenie samotných hviezdnych objektov v neskorších dobách sa mapy stávajú už aj výraznými umeleckými dielami.

#### 3.3.1 Znakový kľúč

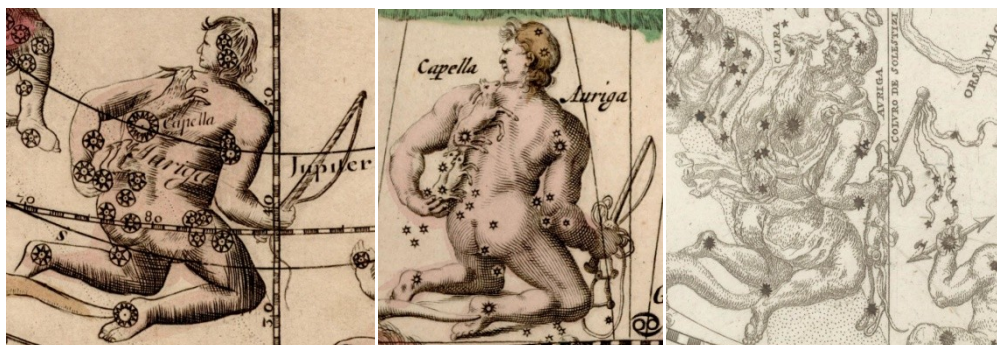
Keďže pre mapy hviezdnej oblohy predstavujú hviezdy primárny účel zhotovenia, táto podkapitola bude venovaná ich znázorneniu na historických mapách.

Napriek tomu, že konštrukcie máp sa držia kartografických zásad (použitie kartografickej projekcie, kompozičné prvky a pod.), pri znázorňovaní hviezd panuje istá nejednotnosť. Každý autor používa trochu iný vzor na znázornenie hviezd (viz Obr. 14). Hviezdy sú znázorňované buď ako mnohouholníky alebo mnohouholníky ohraničené kružnicou, orientované do všetkých smerov. V čom však istá zhoda v znázorňovaní panuje je zohľadňovanie významu resp. magnitúdy hviezd. Hviezdy s vyššou magnitúdou sú znázorňované väčším znakom t. j. sú väčšie, prípadne majú samostatný znak (napríklad vyšší počet cípov), ktorý ich odlišuje.



Obr. 14: Znáozornenie hviezdy Vega (súhvezdie Lyra) na mape Nieuwe Hemels Spiegel (vľavo), Door Dit HEMELS PLEYN (v strede) a Planisfero del globo celeste (vpravo), zdroj: Mapová sbírka UK (2019)

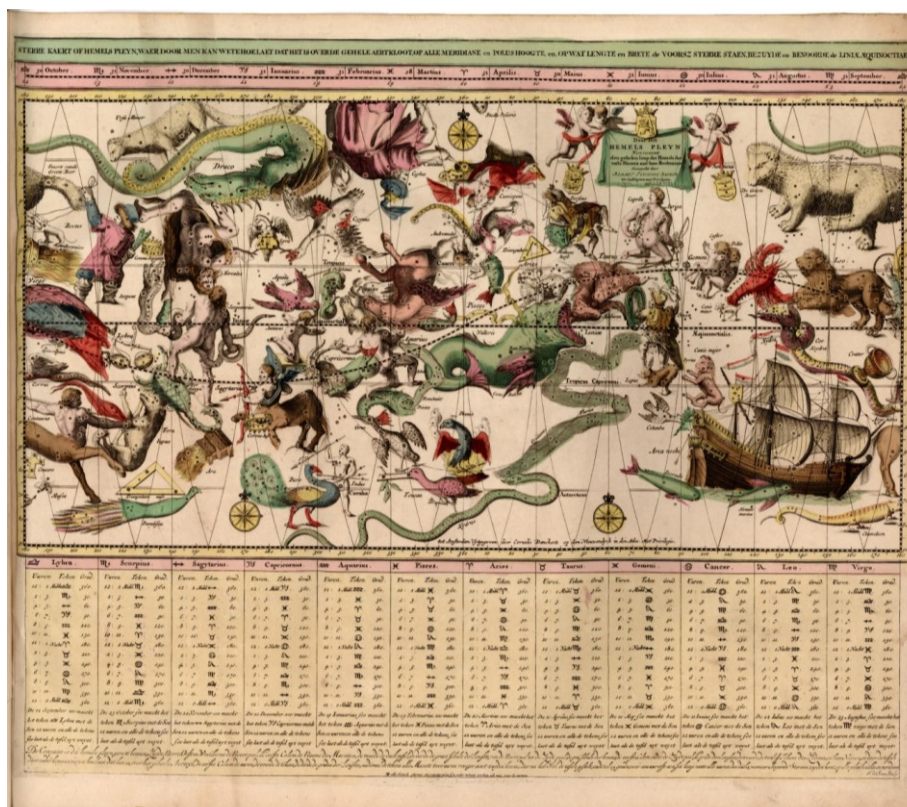
Samotné súhvezdia sú znázornené ako umelecké diela vyobrazené v podobe daného zvieraťa alebo objektu či postavy, ktorú majú znázorňovať. Ani tu nepanuje jednotnosť, každý autor si podobyzne súhvezdí zakreslí trochu inak, avšak v zásade nejde o veľké rozdiely (viz Obr. 15)



Obr. 15: Znárodnenie súhvezdia Auriga (Prievozník) na mape Nieuwe Hemels Spiegel (vľavo), Door Dit HEMELS PLEYN (v strede) a Planisfero del globo celeste (vpravo), zdroj: Mapová sbírka UK (2019)

### 3.3.2 Matematicko konštrukčné prvky

V období, ktoré je predmetom výskumu sú mapy hviezdnej oblohy znázorňované z veľkej časti rozdelené na 2 hemisféry v azimutálnom zobrazení. Nájdu sa však aj výnimky, ako napríklad mapa „Door Dit HEMELS PLEYN“, vytvorená medzi rokmi 1690 až 1710, ktorú zostrojil Remmet Teuniss Backer v Marinovom zobrazení (viz Obr. 16).



Obr. 16: Mapa Hemels Pleyne od Remmeta Teunissa Backera, zdroj: Mapová sbírka UK (2019)

Častým zobrazením (na základe nájdených exemplárov, výskum na početnosť zobrazení nebol vykonaný) je stereografická a ortografická projekcia. Mapy využívajú dvojité zákresy rovín a to rovníkovú a ekliptikálnu. V rovníkovej sústave sú zakreslené rovnobežky a poludníky a v ekliptikálnej rovine sú najčastejšie zobrazené poludníky a ekliptika bez rovnobežiek. Ekliptika často slúži ako ohraničenie mapového poľa pri azimutálnych zobrazeniach.

### **3.3.3 Popis mapy**

Medzi ďalšie prvky patria popisy máp a objektov na nich zachytených. Navýraznejším sú samotné názvy máp, tie bývajú zväčša trojslovné, najčastejšie v Latinskom, ale napríklad aj Nemeckom jazyku a využívajú ozdobné písmo. Okrem nich bývajú v mape aj iné popisy, napríklad pomenovanie kartuší, či dokonca celé slohy textu alebo tabuliek pod mapovými poľami, taktiež najčastejšie v Latinčine. Samotné objekty v mapovom poli (hviezdy, súhvezdia, znamenia zverokruhu, zemepisná sieť a pod.) boli však vždy pomenované latinsky, aj napriek tomu že názov mapy bol napríklad v Nemčine.

### **3.3.4 Kompozičné prvky mapy**

Medzi kompozičné prvky mapy sa radia hlavne kartuše. V mapách, ktoré sú predmetom výskumu ide buď o vyobrazenie významných osobností danej doby alebo astronomických úkazov ako napríklad rotácia Zeme okolo svojej osy alebo obeh okolo Slnka. Kartuše boli väčšinou umiestnené v rohoch máp, ale nájdeme ich aj v strede mapového diela. Legenda ako taká v mapách nie je, jediný náznak legendy sú popisy mapy, kartuší alebo tabuľkové hodnoty vzťahujúce sa k astronomickým úkazom.

Smerovka a mierka sa v mapách nevyskytuje a prípadné číselné údaje sú najčastejšie vzťahnuté k súradnicovej mierke ekliptiky alebo označeniu mesiacov v roku.

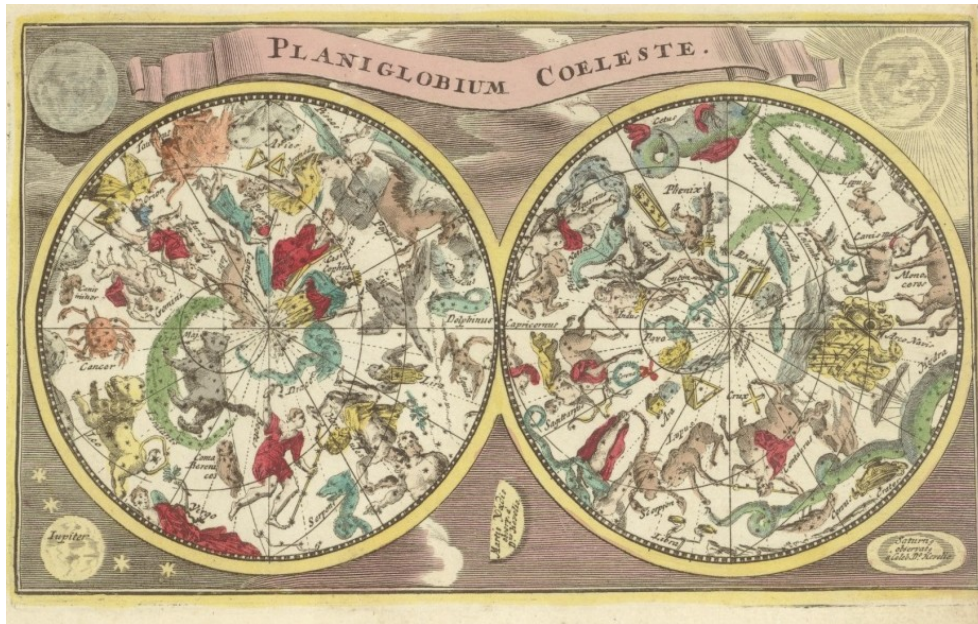
## 4. Analýza hviezdnych máp

V nasledujúcej kapitole bude podrobne popísaná metodika analýzy máp hviezdnej oblohy a budú predstavené konkrétne mapové diela, na ktorých analýza prebiehala. Cieľom analýz bolo zhodnotenie obsahovej úplnosti hviezdnych máp a porovnanie geometrickej presnosti znázornenia jednotlivých hviezd a súhvezdí so zohľadnením vplyvu presecie. Zahnutie astronomických vplyvov pri analýzach starých máp je jedným z podstatných prínosov práce, v praxi doposiaľ nebolo použité. Metodika analýzy je predstavená v kapitole 4.2. Analýza zahŕňa niekoľko fáz: zisťovanie kartografického zobrazenia a odstránenie jeho vplyvu, automatická detekcia hviezd, ktoré budú slúžiť ako identické body pri kontrole, s využitím obrazovej korelácie, výpočet astronomických súradníc hviezd na mape a ich transformácia do ekliptikálnych súradníc, zohľadnenie vplyvu precesie v čase a zhodnotenie presnosti analýzy. Automatizovanej detekcii predchádza úprava rastrového obrázka, spočívajúca v aplikácii niekoľkých filtrov, konkrétne mediánového a gaussovho (v tomto poradí), ktoré pomôžu znížiť mieru šumu a zvýšiť tak presnosť identifikácie hviezdy.

### 4.1 Zdrojové dáta

V druhej kapitole boli predstavené významné svetové aj české mapové zbierky a v tretej uvedené aj niektoré konkrétne mapy. Ako vstupné dáta pre náš výskum boli zvolené mapy z Mapové Sbírký PřF UK, poskytnuté naskenované vo formáte TIFF. Tieto diela boli zvolené najmä pre ich vzájomnú odlišnosť, každá mapa je niečím špecifická, napr. znázornením hviezd konkrétnou značkou, farebným prevedením či kompozičnými prvkami. Naopak spoločným znakom máp je rok vyhotovenia, resp. približne rovnaký rok vyhotovenia, použité kartografické zobrazenie a spôsob znázornenia súhvezdí za pomoci umeleckých nákresov. Najväčšou motiváciou o výskum daných diel bolo nadviazanie na bakalársku prácu „Analýza kartografických zobrazení atlasových máp planisféry v 17. storočí“. Všetky analyzované mapy sú totiž zhotovené v stereografickej projekcii, ktorá bola v bakalárskej práci určená ako najpoužívanejšie zobrazenie v danom období a tiež rozšírenie tejto bakalárskej práce o ďalšie postupy a možnosti analýzy máp. Ide o nasledovné diela:

**Mapa 1:** Planiglobium coeleste, Prívázok 3 k: Atlas Mundi, Autor: neuvedený, rok vydania: medzi 1700 a 1720



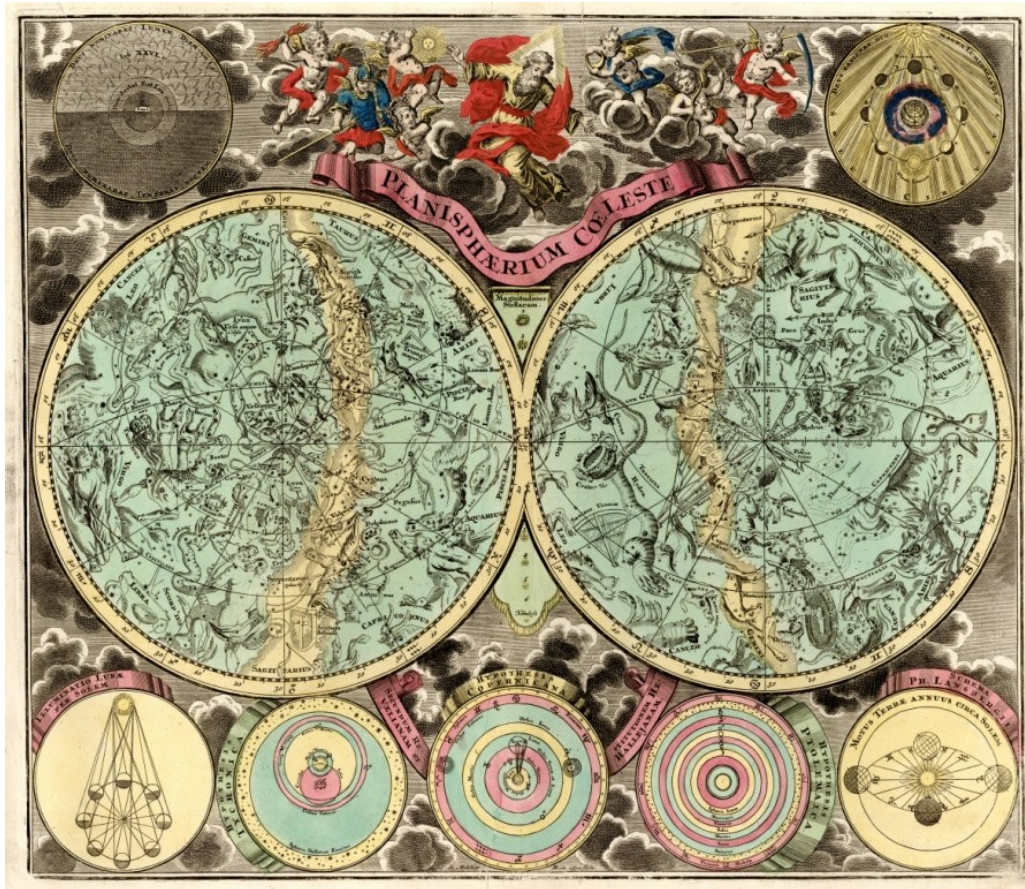
Obr. 17: Mapa Planiglobium coeleste, zdroj: Mapová sbírka UK (2019)

**Mapa 2:** Planisfero del globo celeste, Prívázok 49 k Atlante d'Italia e dei continenti, Autor: Francesco Brunacci (1640-1703), rok vydania 1687



Obr. 18: Mapa Planisfero del globo celeste, zdroj: Mapová sbírka UK (2019)

**Mapa 3:** PLANISPHAERIUM COELESTE, Príväzok 6 k: Atlas Europae et atlas astronomiae, Autor: Matthäus LinkSeutter (1678-1757), rok vydania: medzi 1717–1737



Obr. 19: Mapa PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Mapová sbírka UK (2019)

Druhým významným dátovým zdrojom, použitým pre identifikáciu hviezd bolo 5. upravené vydanie Bright Star Catalogue, dostupné online v digitálnej podobe (<http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/bsc5.html>), použité na základe odporúčania Astronomického ústavu ČR. Ide o katalóg obsahujúci 9110 najjasnejších, resp. voľným okom viditeľných hviezd, s určenou magnitúdou a rovníkovými súradnicami. Tieto súradnice sú však aktuálne, pretože hviezdy podliehajú mnohým vplyvom, ktoré menia ich súradnice resp. polohu v čase, a preto nie sú presné pre rok 1700, ktorý bol určený ako styčný pre výskum. Tento prepočet bude bližšie popísaný v podkapitole 4.2.4 Zmena astronomických súradníc. Hviezdy sú v katalógu uložené v nasledovnom tvare:

168	18AlpCas	BD+55139	3712	21609	21	I	561	AlpCas
003449.7	+555920004030.5	+563214121.42	-06.30	2.23	+1.17	+1.13	+0.60	K0IIIa
+0.053	-0.032	+0.016	-004	V?	21	6.7	64.4	AD 4 *

Údaje po poradí znamenajú:

168 - číslo hviezdy podľa harvardskej normy (od 1 do 9110)

18AlpCas - názov hviezdy podľa nomenklatúry Johanna Bayera/Johna Flamsteeda

BD+55139 - označenie podľa Bonner Durchmusterung/ Cordoba Durchmusterung katalógu

3712 - číslo hviezdy podľa Henry Draper Catalog

21609 - číslo hviezdy podľa Smithsonian Astrophysical Observatory Star Catalog

21 - číslo hviezdy podľa The Fifth Fundamental Catalogue Extension

I - označenie, pokiaľ je hviezda infračerveným zdrojom

561 - číslo hviezdy podľa Aitken Double Star Catalogue

AlpCas - nastavená identifikácia hviezdy

003449.7+555920004030.5+563214121.42-06.30 - toto dlhé číslo je jedno z najpodstatnejších, predstavuje totiž rovníkové súradnice hviezdy. Číslo 003449.7 predstavujú rektascenziu hviezdy pre epochu J1900 (00-hodiny, 34-minúty, 49.7-sekundy), +555920 je deklinácia hviezdy (kladná alebo záporná) pre epochu J1900 (55-stupne, 59-minúty, 20-sekundy), 004030.5 je rektascenzia hviezdy pre epochu J2000, +563214 je deklinácia pre epochu J2000, 121.42 je galaktická dĺžka a -06.30 galaktická šírka.

2.23 - vizuálna magnitúda

+1.17 - farba v UBV systéme (v B-V)

+1.13 - farba v UBV systéme (v U-B)

+0.60 - špecifikácia v systéme n\_R-I

K0IIIa - spektrálny typ

+0.053 - každoročný vlastný pohyb hviezdy v rektascenzii

-0.032 - každoročný vlastný pohyb hviezdy v deklinácii

- +016 - trigonometrická paralaxa
- 004 - heliocentrická radiálna rýchlosť (v km/s)
- V? - poznámka k radiálnej rýchlosti
- 21 - rotačná rýchlosť (v km/s)
- 6.7 - magnitúda
- 64.4 - separácia komponentov v magnitúde
- AD - identifikácia komponentov v magnitúde
- 4 - počet priradených komponentov
- \* - označenie že existuje záznam

## 4.2 Metodika analýz máp hviezdnej oblohy

Táto diplomová práca sa zaoberá analýzami vybraných máp nebeskej sféry z prelomu 17. a 18. storočia. Na ich podklade navrhuje metodiku, pomocou ktorej je možné tieto kartografické diela spracovávať a hodnotiť bez ohľadu na ich kartografické zobrazenie a dobu vzniku. Predovšetkým druhý faktor je významný, pretože objekty na nebeskej sfére menia voči pozorovateľovi na Zemi svoju polohu v priestore a čase, a to hlavne vďaka vplyvu precesie. V rámci navrhovanej metodiky bude tento vplyv zohľadnený a matematicky kompenzovaný. Inak povedané, objekty na súčasnej nebeskej sfére budú transformované do obdobia, v ktorom bolo kartografické dielo vyhotovené. Dobu vyhotovenia diela postačí poznať približne, zhruba s presnosťou 20 rokov. Vzhľadom k veľkému počtu objektov na hviezdnych mapách bolo priekročené k automatizovanému rozpoznávaniu jednotlivých typov hviezd s využitím obrazovej korelácie, vrátane ich stredov.

Vlastná metodika analýzy máp hviezdnej oblohy bude tvorená nasledovnými krokmi:

1. *Analýza kartografického zobrazenia mapy (viz Kap. 4.2.1).*  
Tento krok bude realizovaný automatizovane s využitím softwaru detectproj.
2. *Automatizované rozpoznanie hviezd s využitím obrazovej korelácie (viz Kap. 4.2.2).*



Na základe typov hviezd, ktoré sa na mape vyskytujú, sú vytvorené vzory, voči ktorým prebieha postupná obrazová korelácia obsahu mapy. Raster je nutné predspracovať aplikáciou vhodných filtrov (Mediánový, Gaussov) a prípadné duplicitné body sú eliminované.

3. *Reprojekcia pixelových súradníc na ekliptikálne (viz Kap. 4.2.3).*

Detekované pixelové súradnice sú konvertované na ekliptikálne a rovníkové tak, aby mohli byť následne identifikované vo hviezdnom katalógu.

4. *Zohľadnenie vplyvu precesie (viz Kap. 4.2.4).*

Kľúčovým krokom metodiky je zohľadnenie vplyvu precesie, pri ktorej je poloha objektov na nebeskej sfére v roku 2020 prepočítaná do doby vzniku kartografického diela. Tieto opravy hrajú veľmi významnú rolu pri analýze a nemôžu byť zanedbané.

5. *Identifikácia hviezd na starej mape (viz Kap. 4.2.5).*

Pre každú z hviezd sú metódou najbližšieho suseda nájdené v hviezdnom katalógu 3 najbližšie hviezdy. Z nich sa pokúsime identifikovať, ktorú z hviezd zóna predstavuje.

6. *Hodnotenie obsahu a geometrickej presnosti mapy (viz Kap. 4.2.6).*

Na základe identifikovaných párov hviezd na analyzovanej mape a v hviezdnom katalógu budú sčítané charakteristiky presnosti mapy, ktoré budú následne vizualizované metódou izočiar.

Na podkladových mapových dielach boli zistené pixelové súradnice stredov najznámejších hviezd ručným odčítaním na prvotné zorientovanie. Predpoklad je teda taký, že táto množina postačí na vytvorenie optimálneho prehľadu o presnosti máp ako aj o možnosti automatickej detekcie hviezd, keďže je nepravdepodobné, že by v 17.-18. storočí boli zakresľované hviezdy podrobnejšie a ich počty budú v rádu desiatok až stoviek, nie však tisícov. Keďže dané mapy patria skôr do kategórie umeleckých máp, vznikol predpoklad, že ich presnosť pravdepodobne nebude vysoká. Všetky mapy majú zónu rozdelenú na 2 hemisféry v ekliptikálnej sústave súradníc aj rovníkovej sústave súradníc.

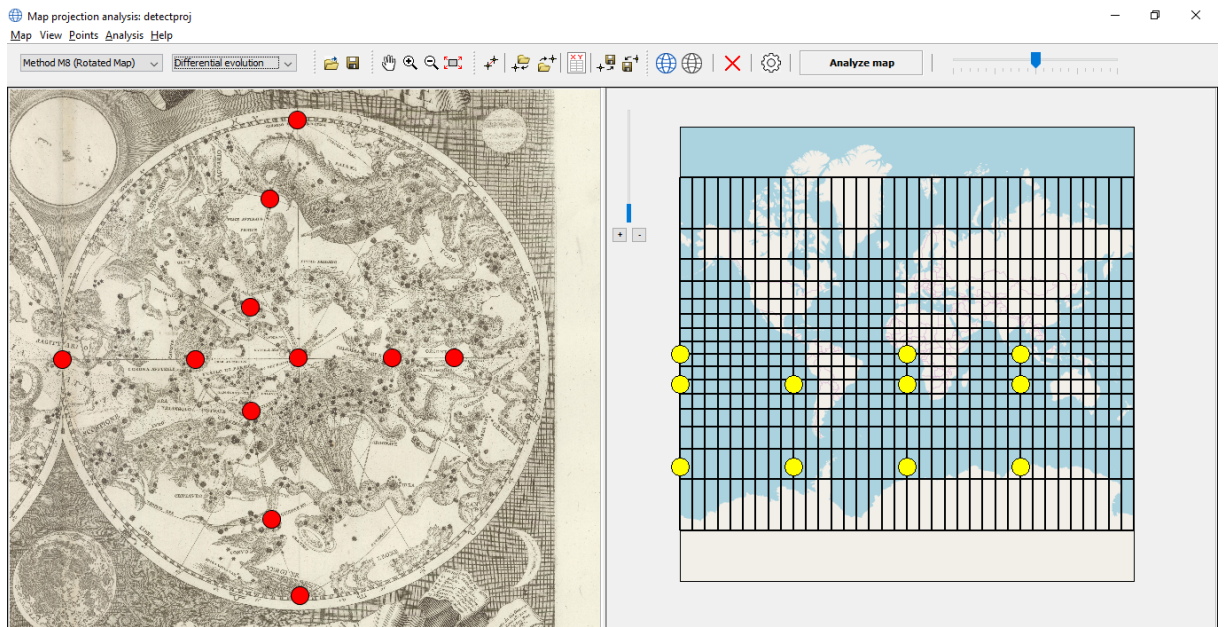
#### **4.2.1 Analýza kartografického zobrazenia**

Prvým krokom analýzy bolo určenie kartografického zobrazenia starej hviezdnej mapy. Pri jeho znalosti môžeme prepočítať pixelové súradnice  $[x, y]$  na ekliptikálne

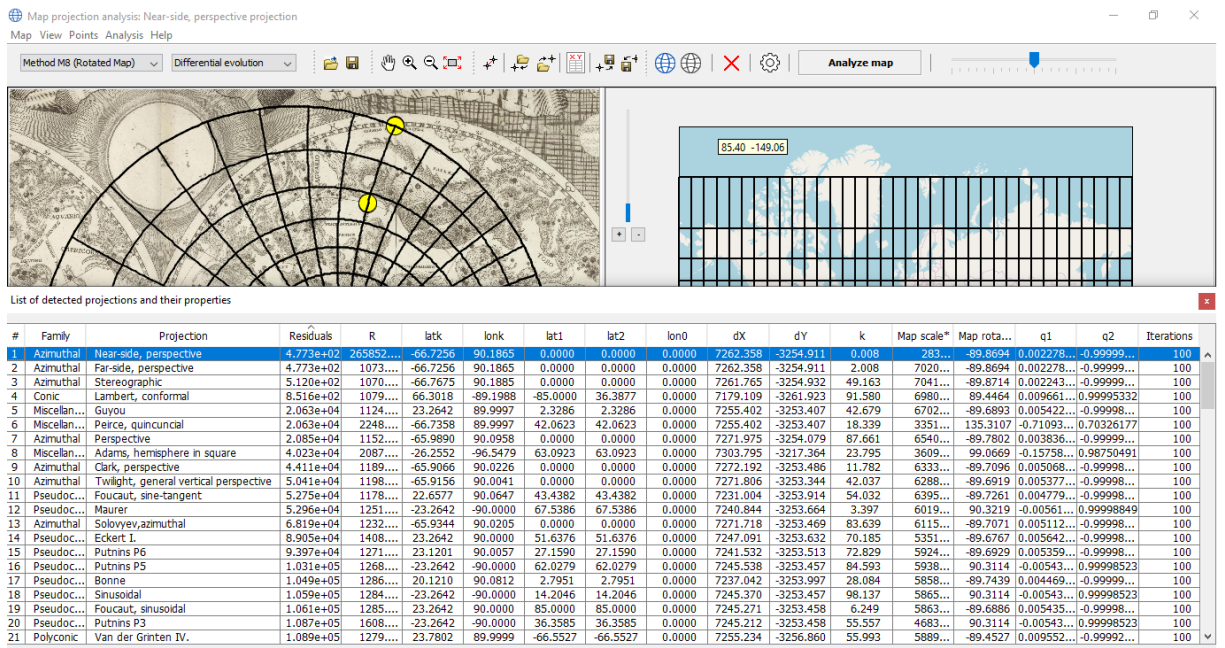
súradnice  $[x', y']$  a získať tak polohu hviezdy na nebeskej sfére. Detekcia kartografického zobrazenia môže prebehnúť automatizovane s využitím identických bodov (napr. v softwari detectproj) alebo vizuálnym zhodnotením starej mapy - často používaným zobrazením pre mapy nebeskej sféry v tomto období bola totiž stereografická projekcia. Obraz geografickej siete na vybraných mapách v tomto zobrazení je natoľko patrný, že bola identifikovaná vizuálne, avšak na odstránenie vplyvu zobrazenia je nutné zistiť aj parametre zobrazenia.

#### 4.2.1.1 Automatizovaná detekcia kartografických zobrazení

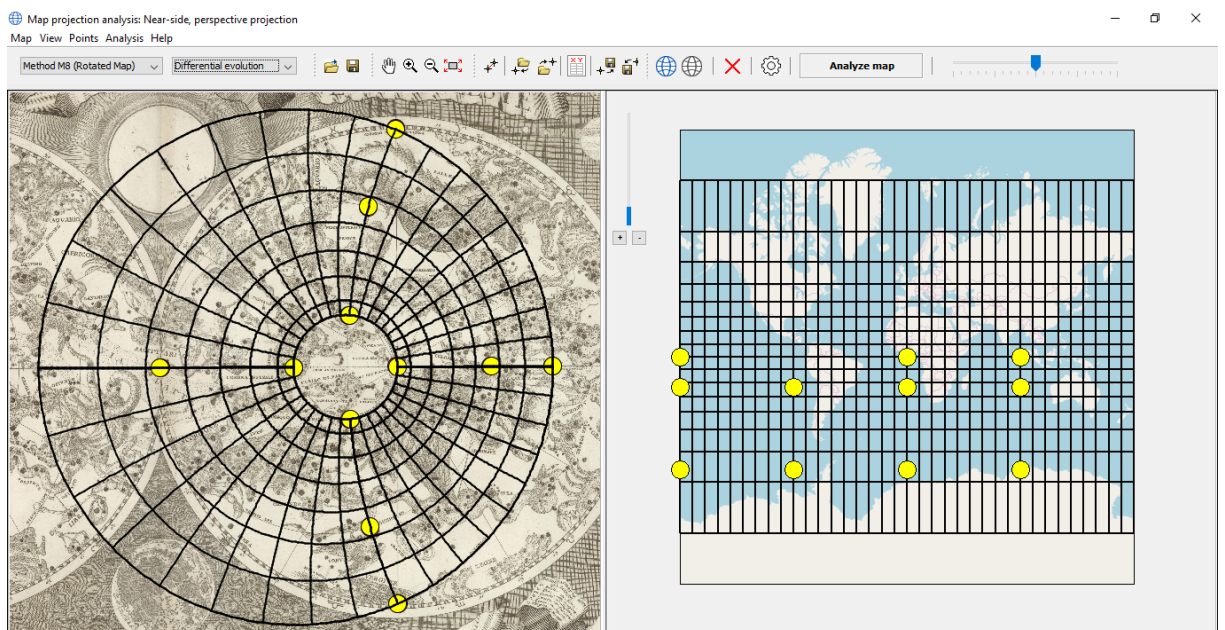
Podobne ako pri bakalárskej práci "Analýza kartografických zobrazení atlasových máp planisféry" (Považan, 2017) aj tu bolo kartografické zobrazenie zisťované prostredníctvom softwaru detectproj pomocou vlastnoručne určenej množiny bodov samostatne pre severnú a južnú hemisféru. Nepredstavovalo však hlavný cieľ výskumu, len bolo overené či zobrazenie starej mapy je skutočne stereografická projekcia. Volené boli identické body na priesečníkoch geografickej resp. ekliptikálnej siete, na každej mape resp. hemisfére bol určený rovnaký počet bodov t. j. 22 resp. 11 (viz Obr. 20). Keďže všetky mapy boli stočené, použitá bola výlučne metóda M8 a diferenciálna evolúcia. Výsledkom bolo overenie, že všetky mapy sú zostrojené v stereografickej projekcii v obecnej polohe (viz Obr. 21 a Obr. 22).



Obr. 20: Umiestnenie identických bodov na mape Planisfero del globo celeste a referenčnej mape v softwari detectproj, zdroj: Vlastný (2019)



Obr. 21: Výsledné zobrazenie mapy Planisfero del globo celeste v softwari detectproj podľa tabuľky presnosti, zdroj: Vlastný (2019)



Obr. 22: Obráz výsledného zobrazenia mapy Planisfero del globo celeste v softwari detectproj podľa tabuľky presnosti, zdroj: Vlastný (2019)

Podrobný postup zisťovania kartografických zobrazení, ktorý bol použitý aj v aktuálnej práci je bližšie uvedený v Považan (2017).

## 4.2.2 Automatická detekcia hviezd

Keď je zistené kartografické zobrazenie hviezdnych máp, môžeme pristúpiť k ich spracovaniu podľa ďalších bodov metodiky. Všetky nasledovné postupy už budú prebiehať v softwari Matlab. Pretože mapy hviezdnej oblohy obsahujú veľké množstvo hviezd, bolo namiesto ručného určovania identických bodov pristúpené k automatizovanej detekcii hviezd. Táto fáza je tvorená nasledovnými krokmi:

1. Definícia vzorov (viz Kap. 4.2.2.1).
2. Obrazová korelácia vzoru (viz Kap. 4.2.2.2).
3. Aplikácia filtrov (viz Kap. 4.2.2.3).
4. Detekcia stredov hviezd s využitím lokálnych maxím (viz Kap. 4.2.2.4).
5. Odstránenie duplicitných lokálnych maxím (viz Kap. 4.2.2.5).
6. Korekcia chybné detekovaných hviezd (viz Kap. 4.2.2.6).

### 4.2.2.1 Definícia vzorov

Pretože je každá mapa hviezdnej oblohy originálnym kartografickým dielom, pre znázornenie hviezd každý autor používa iný znakový kľúč. Na každom z analyzovaných kartografických diel sú navyše hviezdy rozlíšené podľa magnitúd čiže veľkosti a taktiež graficky rôznorodo (viz Obr. 23).



Obr. 23: Príklady zobrazenia hviezd na mape Planisfero del globo celeste (vľavo), Planiglobium coeleste (v strede) a PLANISPHAERIUM COELESTE (vpravo), zdroj: Mapová Sbíрка PŘF UK (2019)

Pre analyzované kartografické diela bolo teda nutné identifikovať typy hviezd a použiť ich ako trénovacie vzory pri obrazovej korelácii. S ich pomocou sa pokúsime identifikovať všetky ostatné im podobné hviezdy. Vstupný raster bol v rámci predspracovania prevedený na stupne sivej a následne prevedený z desatinného formátu na celočíselný. Podrobnejšie bude tento krok popísaný v kapitole 5.

V ďalšom texte označme raster ako  $f$  a pixelové súradnice rastra  $x, y$ . Raster je tvorený  $m$  riadkami a  $n$  stĺpcami. Zápis  $f(x, y)$  teda predstavuje pixel v  $x$ -tom riadku a  $y$ -ovom stĺpci. Trénovací vzor označme  $t$ , bude tvorený  $m_t$  riadkami a  $n_t$  stĺpcami. Pri výpočte obrazovej korelácie vzoru predpokladáme, že vzor  $t(u, v)$  sa nachádza na pozícií danej pixelovými súradnicami  $u, v$  a jej okolí ( $\pm 200$  pixelov).

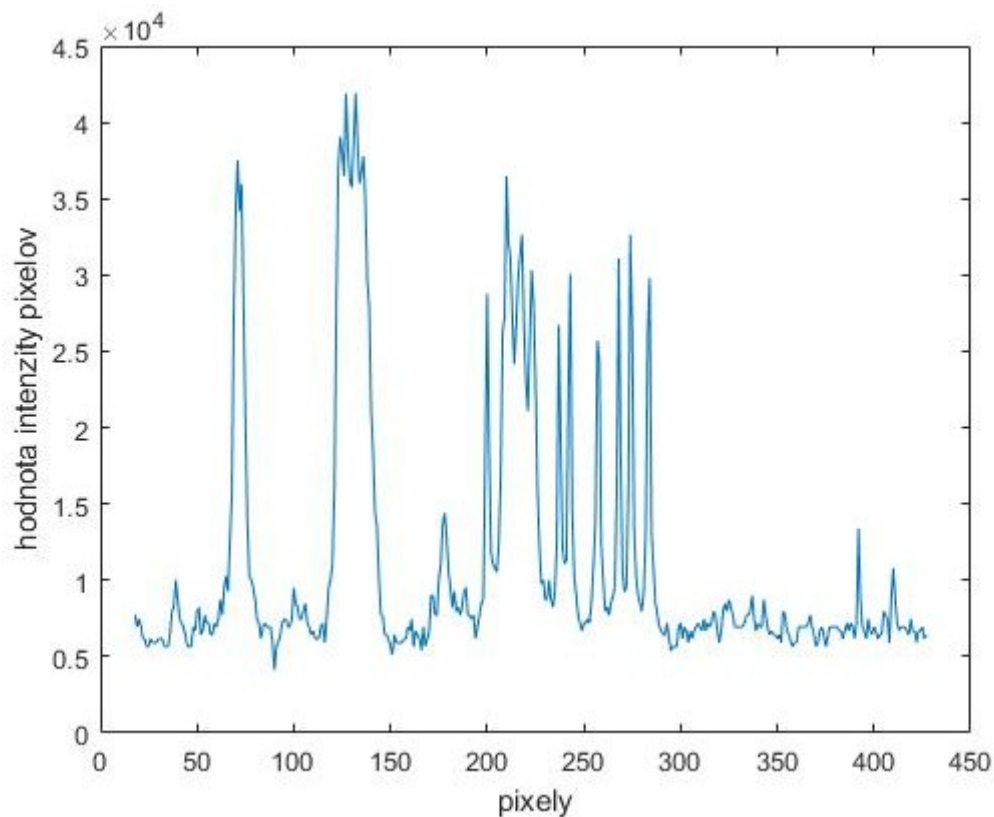
Tieto vybrané vzory sú potom porovnávané s celým obrázkom. Pre každú mapu boli zvolené 4 porovnávacie výrezy resp. typy hviezd na obrázku, podrobnejšie budú opísané v 5. kapitole.

Ilustráciu funkcionality jednotlivých krokov algoritmu, vykonáme na časti rastra znázorňujúcom riadok pixelov prechádzajúci stredom vybranej hviezd zahrňujúcom  $\pm 200$  pixelov, použitých ako vzor pri obrazovej koreláci (viz Obr. 24).



Obr. 24: Riadok pixelov prechádzajúci stredom vybranej hviezd v súhvezdí Veľký pes, zdroj: Mapová Sbíрка PřF UK (2019)

Farebný raster bol konvertovaný do sivotónového, hodnoty intenzity boli normalizované na interval  $\langle 0,1 \rangle$ . Znáznornenie hodnôt intenzity pixelov pzdĺž tejto úsečky je uvedené na Obrázku 25.



Obr. 25: Graf hodnoty intenzity pixelov pozdĺž zvolenej úsečky prechádzajúcej stredom hviezd v súhvezdí Veľký pes, zdroj: Vlastný (2019)

Z obrázka je patrné, že stred hviezd nie je možné identifikovať priamo, je nutné použiť metódy obrazovej korelácie. V mieste hviezd bude hodnota koeficientu korelácie dosahovať lokálne maximum.

#### 4.2.2.2 Obrazová korelácia vzoru

V ďalšom kroku budú jednotlivé tréningové vzory použité pri obrazovej korelácií, pomocou ktorej bude snaha nájsť v raste zhľuky pixelov podobných vlastností, ktoré zrejme predstavujú hviezdy. Nemusí to platiť vždy, môžu byť detekované aj iné segmenty v obraze, podobných tvarov, napr. priesečníky poludníkov a rovnobežiek, písmená, časti textu a pod.

Obrazová korelácia, vychádza z algoritmu obrazovej korelácie Fast Normalized Cross-Correlation (Lewis, 2001), pri ktorom je určovaný Pearsonov korelačný koeficient.

Použitie obrazovej korelácie na párovanie obrazu je motivované mierkou vzdialenosti, konkrétne druhou mocninou euklidovskej vzdialenosti:

$$d_{f,t}^2(u, v) = \sum_{x,y} [f(x, y) - t(x - u, y - v)]^2$$

kde  $f$  je obrázok, suma nad súradnicami  $x, y$  a  $t$  je tréovací vzor s pixelovými súradnicami  $u, v$  vo vzdialenosti  $d$ . Vzťah je možné prepísať do tvaru:

$$d_{f,t}^2(u, v) = \sum_{x,y} [f^2(x, y) - 2f(x, y)t(x - u, y - v) + t^2(x - u, y - v)]^1$$

kde výraz  $t^2(x - u, y - v)$  je konštantný. Pokiaľ budeme považovať výraz  $\sum f^2(x, y)$  za konštantu, potom má ostávajúci výraz tvar:

$$c(u, v) = \sum_{x,y} f(x, y)t(x - u, y - v)$$

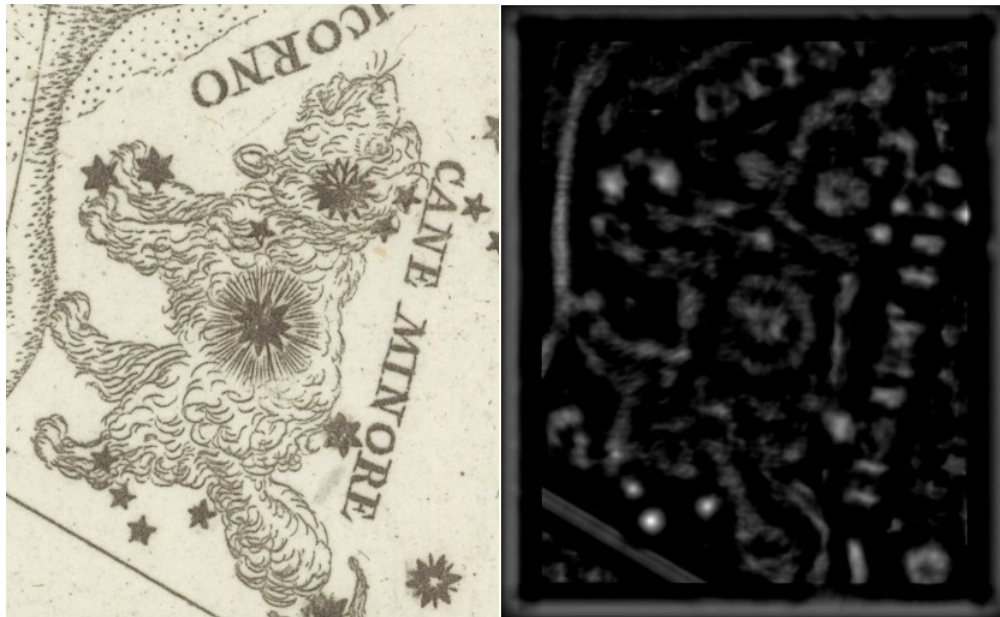
a predstavuje mieru podobnosti medzi tréovacím vzorom a časťou rastra.

Korelačný koeficient prekonáva problémy pri párovaní obrázkov normalizáciou obrazu a prvkov vektora na jednotkovú vzdialenosť, čím sa získava kosínusový typ korelačného koeficientu:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}][t(x - u, y - v) - \bar{t}]}{\left\{ \sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [t(x - u, y - v) - \bar{t}]^2 \right\}^{0.5}}$$

kde  $\bar{t}$  je stredná hodnota prvku a  $\bar{f}_{u,v}$  je stredná hodnota  $f(x, y)$  z oblasti pod prvkom. Veličinu  $\gamma(u, v)$  je nazývaná normalizovaným koeficientom obrazovej korelácie.

Hodnotu koeficientu  $\gamma(u, v)$  sú teda počítané opakovane pre každú pozíciu vzoru  $t(u, v)$  v raste. Pokiaľ je lokálna zhoda v pixely  $u, v$  bližšia, blíži sa  $\gamma(u, v)$  hodnote 1. Pokiaľ je lokálna zhoda nízka, blíži sa  $\gamma(u, v)$  hodnote 0. Hodnoty 1 sa v sivotónovom rasti prejavujú ako biele miesta a hodnoty 0 ako tmavé miesta. Výsledkom predošlého postupu je vytvorenie obrazu so zvýraznenými hodnotami pixelov, podobných vzoru (viz Obr. 26).

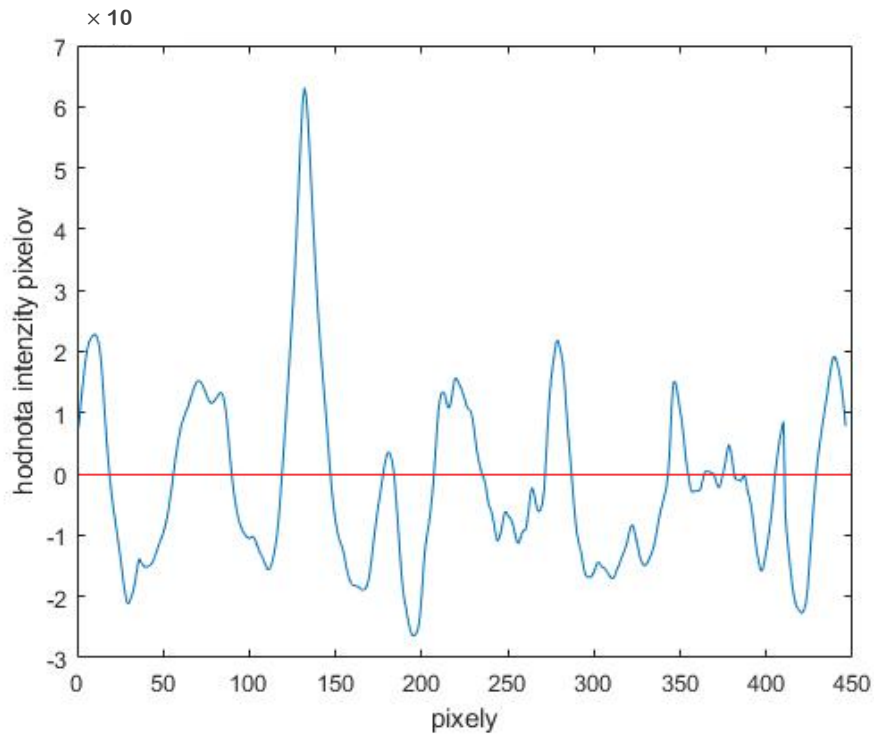


Obr. 26: Zvýraznené hodnoty pixelov pred (vľavo) a po vykonaní normalizovanej krížovej korelácie (vpravo), bez stanovenia prahovej hodnoty, zdroj: Vlastný (2019)

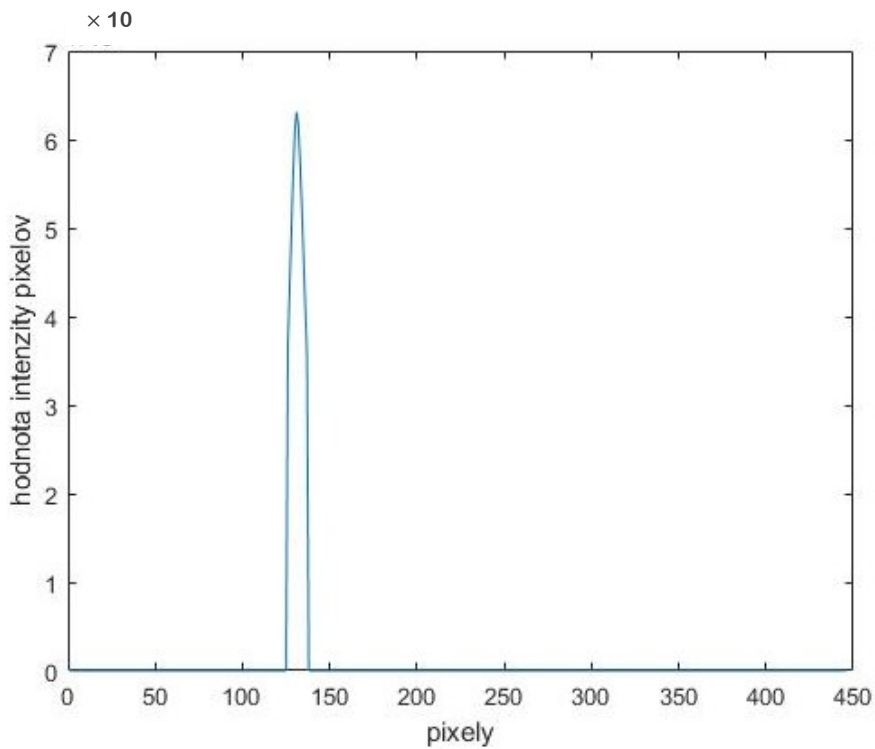
Z obrázka je patrné, že hodnoty  $\gamma(u, v)$  sú nenulové na mnohých miestach rastra, ktoré vykazujú mieru podobnosti so vzormi, ale nepredstavujú hviezdy. Ako už bolo uvedené vyššie, ide hlavne o časti kartuší, textu, či inú grafickú výzdobu. Analýzou rastra bolo zistené, že v týchto miestach platí pre hodnoty koeficientu  $\gamma(u, v) < \gamma_{min}$ , kde  $\gamma_{min}$  je prahová hodnota. V praxi bola zvolená  $\gamma_{min} = 0,51$  (viz Obr. 27).

V ďalšom kroku preto budú všetky tieto pixely  $\gamma(u, v) < \gamma_{min}$  nahradené hodnotou  $\gamma(u, v) = 0$ . Je patrné, že dôjde k potlačeniu všetkých lokálnych maxím, ktoré pre nás nie sú zaujímavé a predstavujú „falošné“ hviezdy. Výsledok tejto operácie je riadok pixelov znázornený na Obrázku 28.





Obr. 27: Graf hodnoty korelačného koeficientu  $\gamma$  pozdĺž zvolenej úsečky prechádzajúcej stredom hviezdy v súhvezdí Veľký pes, červenou čiarou nastavená prahová hodnota koeficientu  $\gamma_{min} = 0.51$ , zdroj: Vlastný (2019)



Obr. 28: Aplikácia prahovej hodnoty  $\gamma_{min}$  na riadok pixelov s použitým vzorom hviezdy (súhvezdie Veľký pes), zdroj: Vlastný (2019)

Z grafu je patrné, že hodnoty koeficientu  $\gamma(u, v)$  sa zvyšujú od okrajov hviezdy k jej stredu, kde sa zrejme nachádza lokálne maximum. Toto lokálne maximum je nutné v ďalších krokoch presnejšie lokalizovať. Ďalej je nutné stanoviť prahovú hodnotu  $\gamma(u, v)$ , od ktorej bude pixel považovaný za „podobný“.

Dôsledok tejto operácie pre raster je znázornený na Obrázku 29. Pixely s hodnotou intenzity menšou než je prahová hodnota boli nahradené čiernou farbou, čím sa znížilo množstvo objektov vykazujúcich mieru zhody a zostali len zhluky pixelov s vyššou pravdepodobnosťou než  $\gamma_{min}$ .



Obr. 29: Aplikácia prahovej hodnoty  $\gamma_{min}$  na časť rastra s použitým vzorom hviezdy (súhvezdie Veľký pes), zdroj: Vlastný (2019)

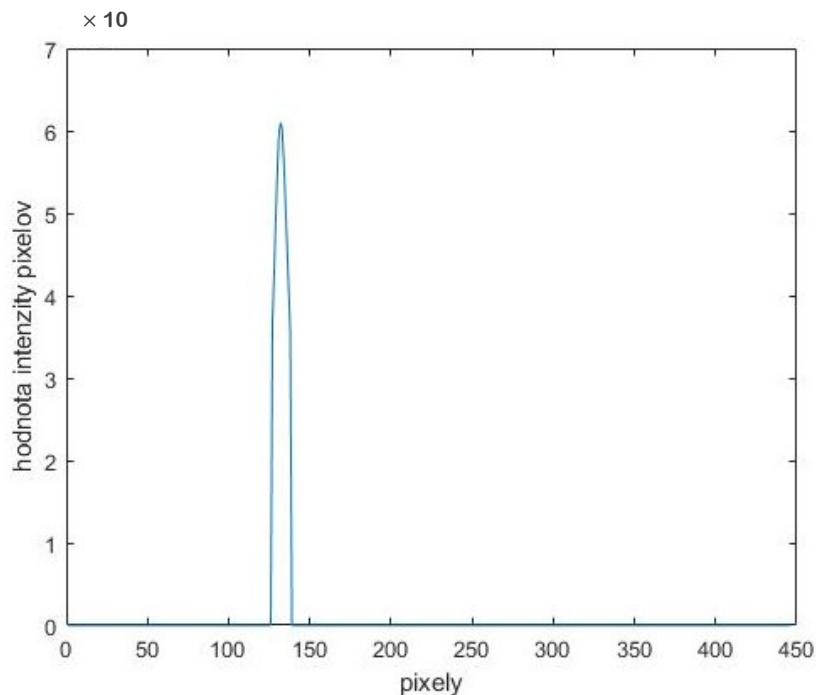
#### 4.2.2.3 Aplikácia filtrov

Pred vlastnou detekciou lokálnych maxím je nutné previesť ešte niektoré úpravy rastra vzniknutého obrazovou koreláciou. Ide hlavne o odstránenie šumu. Následne sú na obrázok aplikované dva filtre.

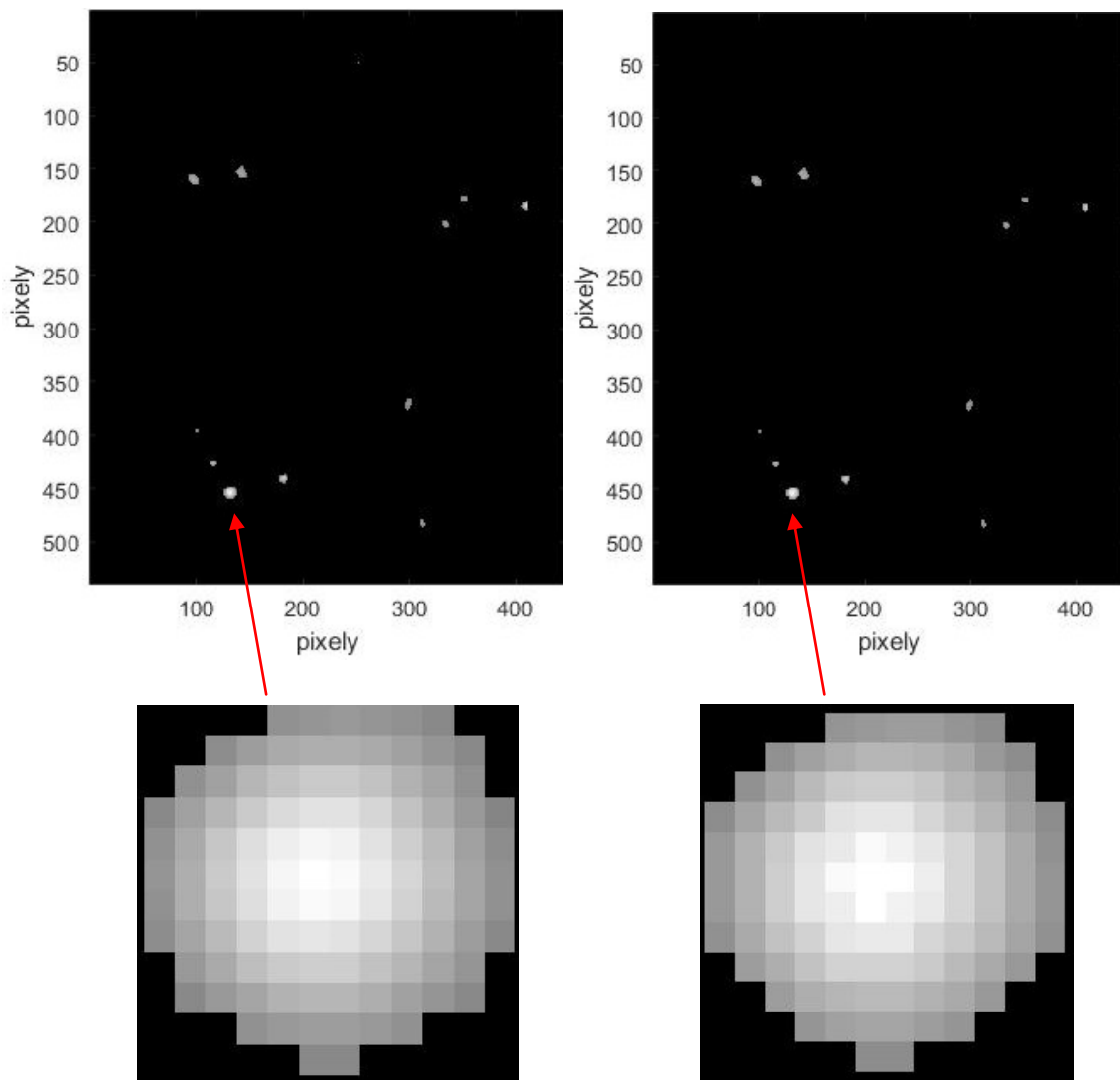
1. Mediánový filter.

## 2. Gaussov filter.

**Mediánový filter.** Mediánový filter patrí medzi nízkofrekvenčné filtre. Mediánová filtrácia vykazuje veľmi dobré výsledky napríklad pri potlačení špecifického šumu čiernych a bielych bodov v obraze. V jednodimenzionálnej podobe sa mediánový filter skladá z posuvného okna, ktoré tvorí nepárny počet pixelov (3x3 resp. 5x5). Medián  $\zeta$  je vybraný prvok zo súboru usporiadaných hodnôt, kedy pri nepárnom počte prvkov je to prvok  $\zeta = P_{n+1}/2$ , a teda prostredná hodnota usporiadaných prvkov od minima po maximum. Pokiaľ sa vyskytne páry počet prvkov, vyberú sa prostredné dva prvky s tým, že sa ďalej utvorí ich aritmetický priemer. Napríklad v priestore 3x3 je medián piata najvyššia hodnota prvku a v priestore 5x5 trinásť najvyššia hodnota. Princíp filtrácie spočíva v posune okna masky po obraze a výbere mediánu z hodnôt ležiacich pod touto maskou (Všetička, 2010). V Matlabe bol tento krok vykonaný pomocou funkcie „medfilt2“, ktorá využíva okno o veľkosti 3x3. Po aplikácii mediánového filtra došlo k odstráneniu šumu (viz Obr. 30). Ako šum sú interpretované lokálne maximá s malou „šírkou“, typicky 1-2 pixely, ktoré po aplikácii mediánového filtra zmizli (viz Obr. 31).



Obr. 30: Graf hodnoty korelačného koeficientu  $\gamma$  po aplikácii mediánového filtra, zdroj: Vlastný (2020)



Obr. 31: Vybraná hviezda pred (vľavo) a po úprave Mediánovým filtrom (vpravo), zdroj: Vlastný (2020)

**Gaussov filter.** Druhým filtrom je Gaussov filter (viz Obr. 32), ktorý funguje podobne ako predošlý s tým rozdielom, že dáva väčšiu váhu tým bodom, ktoré sa blížia stredu. Toto rozdelenie je dané Gaussovou krivkou, ktorej maska bude aproximovať. Ide v podstate o rozšírenie filtra priemerovania, Gaussovým rozložením, s tým rozdielom, že používa jadro, ktoré reprezentuje model vrcholu Gaussovej krivky. Výsledný obraz je daný vzťahom:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}},$$

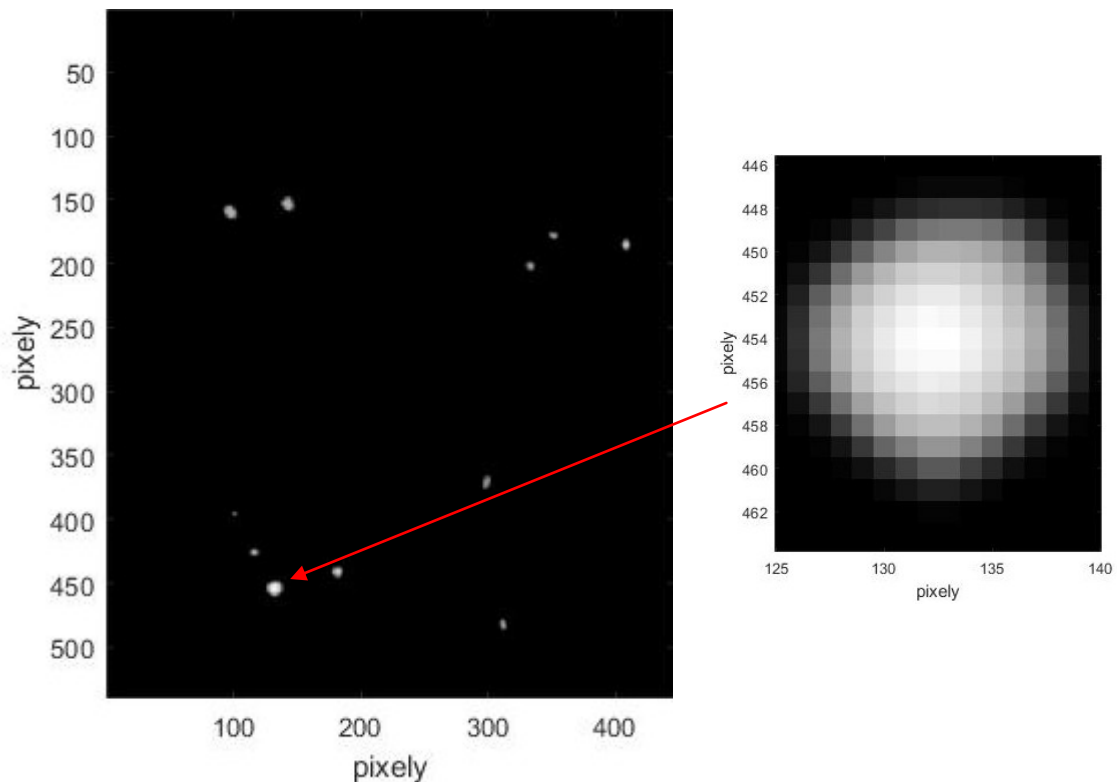
$G(x, y)$  = rekonštruovaný obraz (súradnice pixelu v obrazovej matici)

$\sigma^2$  = rozptyl

Konvolučná maska môže mať napríklad tento tvar:

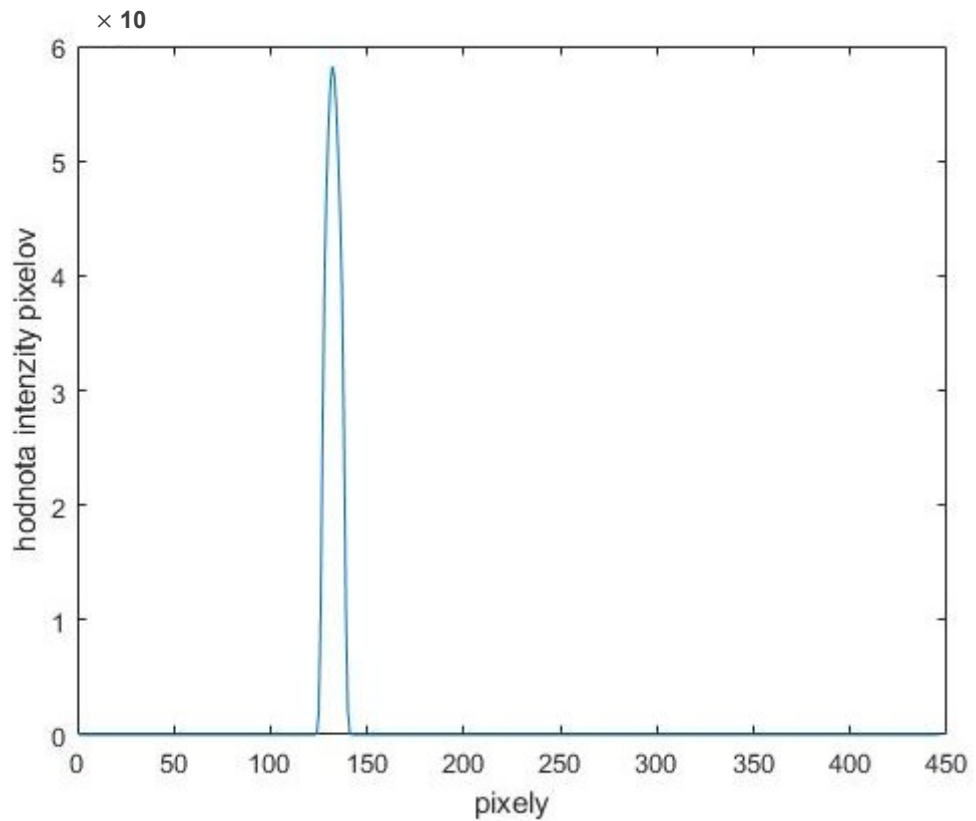
$$\frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Súčet všetkých hodnôt masky dáva po vynásobení váhou pred maticou hodnotu 1, takže sa nemení celková svetlosť obrazu (Polachová, 2018).



Obr. 32: Vybraná hviezda po úprave Gaussovým filtrom (vpravo), zdroj: Vlastný (2020)

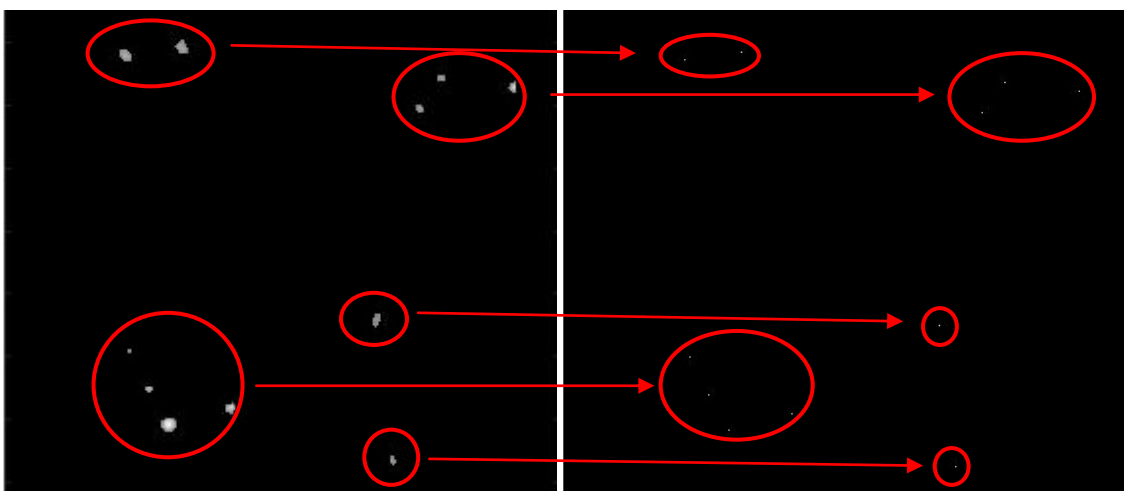
V Matlabe je tento krok vykonaný pomocou funkcie „`fspecial('gaussian', hsize, sigma)`“, s voliteľnou možnosťou nastavenia veľkosti posuvného okna (`hsize`) a štandardnej odchýlky (`sigma`). Dôsledok aplikácie Gaussovho filtra je fakt, že dochádza k zvýrazneniu lokálnych maxím, a to sploštením a rozšírením ich okolia a posunom k hodnote 1. Väčšina pixelov v okolí lokálneho minima nadobúda intenzity blízkej 1, javia sa teda ako biele. Krivka v pixeloch blízkyh lokálnemu maximu rastie oveľa pomalšie (je takmer konštantná), lokálne maximum je ostrejšie ohraničené a pixely v jeho blízkosti majú blízke hodnoty (viz Obr. 33). Výsledný obraz je jasnejší, avšak nezachováva hrany, ktoré ale v tomto prípade nie sú až tak podstatné, keďže hviezdy majú okrúhle tvary.



Obr. 33: Graf hodnoty korelačného koeficientu  $\gamma$  po aplikácii Gaussovho filtra, zdroj: Vlastný (2020)

#### 4.2.2.4 Detekcia stredov hviezd s využitím lokálnych maxím

Po aplikovaní filtrácie, je potrebné v nájdených obrazoch hviezd vyhľadať pixely s maximálnou hodnotou (lokálne maximá), ktoré budú reprezentovať stredy hviezd (viz Obr. 34).



Obr. 34: Identifikácia regionálnych maxím hviezd v súhvezdí Malý pes, zdroj: Vlastný (2020)

Pri detekcii sa vychádza z myšlienky, že v oblasti lokálneho maxima bude funkcia  $\gamma(u, v)$  mať konkávny priebeh. Hľadané lokálne maximum:

$$\bar{\gamma}(u, v) = \max_{k=-1,0,1} \{\gamma(u+k, v+k)\},$$

sa nachádza v prostredí pixelu  $(u, v)$  submatice o rozmeroch 3x3 pixelov, pokiaľ žiadna z hodnôt  $\gamma(u+k, v+k)$ ,  $k = -1,0,1$  nie je väčšia ako  $\gamma(u, v)$ . Pre detekciu lokálneho maxima v raste je možné použiť nasledujúcu podmienku zapísanú v skriptovacom jazyku Matlab:

$$\text{if}(\gamma(u, v) \geq \gamma(u-1, v-1) \ \&\& \ \gamma(u, v) > \gamma(u-1, v) \ \&\&$$

$$\gamma(u, v) \geq \gamma(u, v+1) \ \&\& \ \gamma(u, v) > \gamma(u+1, v-1) \ \&\&$$

$$\gamma(u, v) > \gamma(u, v+1) \ \&\& \ \gamma(u, v) > \gamma(u+1, v-1) \ \&\&$$

$$\gamma(u, v) > \gamma(u+1, v) \ \&\& \ \gamma(u, v) > \gamma(u+1, v+1)$$

$$x_{max} = u$$

$$y_{max} = v$$

Podmienka vychádza z požiadavku, aby v centrálnom pixely  $(u, v)$  bola hodnota  $\gamma(u, v)$  najvyššia, v priamych susedoch  $(u-1, v)$ ,  $(u+1, v)$ ,  $(u, v+1)$  nebola hodnota  $\gamma$  menšia a v diagonálnych susedoch  $(u-1, v-1)$ ,  $(u-1, v+1)$ ,  $(u+1, v-1)$ ,  $(u+1, v+1)$  bola hodnota  $\gamma$  menšia, viz nasledujúca tabuľka:

	$v-1$	$v$	$v+1$
$u-1$	$\gamma(u-1, v-1)$	$\gamma(u-1, v)$	$\gamma(u-1, v)$
$u$	$\gamma(u, v-1)$	$\gamma(u, v)$	$\gamma(u, v+1)$
$u+1$	$\gamma(u+1, v-1)$	$\gamma(u+1, v)$	$\gamma(u+1, v+1)$

Tento krok je možné v Matlabe tiež realizovať s použitím funkcie "imregionalmax". Problémom je fakt, že aj v rámci jednej hviezdy môže existovať viac lokálnych maxím  $\gamma(u, v)$  (viz Obr. 35). Toto je typické pre veľké hviezdy alebo u kartografických znakov, ktoré sú zložité. Odstránenie tohto problému bude popísané v nasledujúcej kapitole.



Obr. 35: Ukážka viacnásobnej detekcie lokálnych maxím v niektorých prípadoch, zdroj: Vlastný (2020)

#### 4.2.2.5 Odstránenie blízkych lokálnych maxím

V ďalšej fázi je nutné odstrániť možné duplicitné lokálne maximá v rámci jednej hviezdy, ktoré boli vyššie popísanou metodikou detekované. Pokiaľ by bol tento krok vynechaný, došlo by k nekorektnému, viacnásobnému započítaniu jednej hviezdy, čo by negatívne ovplyvnilo výsledok analýz.

Pre zjednodušenie predpokladajme, že vzor  $t$  je štvorcový, platí teda:  $m_t = n_t$  a počet lokálnych maxím nie je veľký, spravidla menší než 10. Pre každé detekované lokálne maximum v pixely  $p_m = [u_m, v_m]$  je nájdená množina  $P_k$  jeho  $k$ -najbližších susedov  $p$ , ktorých vzdialenosť je menšia než veľkosť vzoru:

$$P_k = \{p, d(p, p_{m,i}) \leq m_t\}.$$

Nové lokálne maximum je určené v ťažisku takej množiny, predstavuje teda strednú hodnotu:

$$p_m = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k p_i.$$

Týmto postupom bude efektívne odstránená väčšina duplicitných lokálnych maxím, hľadané lokálne maximum  $p_m$  je umiestnené blízko skutočného stredhu hviezdy. Výsledok tejto operácie je znázornený na Obrázku 36.





Obr. 36: Odstránenie viacnásobných lokálnych maxím metódou *k* najbližších susedov, zdroj: Vlastný (2020)

Avšak v niektorých prípadoch, kedy hviezda vykazuje menšiu zhodu so vzorom, lokálne maximá môžu byť umiestnené nesymetricky vzhľadom k predpokladanému stredu hviezdy. Potom aj ich stredná hodnota bude umiestnená mimo predpokladaný stred hviezdy.

#### 4.2.2.6 Korekcia chybne detekovaných hviezd

Posledný krok automatizovanej detekcie predstavuje manuálnu kontrolu detekovaných hviezd. Pokiaľ došlo k chybnjej detekcii lokálneho maxima, je vykonaná oprava jeho polohy. U niektorých hviezd, spravidla vďaka chybe zakresu, nedošlo k ich rozpoznaní obrazovou koreláciou (hodnota  $\gamma(u, v)$  bola menšia než stanovený prah). Takéto hviezdy je nutné manuálne pridať do zoznamu.

Veľký problém predstavuje detekcia lokálnych maxím v miestach, ktoré hviezdami v skutočnosti nie sú (viz Obr. 37). Tieto miesta, spravidla grafická výzdoba mapy, museli byť zo zoznamu manuálne odstránené.



Obr. 37: Príklad Detekovaných lokálnych maxím v miestach (čísla, písmená, okraj mapy), ktoré nepredstavujú hviezdy, zdroj: Vlastný (2020)

### 4.2.3 Transformácia pixelových súradníc na rovníkové

Keďže pracujeme s naskenovanými mapami, nemáme možnosť zistiť rovníkové súradnice (rektascenziu a deklináciu) priamo. Získané súradnice  $[u, v]$  z predošlého postupu sú pixelové súradnice stredov hviezd, ktoré je nutné inverznými rovnicami prepočítať na rovníkové  $[\alpha, \delta]$ . Pre tento krok je nutné poznať kartografické zobrazenie starej mapy. Pripomeňme, že všetky vybrané mapy hviezdnej oblohy boli vytvorené v stereografickej projekcii.

Postup je tvorený dvomi fázami:

1. Transformácia pixelových súradníc  $[u, v]$  na ekliptikálne  $[\beta, \lambda]$ .
2. Transformácia ekliptikálnych súradníc  $[\beta, \lambda]$  na rovníkové  $[\alpha, \delta]$ .

#### 4.2.3.1 Transformácia pixelových súradníc na ekliptikálne

V prvom kroku je stanovená veľkosť pixelu  $p$ :

$$p = \frac{25.4}{1000 * DPI}$$

Pixelové súradnice  $[u, v]$  s počiatkom v ľavom hornom rohu sú prepočítané na skutočný rozmer:

$$X = pu, \quad Y = pv.$$

Súradnicový systém  $(0, X, Y)$  má odlišnú orientáciu osy  $Y$  (záporný smer). Ďalej bolo nutné spočítať redukciu pixelových súradníc k ekliptikálnemu pólu  $P_e'[X_{pe}, Y_{pe}]$ , ktorý sa nachádzal mimo tento počiatok. Každá mapa ho má inde a na každej mape sa nachádzajú hneď 2 (severná a južná hemisféra). Pre výpočet inverzných rovníc stereografickej projekcie bol zvolený lokálny súradnicový systém  $(P_e', X', Y')$  s počiatkom v póle ekliptiky a klasickou (t. j. matematickou) orientáciou súradnicových ôs.

Pixelové súradnice ľubovoľného bodu sú určené redukciami:

$$X' = X - X_{pe'},$$

$$Y' = -(Y - Y_{pe}).$$

Súradnice  $[X', Y']$  predstavujú obrazy ekliptikálnych súradníc v stereografickej projekci  $[\beta, \lambda]$ . Keďže mapa má kruhovitý tvar, bolo nutné zistiť ešte aj polomer sféry  $\rho$ . Ten bol vypočítaný ako aritmetický priemer vzdialeností stredu mapy od 4 krajných bodov:

$$\rho = \frac{P_s + P_j + P_z + P_v}{4},$$

ležiacich na ohraničujúcej kružnici, kde  $P_s$  je severný bod  $P_j$  južný,  $P_z$  západný a  $P_v$  východný (viz Obr. 38).



Obr. 38: Merané vzdialenosti k okrajovým bodom mapového poľa, od stredu mapy, použité na výpočet polomeru sféry, zdroj: Vlastný (2020)

Hodnota  $\rho$  bola použitá pre výpočet polomeru  $R$  náhradnej sféry, z rovnice stereografickej projekcie v polárnom tvare:

$$\rho(\beta = 0) = 2R \tan \frac{90-\beta}{2},$$

platí:

$$R = \frac{\rho}{2 \tan \frac{90-\beta}{2}}$$

Pretože ide o rovníkovú kružnicu, kde  $\beta = 0$ , tak:

$$R(\beta = 0) = \frac{\rho}{2}.$$

Zobrazovacie rovnice stereografickej projekcie v pravouhlom tvare sa zapíšu:

$$X' = 2R \tan\left(\frac{90-\beta}{2}\right) \sin \lambda,$$

$$Y' = -2R \tan\left(\frac{90-\beta}{2}\right) \cos \lambda.$$

Ich inverzné formy majú tvar:

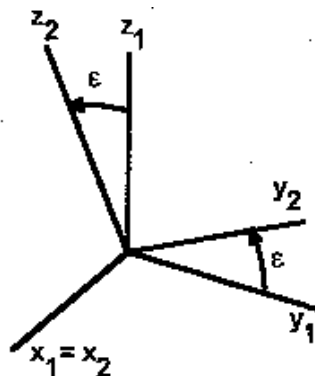
$$\lambda = \arctg\left(\frac{Y'}{X'}\right),$$

$$\beta = 90 - \arctg\sqrt{\frac{X'^2+Y'^2}{4R^2}} = 90 - \arctg\sqrt{\frac{X'^2+Y'^2}{\rho^2}}.$$

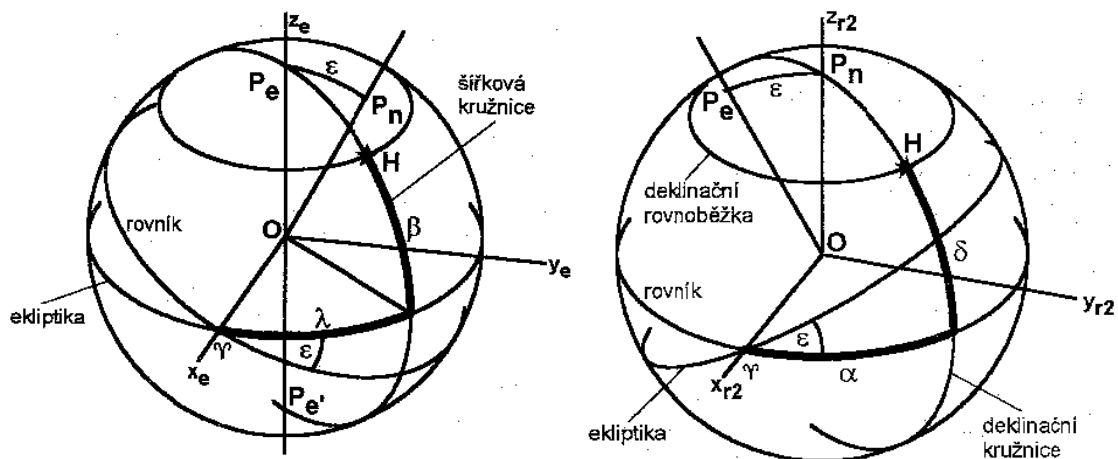
Pomocou týchto zobrazovacích rovníc budú prepočítané pixelové súradnice hviezd na ekliptikálne.

#### 4.2.3.2 Transformácia ekliptikálnych súradníc na rovníkové

V ďalšej fáze je nutné zistiť rovníkové súradnice, čiže deklináciu  $\delta$  a rektascenziu  $\alpha$  z ekliptikálnych súradníc  $\beta$ ,  $\lambda$ . Medzi ekliptikálnymi súradnicami (nameranými priamo z mapového listu) a rovníkovými súradnicami (identifikujúce skutočnú polohu hviezd) (viz Obr. 39 a 40). Dochádza k transformácií súradníc, pretože ekliptikálne súradnice sú oproti rovníkovým natočené približne o uhol  $\varepsilon = 23.7^\circ$  (ekliptikálny pól sa nachádza inde ako rovníkový) vzhľadom k rovníku. Ekliptikálne súradnice hviezd sú určené z pixelových súradníc stredov hviezd s využitím vyššie uvedených vzťahov.



Obr. 39: Transformácia pomocou rotačnej osy X, zdroj: Kabeláč, Kostecký (2009)



Obr. 40: Rozdiel medzi ekliptikánou [S<sub>e</sub>] a rovníkovou súradnicovou sústavou [S<sub>r2</sub>], zdroj: Kabeláč, Kostecký (2009)

Pre prepočet súradníc medzi oboma systémami je nutné prejsť ku karteziánskemu súradnicovému systému. Osy rovníkovej sústavy sú označené ( $X_r Y_r Z_r$ ) a osy ekliptikálnej potom ( $X_e Y_e Z_e$ ). Karteziánske súradnice bodu v oboch sústavách je možné určiť pomocou:

$$\begin{pmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \cos \lambda \\ \cos \beta & \sin \lambda \\ \sin \beta & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \cos \alpha \\ \cos \delta & \sin \alpha \\ \sin \delta & 1 \end{pmatrix}.$$

Medzi oboma sústavami súradníc platí vzťah:

$$\begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = R_x(-\varepsilon) \begin{pmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{pmatrix},$$

kde matica rotácie má tvar:

$$R_x(-\varepsilon) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ 0 & -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{pmatrix},$$

uhol  $\varepsilon$  predstavuje sklon ekliptiky.

Z karteziánskych súradníc sa následne prejde späť k rovníkovým súradniciam:

$$\alpha = \arctan \frac{Y_r}{X_r},$$

$$\delta = \arcsin Z_r.$$

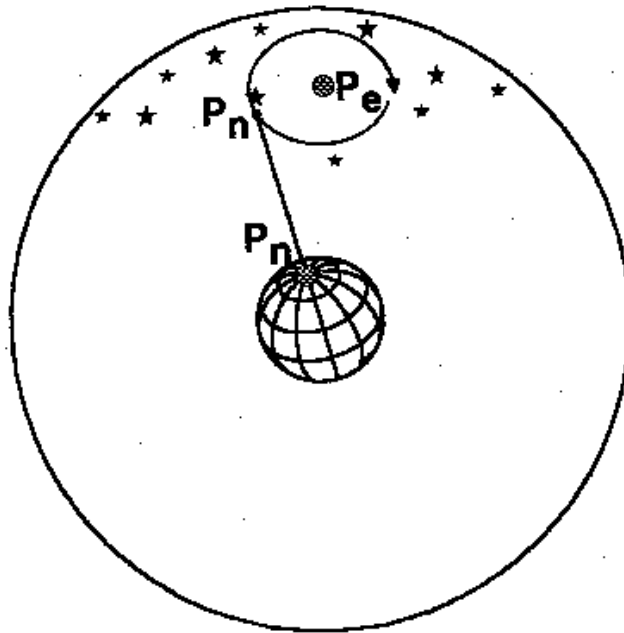
S ich znalosťou už je možné porovnávať historické polohy hviezd s aktuálnymi pozíciami.

#### **4.2.4 Zmena astronomických súradníc**

Najznámejšími pohybmi našej planéty sú jednoznačne obeh okolo Slnka a rotácia okolo vlastnej osy. Oba tieto pohyby majú vplyv na pozorovanie nebeskej oblohy. Kvôli pohybu okolo vlastnej osy a tým striedaniu dňa a noci, dochádza k zatieneniu ostatných hviezd Slnkom a v dôsledku obehu Zeme okolo Slnka sa zase mení pozorovateľná plocha oblohy (napríklad súhvezdie Orion je v našich končinách možné kompletne pozorovať len v určitých mesiacoch, podobne ako mnohé iné súhvezdia). Keďže tieto pohyby sú v rámci ľudského života citelné a povšimnuteľné, je ich význam nespochybniteľný. Avšak nie sú to jediné pohyby, ktoré Zem vykonáva. Existujú ešte ďalšie pohyby Zeme, ktoré spoločne s ďalšími faktormi, predstavíme v tejto kapitole. Hoci z ľudského pohľadu možno nie sú postrehnuteľné, majú vplyv na zmenu súradníc nebeských telies.

##### **4.2.4.1 Precesia**

Precesiu by sme zjednodušene mohli nazvať ako spätný pohyb jarného bodu proti zdanlivému pohybu Slnka po ekliptike, pričom sklon ekliptiky voči rovine rovníku sa nemení resp. mení sa mimoriadne málo v porovnaní s precesiou rotačnej osy. Je spôsobená gravitačným pôsobením Slnka, Mesiaca a planét na sploštenú Zem. Ide o veľmi zložitý pohyb svetových pólov a rovín, ktorý je znázornený v jednoduchej podobe na Obrázku 41. Precesia je považovaná za sekulárny (vekovitý) pohyb. Delí sa na lunisolárnu precesiu, ktorú spôsobuje Mesiac a Slnko a planetárnu precesiu, ktorá vzniká rušivým pôsobením planét slnečnej sústavy na polohu roviny dráhy Zeme, čiže ekliptiku. Celkový vplyv týchto dvoch javov sa nazýva generálna precesia (Kabeláč, Kostelecký, 2009).



Obr. 41: Zjednodušený zákres precesného pohybu, zdroj: (Kabeláč, Kostecký, 2009)

Precesiú objavil v roku 140 p. n. l. Hipparchos, pri pozorovaní hviezdy Spica, ktorá sa oproti pozorovaniu od Timocharisa v roku 300 p. n. l. líšila v ekliptikálnej dĺžke  $\lambda$  asi o  $2^\circ$ , v ekliptikálnej šírke  $\beta$  nastávala pomerne dobrá zhoda. Toto pravidlo zistil aj u ďalších hviezd, správne preto usúdil, že rozdiel vzniká posunom základného bodu t. j. jarného bodu. V tom čase sa jarný bod nachádzal v súhvezdí Barana, v súčasnosti je v súhvezdí Rýb a do budúcnosti bude postupovať do súhvezdia Vodnára. Aj svetový severný pól sa pohybuje medzi stálicami v dôsledku precesie. V súčasnosti sa nachádza blízko hviezdy Polárky, avšak okolo roku 4000 to už bude hviezda  $\gamma$  Cephei a neskôr okolo roku 14000 sa našou „Polárkou“ stane hviezda Vega v súhvezdí Lyra (Kabeláč, Kostecký, 2009).

Lunisolárna precesia má na zmenu nebeských súradníc najväčší vplyv, až  $50,3''$  za rok a hlavne, jej perióda je až 25800 rokov (tzv. platónsky rok), čo znamená že jej dopady od roku 1700 budú pozorovateľné. Planetárna precesia má síce väčšiu periódu, až 70000 rokov, ale posun jarného bodu je len  $0,125''$  za rok. Precesia sa tak stáva primárnym prvkom, na ktorý sa výskum bude zameriavať a posudzovaná bude zmena súradníc hviezd na starých mapách oproti súčasnému stavu (Kabeláč, Kostecký, 2009).



Na posúdenie presnosti hviezdnych máp je nutné tento vplyv započítať. Dnes majú hviezdy určené svoje rovníkové súradnice (rektascenziu  $\alpha$  a deklináciu  $\delta$ ) ku štandardnej epoche J2000,0 resp. súradniciam vypočítaných pre rok 2000. Tento údaj je označený ako epocha  $t_1$ . Rok 1700, ktorý bol určený ako priemerná hodnota, pre výpočty súradníc skúmaných máp je označený ako epocha  $t_2$ .

Prechod od rovníkovej sústavy epochy  $t_1$  do rovníkovej sústavy epochy  $t_2$  je potom daný tromi rotáciami:

1. o hodnotu  $-\zeta$  okolo osy  $z$ ,
2. o hodnotu  $\theta$  okolo novej polosy  $y$ ,
- 3 o hodnotu  $-\omega$  okolo novej polosy  $z$ .

Názorne je tento postup ukázaný na Obrázku 42. Maticu rotácie určíme zložením týchto rotácií zľava:

$$P = R_z(-\omega) \times R_y(\theta) \times R_z(-\zeta),$$

kde:

$$R_z(-\omega) = \begin{pmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$R_z(-\zeta) = \begin{pmatrix} \cos \zeta & -\sin \zeta & 0 \\ \sin \zeta & \cos \zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Maticu  $P$ :

$$P = \begin{pmatrix} X_x & Y_x & Z_x \\ Y_x & Y_x & Y_x \\ Z_x & Z_x & Z_x \end{pmatrix},$$

nazývame precesnou maticou.

Smerové kosínusy ôs rovníkovej sústavy epochy  $t_1$  v súradnicovej sústave epochy  $t_2$  predstavujúce prvky  $P$  majú tvar:

$$X_x = \cos \zeta \cos \theta \cos \omega - \sin \zeta \sin \omega,$$

$$Y_x = -\sin \zeta \cos \theta \cos \omega - \cos \zeta \sin \omega,$$

$$Z_x = -\sin \theta \cos \omega,$$

$$X_y = \cos \zeta \cos \theta \sin \omega + \sin \zeta \cos \omega,$$

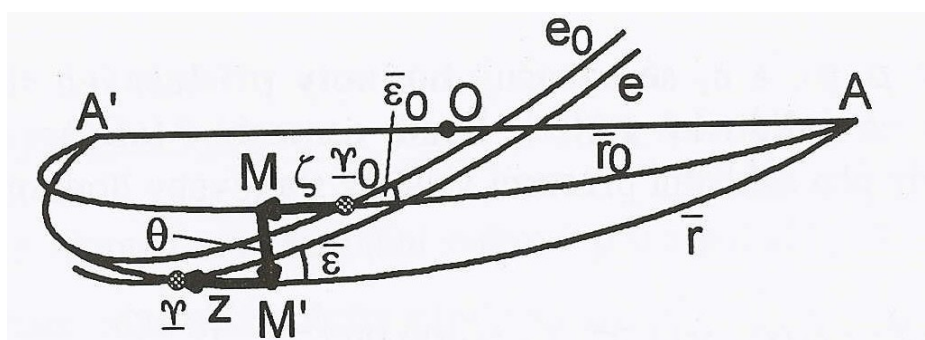
$$Y_y = -\sin \zeta \cos \theta \sin \omega + \cos \zeta \cos \omega,$$

$$Z_y = -\sin \theta \sin \omega,$$

$$X_z = \cos \zeta \sin \theta,$$

$$Y_z = -\sin \zeta \sin \theta,$$

$$Z_z = \cos \theta,$$



Obr. 42: Prechod od rovníkovej sústavy epochy  $t_1$  do rovníkovej sústavy epochy  $t_2$ , zdroj: (Kabeláč, Kostecký, 2009)

Tri precesné uhly sú definované Medzinárodnou astronomickou úniou (1976):

$$\zeta = (2306.2181'' + 1.39656''T - 0.000139''T^2)t + (0.30188'' - 0.000344''T)t^2 + 0.017998''t^3,$$

$$z = (2306.2181'' + 1.39656''T - 0.000139''T^2)t + (1.09468'' + 0.000066''T)t^2 + 0.018203''t^3,$$

$$\theta = (2004.3109'' - 0.85330''T - 0.000217''T^2)t - (0.42665'' + 0.000217''T)t^2 - 0.041833''t^3,$$

kde  $T$ :

$$T = \frac{J_s - 2451545}{36525},$$

je interval v juliánskych storočiach medzi základnou epochou J2000.0 a epochou výpočtu  $J_s$ . Pretože Bright star catalog je vzťahnutý k epoche J2000.0, potom  $T = 0$ . Parameter  $t$ :

$$t = \frac{t_1 - t_2}{36525},$$

je interval meraný v juliánskych storočiach, kde  $t_2 = 1700$  a  $t_1 = 2000$ . Precesia tiež ovplyvňuje polohu jarného bodu, dochádza k zmene sklonu ekliptiky. Je možné ju vyjadriť v tvare definovanom Medzinárodnou astronomickou úniou (1976):

$$\varepsilon = 23^\circ 26' 21.448'' - 46.8150''T - 0.00059''T^2 + 0.001813''T^3.$$

Túto hodnotu je nutné vziať do úvahy pri vzájomnom prevode medzi súradnicovými systémami.

Na Obrázku 42 je patrný vplyv precesie na rovníkové súradnice. Hodnota  $\bar{r}_0$  - predstavuje strednú polohu rovníka v epoche 0 (J2000),  $e_0$  - strednú polohu ekliptiky v epoche 0 (J2000),  $\bar{Y}_0$  - strednú polohu jarného bodu v epoche 0 (J2000). Hodnota  $\bar{r}$  - predstavuje novú polohu rovníka v epoche  $t_1$ ,  $e$  - novú polohu ekliptiky v epoche  $t_1$ ,  $\bar{Y}$  - novú polohu jarného bodu v epoche  $t_1$ . Roviny rovníka v epoche 0 a epoche  $t_1$  sa pretnú v priamke  $A, A'$  a rovina kolmá na túto priamku, prechádzajúca počiatkom  $O$ , pretne obe polohy rovníka v bodoch  $M, M'$ .

Označme, že  $x_2, y_2, z_2$  sú pravoúhle rovníkové súradnice epochy  $t_2$  získavané zo súradníc  $x_1, y_1, z_1$  epochy  $t_1$ .

Transformačné vzťahy medzi oboma karteziánskymi súradnicovými systémami potom majú tvar:

$$x_2 = X_x x_1 + Y_x y_1 + Z_x z_1,$$

$$y_2 = X_y x_1 + Y_y y_1 + Z_y z_1,$$

$$z_2 = X_z x_1 + Y_z y_1 + Z_z z_1.$$

Geometrický význam precesných uhlov je nasledovný:

$90^\circ - \zeta$  = rektascenzia výstupného uzla Q rovníka epochy  $t_2$  na rovníku epochy  $t_1$ .

$90^\circ - \omega$  = rektascenzia uzla Q počítaná od jarného bodu epochy  $t_2$ .

$\theta$  = sklon rovníka epochy  $t_2$  k rovníku epochy  $t_1$ .

#### 4.2.4.2 Nutácia

Nutácia je periodický pohyb svetového pólu okolo jeho strednej polohy. Takto ovplyvnený pól (spoločne s precesiou) sa potom nazýva „pravý pól“. Rozlišujeme nutáciu v ekliptikálnej dĺžke  $\lambda$  a ekliptikálnej šírke  $\beta$  (Kabeláč, Kostelecký, 2009).

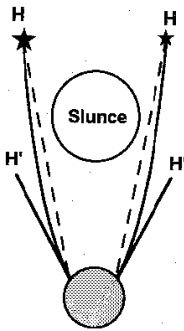
Podobne ako precesia, aj nutácia je spôsobená gravitačným pôsobením Slnka, Mesiaca a planét na sploštenú Zem a tiež sa delí na lunisolárnu a planetárnu, ale na rozdiel od precesie ide o periodický pohyb, pričom okrem jarného bodu sa mení aj sklon ekliptiky. Základná perióda (lunisolárnej) nutácie je 18,62 roka s amplitúdou 9,21" v ekliptikálnej šírke  $\beta$  a 17,2" v ekliptikálnej dĺžke  $\lambda$  a je spôsobená pohybom uzlovej čiary Mesiaca t. j. stáčaním roviny dráhy Mesiaca voči rovine ekliptiky (Kabeláč, Kostelecký, 2009). Keďže perióda nutácie je oproti precesii niekoľkonásobne menšia ako aj jej vplyv na zmenu súradníc, nebude nutácia zahrnutá do výskumu.

#### 4.2.4.3 Aberácia

Ročnú aberáciu objavil v roku 1728 anglický astronóm Bradley, ktorý na základe merania polohy hviezdy  $\gamma$  Draconis zistil, že behom roka sa pohybuje okolo svojej strednej polohy po elipse s hlavnou polosou 20". Neskôr bol tento úkaz pozorovaný aj u iných hviezd a príčinou zdanlivého pohybu je ročný obeh Zeme okolo Slnka (Kabeláč, Kostelecký, 2009).

Aberácia je v astronómii vysvetlená ako zmena smeru svetelného lúča prichádzajúceho od zdroja svetla k pozorovateľovi. Tá je spôsobená konečnou rýchlosťou svetla, pohybom pozorovaného telesa a pohybom pozorovateľa. Delíme ju na hviezdnu aberáciu, ktorá sa ďalej delí na dennú (spôsobenú rotáciou Zeme), ročnú (spôsobenú pohybom Zeme okolo Slnka) a sekulárnu (ktorá vzniká pohybom slnečnej sústavy vzhľadom k hviezdnej sústave galaxie) a planetárnu aberáciu, spôsobenú vlastným pohybom zdroja t. j. hviezdy, kométy alebo družice. Jav aberačného typu je taktiež gravitačný ohyb svetla (viz Obr. 43), vyplývajúci z obecnej teórie relativity a je nutné ho uvažovať v prípade najpresnejších pozorovaní (Kabeláč, Kostelecký, 2009).

Kvôli malému posunu a krátkej perióde, nebola aberácia, rovnako ako nutácia, braná do úvahy pri výskume.



Obr. 43: Gravitačný ohyb svetla, zdroj: Kabeláč, Kostelecký, 2009

#### 4.2.4.4 Vlastný pohyb hviezdy

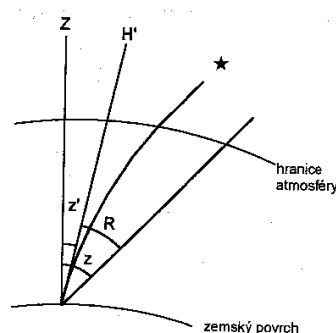
Dlhodobo sa verilo, že hviezdy sa vo vesmíre nepohybujú, no nie je tomu tak. To, že sa nám takto javia je spôsobené ich veľkou vzdialenosťou a vo vesmíre neexistuje objekt, ktorý by sa nepohyboval. Vlastný pohyb hviezd objavil v roku 1718 anglický astronóm Halley pri porovnávaní súradníc hviezd Aldebaran a Arcturus v danom čase s hodnotami nameranými Ptolemaiom. Tieto hodnoty sú však malé, pri priemernej hviezde do 10. veľkosti je to približne 0,013" za rok (Kabeláč, Kostelecký, 2009). Tento pohyb bol do výskumu pretože v Bright stars catalogu je obsiahnutý a keďže ide o lineárny pohyb za 300 rokov môže dosahovať hodnotu 5'. Nebol však chápaný ako primárne sledovaný pohyb a do výpočtov bol zahrnutý len na doplnenie.

#### 4.2.4.5 Paralaxa

V astronómii je paralaxa uhol medzi smermi, idúcimi ku kozmickému telesu z dvoch pozorovacích miest. Je to teda zmena smeru ku kozmickému telesu spôsobená posunom pozorovacieho miesta. Prirovnáť by sa dala ku geodézii, kde podobnou opravou, je oprava z centrácie pri excentrickom stanovisku. Na rozdiel od geodézie však pracuje v trojrozmernom priestore. Hodnoty paralaxy sú však oproti precesii výrazne menšie, preto ani paralaxa nebude braná do úvahy pri výskume (Kabeláč, Kostelecký, 2009).

#### 4.2.4.6 Astronomická refrakcia

Atmosféra Zeme spôsobuje zmenu smeru svetelných lúčov tým, že ich zalamuje (viz Obr. 44). Tento jav nazývame astronomická refrakcia. Tá klesá so stúpajúcou teplotou a rastie s barometrickým tlakom (Kabeláč, Kostelecký, 2009). Do úvahy pri výskume nebola zahrnutá, dôvodom bol predpoklad, že na hviezdy nemala podobne veľký vplyv ako precesia.



Obr. 44: Astronomická refrakcia, zdroj: Kabeláč, Kostelecký, 2009

#### 4.4.2.5 Identifikácia hviezd

Po zistení súradníc hviezd na starej mape aj v Bright Star Catalogue (s precesiou aj bez precesie) je nutné identifikovať konkrétne hviezdy. To je však v praxi ťažká úloha, keďže na starých mapách nie sú hviezdy nijako pomenované a ani údaje získané automatickou detekciou tento údaj nemôžu obsahovať.

Pri mapách z katalógu máme všetky potrebné údaje, vrátane názvu aj systémového čísla. Hľadanie najbližších susedov je vykonávané na sfére. Vzdialenosť  $d$  medzi dvomi bodmi  $P_1 = [\delta_1, \alpha_1]$ ,  $P_2 = [\delta_2, \alpha_2]$  so známymi rovníkovými súradnicami určíme s využitím prvej kosínusovej vety:

$$\cos d = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1),$$

Pre zjednodušenie nasledovnej identifikácie, resp. redukciu možných susedov, boli ku každej hviezde určené 3 najbližšie hviezdy z katalógu. Pre efektívne nájdenie 3 najbližších bodov bol použitý KD strom. Ďalšia identifikácia prebehla poloautomatizovane s následným vizuálnym zhodnotením. Tento bod, spoločne s určovaním konkrétnych hviezd, bude podrobnejšie diskutovaný v Kapitole 5.

#### 4.4.2.6 Hodnotenie presnosti a vykreslenie izolínií

Ďalším krokom je zhodnotenie presnosti máp. Výpočty presnosti prebehnú v dvoch variantoch:

1. Zhodnotenie zmeny polôh hviezd medzi rokmi 1700 a 2000 t. j. so započítaním vplyvu precesie.
2. Zhodnotenie presnosti zakresu t. j. bez započítania vplyvu precesie.

Prvé kritérium hodnotenia bude založené na, v predošlej podkapitole, uvedenom poloautomatizovanom prístupe výberu najbližších hviezd na starej mape. Súradnice hviezdy spolu so súradnicami 3 najbližších susedov a ich vzdialenosti budú zapísané do tabuľky, kde bude vidieť presnosť zákresu.

Druhým hodnotiacim kritériom budú na mapách vykreslené izolínie polohových odchýlok medzi polohami hviezd zakreslenými na mape a ich reálnymi polohami vypočítanými z Bright Star Catalogue, v dvoch variantoch, a to ako ovplyvnené precesiou, tak aj bez započítania vplyvu precesie.

## 5. Implementácia metód pre analýzu máp nebeskej sféry

V tejto kapitole budú popísané a prakticky predstavené jednotlivé kroky metodiky pre analýzu máp hviezdnej oblohy, ktorými boli dosiahnuté výsledky prezentované v kapitole 6. Popis je chronologický a bude uvedený v samostatných podkapitolách. Pre implementáciu jednotlivých skriptov bol použitý skriptovací jazyk Matlab. Uvedené budú kľúčové fragmenty kódu spoločne s krátkym komentárom. Pripomeňme, že pre každú z nižšie uvedených máp budú vykonané nasledovné kroky:

### 1. Detekcia hviezd s využitím cross-correlation.

Semiautomatická detekcia jednotlivých hviezd s využitím krížovej korelácie, podľa vzorových hviezd (viz. Kap. 5.1).

### 2. Transformácia súradníc.

Prepočty pixelových súradníc na ekliptikálne a rovníkové (viz Kap. 5.2).

### 3. Zohľadnenie vplyvu precesie

Matematická korekcia vplyvu precesie zohľadňuje zmenu vzájomnej polohy hviezd v čase. Súradnice hviezd boli prepočítané do roku 1700, aby bolo možné určiť či ich autor mapy zachytil správne (viz Kap. 5.3).

### 4. Vykreslenie izolínií so započítaním vplyvu precesie

K jednotlivým hviezdám nájdeme najbližšieho suseda z katalógu, prepočítaného do epochy J1700. Polohové odchýlky budú vizualizované formou izočiar (viz Kap. 5.4).

### 5. Poloautomatizovaná identifikácia vybraných hviezd

Výber dobre identifikovateľných hviezd, na všetkých analyzovaných mapách a zhodnotenie ich polohovej presnosti (viz Kap. 5.5).

### 6. Vykreslenie izolínií bez započítania vplyvu precesie

Doplňkovú analýzu predstavuje vygenerovanie izolínií bez zohľadnenia vplyvu precesie (viz Kap. 5.6).



## 5.1 Detekcia hviezd s využitím obrazovej korelácie

Prvou časťou analýzy bolo predspracovanie obrazu a následná identifikácia objektov na ňom pomocou normalizovanej krížovej korelácie. Na spracovanie bol použitý skriptovací jazyk v prostredí Matlab. Nahraný obrázok bol prevedený na stupne sivej, následne bolo prevedené preškáľovanie celočíselných hodnôt pixelov na interval [0,1]:

```
Mapa = imread('Juh.jpg');           //Načítanie obrázka
img_gray = rgb2gray(Mapa);         //Konverzia na stupne sivej
G = im2double(img_gray);          //Preškáľovanie na interval [0,1]
```

Následne bol nahraný vzor, ku ktorému bude vykonaná normalizovaná korelácia. S jeho pomocou budú identifikované hviezdy v analyzovanej mape. Raster predspracujeme podobným spôsobom a aplikujeme cross koreláciu. Následne všetkým pixelom, u ktorých je hodnota korelačného koeficientu menšia než zadaný threshold, nastavíme hodnotu 0.

```
hv = imread('hv_5cipu.jpg');       //Načítanie vzoru
img_gray2 = rgb2gray(hv);         //Konverzia na stupne šedi
Hviezda = im2double(img_gray2);   //Preškáľovanie na interval [0,1]
R = normxcorr2(Hviezda,G);        //Aplikácia cross korelácie
R(R<0.51)=0.0;                   //Aplikácia thresholdu
c = uint16(R*65536);              //Konverzia na celočíselné hodnoty
```

Následne bol na raster aplikovaný mediánový filter. Pre konvolúciu bol použitý Gaussov filter a modifikovaný raster so zvýraznenými hviezdami bol uložený. Následne boli hľadané indexy všetkých pixelov s nenulovými hodnotami. Detekované lokálne maximá boli posunuté o polovicu šírky hviezdy tak, aby sa kryli s jej stredom.

```
d = medfilt2(c);                  //Aplikácia mediánového filtra
filter = fspecial('gaussian',7,1) //Definícia filtra pre konvolúciu
e = conv2(d,filter,'same');       //Konvolúcia Gaussovým filtrom
imwrite(e, 'Gauss_filter_1.png'); //Uloženie rastra
BW = imregionalmax(e);            //Hľadanie lokálneho maxima
[x,y] = find(BW);                 //Hľadanie pixelov s nenulovými
                                  hodnotami
yoffSet = y-(size(hv,1)-1)/2;     //Posun o 1/2 výšky hviezdy
xoffSet = x-(size(hv,2)-1)/2;     //Posun o 1/2 šírky hviezdy
```

Uloženie pixelových súradníc to txt. súboru:

```
x_vsetky=[xoffSet; xoffSet2; xoffSet3; xoffSet4];
y_vsetky=[yoffSet; yoffSet2; yoffSet3; yoffSet4];
save('X_juh_gimp_tmavy.txt', 'x_vsetky', '-ascii')
save('Y_juh_gimp_tmavy.txt', 'y_vsetky', '-ascii')
```

Skript pre automatické hľadanie lokálnych maxím hľadá na okolí 3x3 pixely s najvyššou hodnotou korelačného koeficientu (viz Kap. 4.2.2.3). Tento pixel, predpokladaný centroid hviezdy, je pridaný do zoznamu lokálnych maxím:

```
function [cent] = findmax(img):
    cent = [] //Prázdny zoznam centroidu (lok. maxím)
    m,n = size(img)
    for i =2:m - 1 //Prejdi raster po pixeloch
        for j = 2 : n - 1
            if(img(i,j)>=img(i-1,j-1)&&img(i,j)>img(i-1,j) &&
                img(i,j)>=img(i,j+1)&&img(i,j)>img(i+1,j-1)&&
                img(i,j)>img(i,j+1)&& img(i,j)>img(i+1,j-1)&&
                img(i,j)>img(i+1,j)&&img(i,j)>img(i+1,j+1)
                cent = [cent ; i ; j]; //Pridaj lokálne maximum
            end
        end
    end
end
end
```

Pri hľadaní lokálnych maxím často dochádzalo k situáciám, kedy vo vnútri jednej hviezdy boli detekované viaceré lokálne maximá. Jedna hviezda by preto bola reprezentovaná viacerými bodmi. Tieto blízke lokálne maximá museli byť odstránené. Vychádzalo sa z myšlienky, že budú ponechané len také lokálne maximá, ktoré sú od seba vzdialenejšie, než je veľkosť vzoru  $m_t$ . Pre každý centroid nájdeme jeho k-najbližších susedov, v praxi postačila hodnota 3.

```
function [cent2] removeRedundantMax(cent, mt)
    cent2 = [];
    xstar = cent(:, 1); ystar = cent(:, 2) //Súr. centroidu (lok. max.)
    for i = 1: length(xstar)
        [id, dist] = knnsearch( [xstar, ystar], [xstar(i),
        ystar(i)], 'K', 5);
        n = 1;
        x2 = xstar(i); y2 = ystar(i);
        for j = 2 : length(dist) //Prejde všetkých najbližších susedov
            if dist(j) < mt //Najbližší sused bližšie než šírka
                x2 = x2 + xstar(id(j)); //Priemer x súradnice
                y2 = y2 + ystar(id(j)); //Priemer y súradnice
                n = n + 1; //Inkrementuj počet hviezd
            else //Žiadny sused nie je bližšie než 1/2 šírky
                break //Stop
            end
        end
        cent2 = [cent2; x2 / n; y2 / n]; //Nový centroid, priemer z
        niekoľkých hviezd
    end
end
```

Postupne prechádzame jednotlivých susedov hviezdy. Pokiaľ je vzdialenosť suseda bližšia než je šírka hviezdy  $m_t$ , použijeme ho k výpočtu centroidu. Ten následne uložíme do zoznamu nových centroidov. Následne je vykonané odstránenie prípadných duplicitných centroidov:

```
cent2 = unique(cent2, 'rows', 'stable'); //Odstránenie duplicit
```

Týmto postupom sa podarilo úplne potlačiť výskyt duplicitných lokálnych maxím.

## 5.2 Transformácia súradníc

V tejto podkapitole bude ukázaný postup vzájomných transformácií pixelových súradníc stredov hviezd nájdených v predošlej kapitole.

Najprv boli načítané pixelové súradnice stredov hviezd detekovaných v predošlom skripte. Po zadaní ekliptikálneho pólu sú jeho súradnice prevedené na radiány:

```
format long g //Nastavenie formátu
Xgo = load('X_juh_gimp_tmavy.txt'); //Načítanie X súradníc
Ygo = load('Y_juh_gimp_tmavy.txt'); //Načítanie Y súradníc
Ep = input('Input advance ecliptical pole: ');
E = Ep/180.0*pi; //Konverzia na radiány
```

Pixelové súradnice sú následne redukované vzhľadom k ekliptikálnemu pólu, ktorého pixelové súradnice odmeriame z mapy. Teraz využijeme fakt, že mapy boli vyhotovené v stereografickej projekcii. Pri znalosti polomeru obrazu rovníka nebeskej sféry, určeného ako priemer zo 4 bodov, môžeme odstrániť všetky hviezdy mimo mapové pole, čiže body ktorých vzdialenosť je väčšia ako polomer obrazu rovníka (zobrazí sa ako kružnica):

```
Xpe = 3010.58; //Pixelová súradnica ekliptikálneho pólu
Ype = 3275.17; //Pixelová súradnica ekliptikálneho pólu
Xgraw = Xgo - Xpe; //Redukcia súradníc vzhľadom k pólu
Ygraw = -(Ygo - Ype); //Redukcia súradníc vzhľadom k pólu
R = 2138.9575; //Polomer rovníkovej kružnice
radius_hvezd = sqrt(Xgraw.^2+Ygraw.^2); //Vzdial. hviezd od ekl. pólu
Xg=Xgraw(radius_hvezd<=rovnik); //Odstránenie príliš ďalekých hviezd
Yg=Ygraw(radius_hvezd<=rovnik); // Odstránenie príliš ďalekých hviezd
```

V ďalšom kroku budú prepočítané pixelové súradnice na súradnice ekliptikálne. K tomu sa použijú odvodené rovnice zobrazenia inverzného k stereografickej projekcii (viz Kap. 4.2.3.1). Následne budú ekliptikálne súradnice transformované na karteziánske (t. j. sférické) súradnice:

```
R = RO/2;
Q = (sqrt(Xg.*Xg+Yg.*Yg))/(2*R); //Inverzné rovnice stereog. proj.
lam = atan2(Xg, -Yg); //Výpočet ekliptikálnej dĺžky
bet = pi/2 - 2*(atan(Q)); //Výpočet ekliptikálnej šírky
Xe = cos(bet).* cos(lam); //Prepočet na karteziánske súr.
```

```
Ye = cos(bet).* sin(lam);           //Prepočet na karteziánske súr.
Ze = sin(bet);                     //Prepočet na karteziánske súr.
```

S definovanou maticou rotácie vykonávame prevody ekliptikálnych karteziánskych (sférických) súradníc na karteziánskej (sférické) rovníkové. Rektascenzia je následne prepočítaná na interval <0,24>h, ktorý je používaný v hviezdnom katalógu, deklináciu prepočítame na stupne:

```
Rx = [1 0 0; 0 cos(E) sin(E); 0 -sin(E) cos(E)]; //Matica rotácie
rec = zeros(size(Xg));
dec = zeros(size(Xg));
rec_h = zeros(size(Xg));
for ii=1:length(Xg)                //Opakuj pre všetky body
    M = [Xe(ii); Ye(ii); Ze(ii)];
    N = Rx * M;                    //Ekliptikálne -> rovníkové (karteziánske)
    Xr = N(1, [1]);
    Yr = N(2, [1]);
    Zr = N(3, [1]);
    rec_r = atan2(Yr, Xr);          //Rektascenzia, karteziánske súradnice
    rec(ii) = rec_r/pi*180;         //Prepočet na stupne
    rec_k = rec(ii) + 180;          //Prepočet na <0,360> stupňov
    rec_h(ii) = rec_k/360*24;       //Prepočet na <0,24> hodín
    dec_r = asin(Zr);               //Deklinácia
    dec(ii) = dec_r/pi*180;         //Prepočet na stupne
end
out = [rec/180*pi+pi, dec/180*pi];
save('eklip_sur_juh_gimp_tmavy.txt', 'out', '-ascii')
```

### 5.3 Zohľadnenie vplyvu precesie

V tejto kapitole je vykonaná matematická korekcia vplyvu precesie na polohy hviezd. Vychádzame z myšlienky, že polohy hviezd v katalógu prepočítame z epochy J2000 do epochy J1700, ktorá odpovedá dobe vzniku analyzovanej mapy. Prepočet súradníc hviezd z Bright Star Catalogue (viz Kap. 4.2.4.1) bol realizovaný v samostatnej funkcii, cieľová epocha bola J1700:

```
function [ra,de,mag,pmra,pmde,ind] = toJ1700(filename, limmag)

[ra,de,mag,pmra,pmde,ind] = read_bsc5_deg(filename, limmag);
ty = -300;                    //1700-2000=-300
t = -300*365.25/36525;
```

Výkonná časť funkcie je uvedená na nasledujúcom výpise zdrojového kódu. Najprv určíme hodnoty rektascenzie a deklinácie v epoche J2000. S využitím vzťahov z kapitoly 4.2.4.1 vypočítame precesné uhly. Potom vypočítame smerové kosínusy matice rotácie, z ktorých určíme rektascenziu a deklináciu vzťahnuté k epoche J1700:

```

    ra = ra+pmra*ty/3600.0*15;           //Rektascenzia J2000
    de = de+pmde*ty/3600.0;           //Deklinácia J2000
// Precesné uhly
    ksi = ((0.017998*t+0.30188)*t+2306.2181)*t/3600.0;
    z = ((0.018203*t+1.09468)*t+2306.2181)*t/3600.0;
    theta = ((-0.041833*t-0.42665)*t+2004.3109)*t/3600.0;
//Smerové kosínusy A-C
    A = cosd(de).*sind(ra+ksi);
    B = cosd(theta)*cosd(de).*cosd(ra+ksi)-sind(theta)*sind(de);
    C = sind(theta)*cosd(de).*cosd(ra+ksi)+cosd(theta)*sind(de);

    de = asind(C);                       //Deklinácia J1700
    ra = atan2d(A,B)+z;                   //Rektascenzia J1700
    ra(ra>360)=ra(ra>360)-360.0;
    ra(ra<0)=ra(ra<0)+360.0;

```

S využitím inverznej stereografickej projekcie boli pixelové súradnice detekovaných hviezd prepočítané na rovníkové súradnice (rektascenziu a deklináciu).

## 5.4 Vykreslenie izolínií so započítaním vplyvu precesie

Izolínie znázorňujú mieru polohovej presnosti zakresu objektov na mapách. Vzdialenosť bola meraná pomocou prvej kosínusovej vety (viz Kap. 4.4.2.5) a bola pre ňu vytvorená nasledovná funkcia:

```

function [dist] = sph_distance(p1, p2)
alpha1 = p1(:, 1);                       //súradnica bodu p1
delta1 = p1(:, 2);                       //súradnica bodu p1
alpha2 = p2(:, 1);                       //súradnica bodu p2
delta2 = p2(:, 2);                       //súradnica bodu p2
//1. kosínusová veta
    dist = acos(sin(delta1*pi/180) .* sin(delta2*pi/180) +
    cos(delta1.*pi/180).* cos(delta2*pi/180) .* cos((alpha2 -
    alpha1)*pi/180)) * 180 / pi;

```

Vzhľadom k dátácií mapy sú tiež navrhnuté k epoche J1700, môžeme preto hľadať k jednotlivým hviezdám z katalógu, prepočítaného do epochy J1700 ich najbližších susedov. K tomuto kroku použijeme matlabovskú funkciu „knn\_search“, v praxi bol využitý len 1 najbližší sused:

```

[ramapa,demapa] = isp(XSo,YSo,ra0,de0,R); //Prepočet na rovníkové súr.

//Hľadanie najbližších susedov (sférická vzdialenosť)
idx = knnsearch(catalog,mapa,'dist', @sph_distance,'k',1);

dra = mapa(:,1)-catalog(idx,1);           //Rozdiel v rektascenzii
dde = mapa(:,2)-catalog(idx,2);           //Rozdiel v deklinácii
dr = sqrt(dra.^2+dde.^2);                 //Vzdialenosť

```

Pri znalosti vektorov polohových odchýlok medzi hviezdou v katalógu a najbližšími susedmi môžeme tieto hodnoty vizualizovať s pomocou izočiar. Hodnota z

bude hodnota polohovej odchýlky medzi hviezdou a jej najbližším susedom. K tomuto účelu využijeme vstavané funkcie programu Matlab, a to „griddata“ a „contour“:

```
mXS = linspace(min(XS),max(XS),500); //Lineárna interpolácia v smere x
mYS = linspace(min(YS),max(YS),500); //Lineárna interpolácia v smere y
[GridXS,GridYS] = meshgrid(mXS,mYS); //Vytvorenie mriežky
Grid_dr = griddata(XS,YS,dr,GridXS,GridYS,'v4');
```

Vlastné vykreslenie izolínií prebehne nasledovne. Najprv nastavíme vhodný základný interval izočiar a následne doplnkový interval tak, aby bola zvýraznená každá piata izolínia. Očíslujeme len zvýraznené:

```
dh1 = [0:2:20]; //Základný interval
dh2 = [0:10:20]; //Interval zvýraznených izočiar

//Základné a zvýraznené izočiare
color = [1, 0, 0]
[C1,h1] = contour(GridXS,GridYS,Grid_dr,dh1,'Color',color,
'Linewidth',1);
[C2,h2] = contour(GridXS,GridYS,Grid_dr,dh2,'Color',color,
'Linewidth',2);

//Popis zvýraznených izočiar
clabel(C2,h2,dh2,'LabelSpacing',1000,'FontSize',10,'Color',color,
'BackgroundColor',[1,1,1]);
```

## 5.5 Poloautomatizovaná identifikácia vybraných hviezd

Pretože izolínie boli generované pre každú z analyzovaných máp z rôznych hviezd, bolo priročené ešte k selektívnemu hodnoteniu presnosti zakresu vybraných hviezd.

Tie boli vyberané s ohľadom na 2 kritériá:

### 1. Umiestnenie na všetkých analyzovaných mapách.

Pokiaľ je zámerom objektívne posúdenie nepresnosti, je nutné aby bol dátový súbor rovnaký. Každá mapa má zakres trochu iný a presná lokalizácia hviezd je náročná. Vyberané boli len hviezdy, u ktorých bolo isté, že sa zhodujú na každom kartografickom diele, t. j. sú znázornené na všetkých analyzovaných mapách.

### 2. Význam hviezd

Snahou bolo vyberať hviezdy, ktoré majú veľkú magnitúdu, t. j. sú dobre identifikovateľné (napr. Sirius), významnú polohu (napr. Polárka) a ideálne aj

jednoslovný názov. Predpokladáme, že dobre identifikovateľné významné hviezdy budú na starých mapách hviezdnej oblohy zakreslené presnejšie.

Na základe týchto kritérií bolo zvolených 17 hviezd, ich prehľad je uvedený v tabuľke 1. Tento postup nemohol byť vykonávaný automaticky, pretože akgoritmus nevie, ktorá hviezda má aký názov, a preto bolo nutné ju lokalizovať ručne. Následne boli s pomocou skriptu zistení jej 3 najbližší susedia. Predpoklad je taký, že pokiaľ je mapa presná, bude 1. najbližší sused z Bright Star Catalogue zhodný s určovanou hviezdou. V dôsledku kumulácie chýb je krajne nepravdepodobné, že by ju algoritmus normalizovanej krížovej korelácie určil presne do polohy vypočítanej z Bright Star Catalogue. Pokiaľ je sused určený aspoň do 3. miesta, stále je mapa posudzovaná za dostatočne presnú. Taktiež boli na posúdenie z Bright Star Catalogue vybraté len tie hviezdy, ktorých magnitúda dosahuje podobných hodnôt ako pri 17 hviezdach zvolených na posúdenie.

Názov	Súhvezdie	Katalógový názov
Sheliak	Lyra	$\beta$ Lyr
Vega	Lyra	$\alpha$ Lyr
Gemma	Severná koruna	$\alpha$ Crb
Denebola	Lev	$\beta$ Leo
Regulus	Lev	$\alpha$ Leo
Alkaid	Veľká Medvedica	$\eta$ UMa
Mizar	Veľká Medvedica	$\zeta$ UMa
Alioth	Veľká Medvedica	$\epsilon$ UMa
Megrez	Veľká Medvedica	$\delta$ UMa
Alnath	Býk	$\beta$ Tau
Mirach	Andromeda	$\beta$ And
Ruchbah	Kasiopea	$\delta$ Cas
Antares	Škorpión	$\alpha$ Sco
Sirius	Veľký pes	$\alpha$ Cma
Achernar	Eridanus	$\alpha$ Eri
Fomalhaut	Južná ryba	$\alpha$ PsA
Alnasl	Strelec	$\gamma$ Sgr

Tab. 1: Vybrané hviezdy na poloautomatizovanú detekciu presnosti zákresu, zdroj: Vlastný (2020)

Postup bol realizovaný nasledovným skriptom v prostredí Matlab. Opäť sa využije inverzná stereografická projekcia a potom sú vyhľadávané 3 najbližší susedia každej hviezdy:

```

[ramapa,demapa] = isp(XSo,YSo,ra0,de0,R); //Inverzná stereog. proj.
mapa = [ramapa demapa];

catalog_ind = ind(RR<RS);
idx3 = knnsearch(catalog,mapa,'dist', @sph_distance,'k',3); //Vyhľadá
                                                    3 najbl.
                                                    susedov

ind_prvni = find(ind == catalog_ind(idx3(1))); //1. najbližší sused
plot(2187-y(ind_prvni),2156-
x(ind_prvni),'r+', 'MarkerSize',20, 'LineWidth',2);

ind_druhy = find(ind == catalog_ind(idx3(2))); //2. najbližší sused
plot(2187-y(ind_druhy),2156-
x(ind_druhy),'g+', 'MarkerSize',20, 'LineWidth',2);

ind_treti = find(ind == catalog_ind(idx3(3))); //3. najbližší sused
plot(2187-y(ind_treti),2156-
x(ind_treti),'b+', 'MarkerSize',20, 'LineWidth',2);

```

Ku každému z objektov sú potom vypísané základné údaje (názov, systémové číslo, rektascenzia, deklinácia...):

```

[ra1,de1,mag1,name1,HR1,SAO1] = read_from_bsc5('bsc5.dat',
catalog_ind(idx3(1)));
[ra2,de2,mag2,name2,HR2,SAO2] = read_from_bsc5('bsc5.dat',
catalog_ind(idx3(2)));
[ra3,de3,mag3,name3,HR3,SAO3] = read_from_bsc5('bsc5.dat',
catalog_ind(idx3(3)));

fprintf('1. soused (RED): %s HR %d SAO %d ra=%.6f deg de=%.6f deg
mag=%.3f\n',name1, HR1, SAO1, ra1, de1, mag1);
fprintf('2. soused (GREEN): %s HR %d SAO %d ra=%.6f deg de=%.6f deg
mag=%.3f\n',name2, HR2, SAO2, ra2, de2, mag2);
fprintf('3. soused (BLUE): %s HR %d SAO %d ra=%.6f deg de=%.6f deg
mag=%.3f\n',name3, HR3, SAO3, ra3, de3, mag3);

```

## 5.6 Vykreslenie izolínií bez započítania vplyvu precesie

Tento krok bol začlenený do výskumu na určenie zmeny objektov vzhľadom k dnešnému stavu. Ako bolo popísané v kapitole 4.2.4.1 každý objekt na oblohe podlieha precesnému pohybu, ide teda o zjednodušený variant analýzy.

Postup je v zásade rovnaký ako pri vykresľovaní izolínií so započítaním vplyvu precesie, akurát nebol uvažovaný vplyv precesie medzi epochami J1700 a J2000 (namiesto rozdielu o 300 bol rozdiel 0):

```

function [ra,de,mag,pmra,pmde,ind] = toJ1700(filename, limmag)

[ra,de,mag,pmra,pmde,ind] = read_bsc5_deg(filename, limmag);
ty = -0;
t = -0*365.25/36525;

```



## 6. Dosiahnuté výsledky

V tejto kapitole budú prakticky overené jednotlivé kroky navrhutej metodiky pre analýzu máp hviezdnej oblohy. K tomuto kroku budú použité 3 mapy hviezdnej oblohy z fondu Mapové sbírky PřF UK, uvedené v kapitole 4.

Výsledky analýzy všetkých skúmaných máp, zahŕňajúce vybrané vzory hviezd použité pre automatickú detekciu hviezd metódou obrazovej korelácie, identifikácia objektov (t. j. vybraných hviezd) a spolu s nimi aj polohové chyby, ktoré pri určovaní vznikli budú predstavené v nasledujúcich podkapitolách. Pri každej mape budú taktiež vykreslené izočiarly, znázorňujúce mieru presnosti zákresu a tiež vektory posunov troch najbližších susedov z katalógu Bright Star Catalogue vybranej hviezd na starej mape.

**Voľba hodnoty prahu korelačného koeficientu** – pre automatizovanú detekciu hviezd bola použitá hodnota prahu korelačného koeficientu  $\gamma_{min} = 0.51$ . Napriek tomu niektoré hviezdly zostali nedetekované. Naopak iné objekty, ktoré sú hviezdám len podobné, boli detekované falošne. Je to dôsledkom faktu, že ide o mapy rukopisné, u ktorých kartografické znaky nie sú identické, môžu preto vykazovať drobné odlišnosti. Táto hodnota sa pre analyzované mapy ukázala ako najvhodnejšia, jej zvýšenie viedlo k vynechaniu väčšieho počtu hviezd, zníženie naopak k rastu falošných detekcií.

### 6.1 Planisfero del globo celeste

Táto mapa bola ako jediná získaná v čiernobielej forme. Je rozdelená na 2 hemisféry (severnú a južnú), obe zachytené v stereografickej projekcii v obecnej polohe. Kartografická sieť je dvojsúradnicová. Prvá sústava súradníc je ekliptikálna, jej stred je umiestnený do stredu mapy, resp. hemisféry, z ktorého vychádzajú úsečky znázorňujúce ekliptikálne poludníky. Druhou sústavou je sústava rovníková, jej stred je otočený o  $23.7^\circ$  smerom vľavo resp. na juh na severnej hemisfére a o totožnú hodnotu vľavo resp. na sever na južnej hemisfére. Obvod mapového poľa je ohraničený stupnicou  $360^\circ$  vyjadrujúcich stupne ekliptiky, podelené na 12 častí po  $30^\circ$  podľa jednotlivých súhvezdí resp. znamení zverokruhu. Samotné súhvezdia sú znázornené umeleckými dielami a pomenované latinskými názvami priamo v mapovom poli.

Medzi kompozičné prvky patrí veľký názov mapy v hornej časti cez celú mapu a potom podnadpisy jednotlivých hemisfér v spodnej časti mapy. V ľavom hornom rohu je znázornená planéta Saturn a v pravom Jupiter. V strede pod názvom mapy je

vyobrazené Slnko a pod hemisférami v strednej časti Mesiac v splne, ktorý je vyobrazený aj vľavo v nove a vpravo ako kosáčik. Pod mapou je ešte umiestnený pomerne dlhý blok textu. Tieto kompozičné prvky však vykazovali pri analýze podobnosť s použitými vzormi a algoritmus ich označoval za hviezdy, čo pochopiteľne nie je pravda, a preto bola mapa orezaná len na mapové pole, aby sa znížil počet chybných určených objektov.

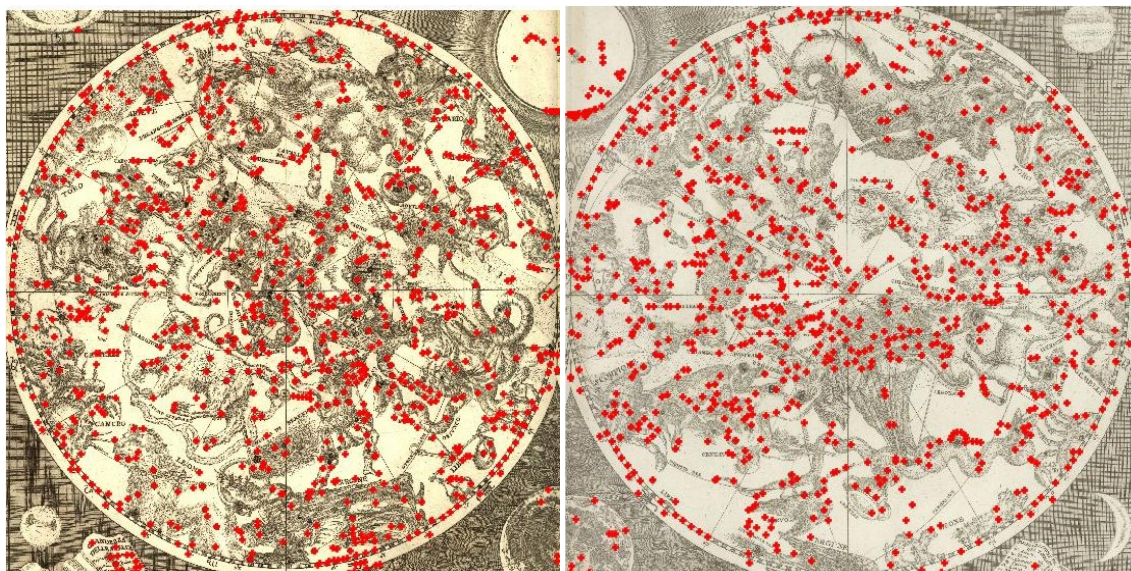
### 6.1.1 Automatická detekcia hviezd

Prvým krokom analýzy bola identifikácia hviezd. Použité boli vzory uvedené na obrázku 45.



Obr. 45: Mnohocípa, šesticípa a bledšia a tmavšia päťcípa hviezda použitá ako vzorový príklad na identifikáciu hviezd na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)

Pomocou týchto hviezd a algoritmu popísaného v 4. kapitole boli identifikované hviezdy na mape nasledovne pre obe hemisféry (viz Obr. 46).



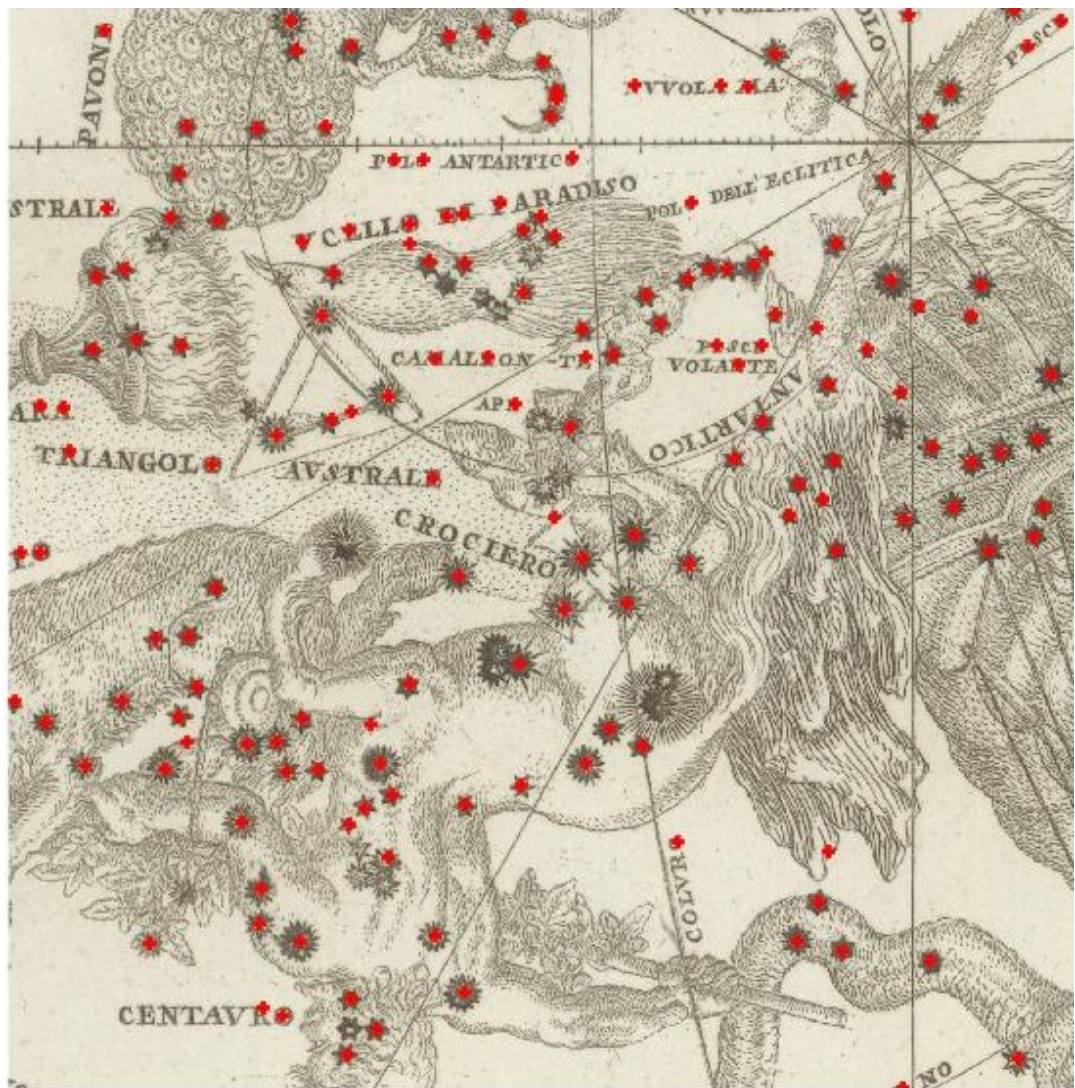
Obr. 46: Identifikácia hviezd na severnej (vľavo) a južnej (vpravo) hemisfére na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)

Celkový počet hviezd je podľa algoritmu 3000 z toho na severnej pologuli 1495 a na južnej 1505, ale už na prvý pohľad je patrné, že algoritmus nepracoval bezchybne a mnohé objekty, ktoré evidentne nie sú hviezdy napr. okraj mapy, písmená, prípadne číslice boli ako hviezdy identifikované (viz Obr. 47).



Obr. 47: Ukážka chybne identifikovaných objektov (okraj mapového poľa, kartuš, písmo, číslice) na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)

Naopak niektoré hviezdy, ktoré sú dokonca na mape zvýraznené, algoritmus nebol schopný určiť (viz Obr. 48).



Obr. 48: Ukážka niektorých neidentifikovaných hviezd (v strede obrázka) na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)

Mnohé hviezdy však boli identifikované správne (viz Obr. 49).



Obr. 49: Ukážka pomerne vysokého množstva správne detekovaných hviezd na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)

Následne boli odstránené hviezdy, ktoré sa nachádzali mimo obrazu hemisféry. Percentuálna úspešnosť detekovaných hviezd mapy je uvedená v tabuľke 2:

Správne identif. obj.	Nesprávne identif. obj.	Neidentif. obj.	Celkovo identif. obj.
61.27%	35.95%	2.78%	100%

Tab. 2: Ukážka miery presnosti algoritmu pomocou percentuálneho zastúpenia identifikácie objektov na mape Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2020)

### 6.1.2 Analýza presnosti mapy s využitím izočiar

Následne bola určovaná polohová presnosť mapy resp. presnosť znázornenia jednotlivých hviezd. V tomto kroku bolo nutné započítať resp. odpočítať vplyv precesie, aby hviezdy v Bright Star Catalogue zodpovedali polohám v roku 1700, tak ako sú znázornené v mape. Presnosť zákresu sa určila pomocou izolínií (viz Obr. 50 a Obr. 51). Obrázky s izolíniami sú dostupné vo väčšom a lepšom formáte ešte aj v prílohe práce.



Obr. 50: Izolínie presnosti zákresu (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)



Obr. 51: Izolínie presnosti zákresu (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)

Z obrázkov izolínií je patrné, že nižšia presnosť je zaznamenaná najmä na okrajoch mapy t. j. v oblasti ekliptikálneho a kartografického rovníka. Vyššia presnosť je naopak zaznamenaná v oblasti obratníkov a samotných pólů (ekliptikálneho a kartografického) a klesá v oblasti polárneho kruhu.

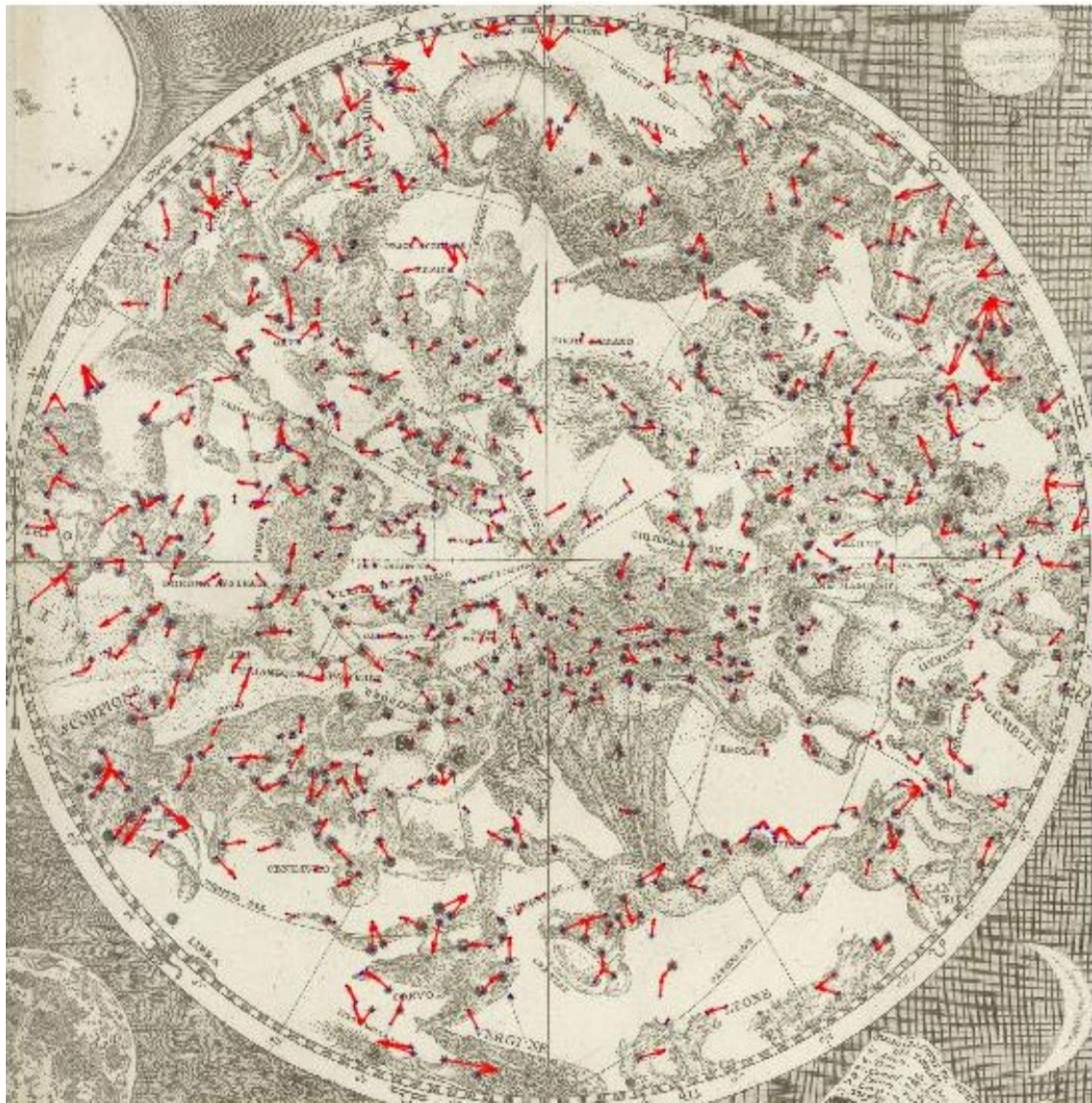
### 6.1.3 Analýza polohovej presnosti mapy s využitím polohových odchýlok vybraných hviezd

V ďalšej fázi prebehla analýza presnosti pomocou polohových vektorov (viz Obr. 52 a Obr. 53) a taktiež pomocou konkrétnych polôh niektorých vybraných hviezd (viz Kap. 5.5), ku ktorým boli priradené 3 najbližšie hviezdy (viz Tab. 3).



Obr. 52: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)





Obr. 53: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)

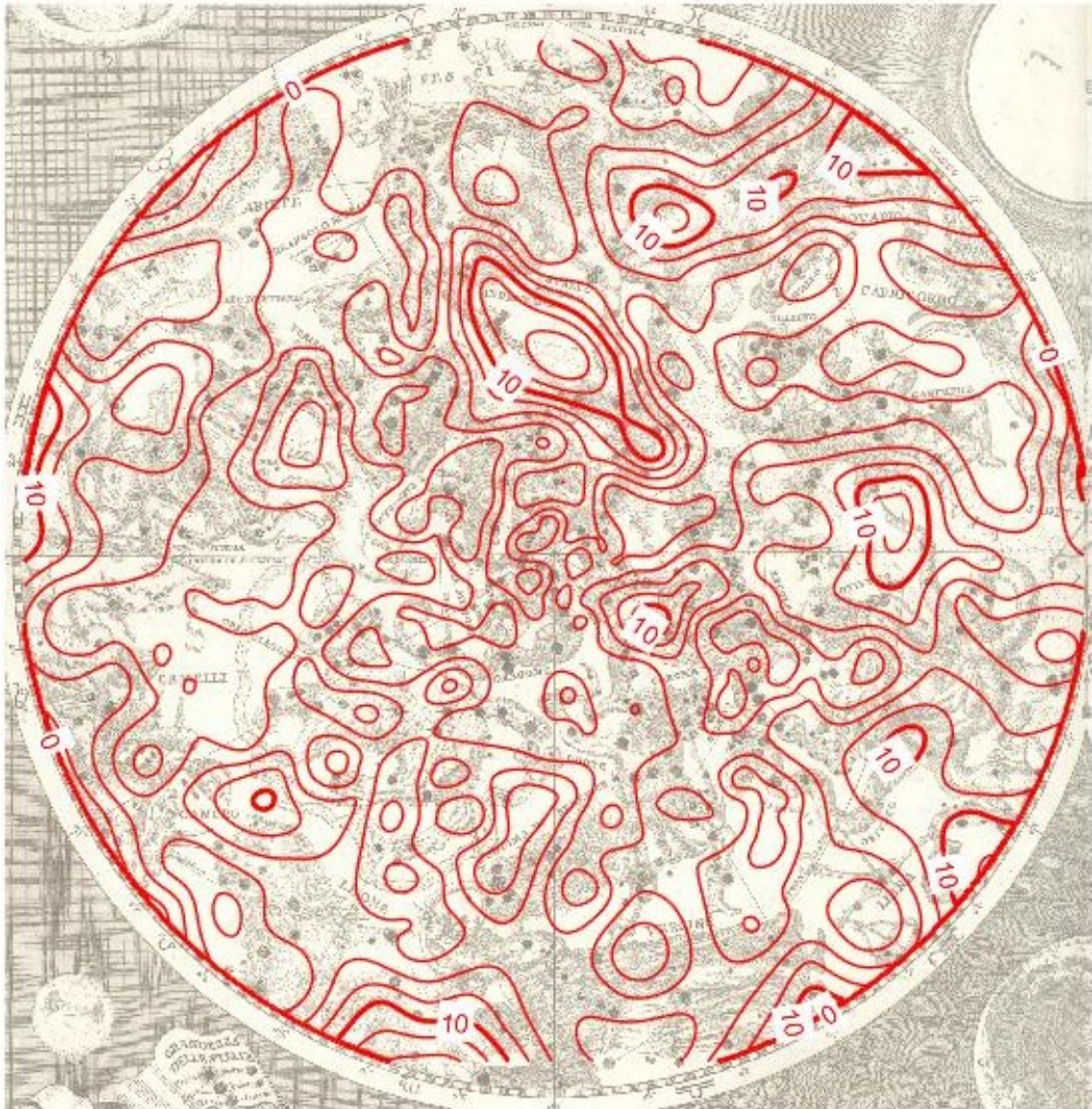
Z tabuľky 3 je patrné, že mapa dosahuje pomerne vysokú presnosť (z analyzovaných máp najvyššiu). Predpokladom presnosti je predovšetkým to, že 1. sused bude totožný s názvom hviezdy, čo sa vo väčšine prípadov aj stalo. Najpresnejšia bola znázornená hviezda, najmenej presne hviezda. Stredná hodnota polohovej chyby mapy činí. Naopak z mapy vektorov nie je možné určiť prípadnú zákonitosť nepresnosti zakresu. Hviezdy majú svojich najbližších susedov umiestnených neorganizovane do všetkých smerov (nie je patrné, že by sa najbližší sused vo väčšinovom množstve umiestňoval napríklad vpravo od hviezdy).

Názov	$\alpha$	$\delta$	1	$\alpha$	$\delta$	d	2	$\alpha$	$\delta$	d	3	$\alpha$	$\delta$	d
Sheliak ( $\beta$ Lyrae) Lyra	284.347	30.536	$\beta$ Lyrae (Lyra)	282.52	33.362778	3.365798993	$\gamma$ Lyrae (Lyra)	284.735833	32.689444	2.188266931	$\delta$ 2 Lyrae (Lyra)	283.625833	36.898889	6.403626962
Vega ( $\alpha$ Lyrae) Lyra	279.215	37.923	$\alpha$ Lyrae (Lyra)	279.234583	38.783611	0.861299556	$\zeta$ Lyrae (Lyra)	281.193333	37.605	2.01839106	$\kappa$ Lyrae (Lyra)	274.965417	36.064444	4.624629065
Gemma ( $\alpha$ Crb) Severná koruna	224.126	28.469	$\alpha$ Crb (Severná koruna)	233.672083	26.714722	9.705935913	$\beta$ Crb (Severná koruna)	231.957083	29.105833	7.85693434	$\gamma$ Crb (Severná koruna)	235.685833	26.295556	11.76238062
Denebola ( $\beta$ Leo) Lev	167.48	19.678	$\nu$ Vir (Panna)	176.465	6.529444	15.92528649	$\omicron$ Vir (Panna)	181.302083	8.733056	17.63070553	$\beta$ Leo (Lev)	177.265	14.571944	11.03712068
Regulus ( $\alpha$ Leo) Lev	146.374	17.691	$\eta$ Leo (Lev)	151.833333	16.762778	5.537681183	$\lambda$ 2 Leo (Lev)	154.994167	19.840556	8.884135867	$\lambda$ 1 Leo (Lev)	154.992917	19.841667	8.883191926
Alkaid ( $\eta$ UMa) Veľká Medvedica	173.763	47.779	$\eta$ Uma (Veľká Medvedica)	206.885	49.313333	33.15751893	Alcor (Veľká Medvedica)	201.30625	54.988056	28.47105739	$\zeta$ Uma (Veľká Medvedica)	200.985	54.921667	28.14347128
Mizar ( $\zeta$ UMa) Veľká Medvedica	162.036	58.001	$\zeta$ Uma (Veľká Medvedica)	200.98125	54.925278	39.06651461	Alcor (Veľká Medvedica)	201.30625	54.988056	39.38566194	$\epsilon$ Uma (Veľká Medvedica)	193.507083	55.959722	31.53721422
Alioth ( $\epsilon$ Uma) Veľká Medvedica	155.418	58.429	$\epsilon$ Uma (Veľká Medvedica)	193.507083	55.959722	38.16903952	$\delta$ Uma (Veľká Medvedica)	183.856667	57.0325	28.47293439	$\zeta$ Uma (Veľká Medvedica)	200.98125	54.925278	45.69776601
Megrez ( $\delta$ Uma) Veľká Medvedica	146.122	59.354	$\delta$ Uma (Veľká Medvedica)	183.856667	57.0325	37.80601084	$\lambda$ Uma (Veľká Medvedica)	178.4575	53.694722	32.82700089	$\chi$ Uma (Veľká Medvedica)	176.5125	47.779444	32.52003747
Alnath ( $\beta$ Tauri) Býk	78.247	27.014	$\beta$ Tauri (Býk)	81.572917	28.6075	3.687948771	$\iota$ Aur (Prievozník)	74.248333	33.166111	7.33742513	$\theta$ Aur (Prievozník)	89.930417	37.2125	15.50843754
Mirach ( $\beta$ And) Andromeda	26.213	32.569	$\beta$ And (Andromeda)	17.432917	35.620556	9.295259626	$\mu$ And (Andromeda)	14.188333	38.499444	13.40756438	$\nu$ And (Andromeda)	24.199167	41.405556	9.063125581
Ruchbah ( $\delta$ Cas) Kasiopea	46.378	58.734	$\epsilon$ Cas (Kasiopea)	28.59875	63.67	18.45171609	$\delta$ Cas (Kasiopea)	21.454167	60.235278	24.96900653	$\phi$ Per (Perzeus)	25.915	50.688611	21.98778418
Antares ( $\alpha$ Sco) Škorpión	245.556	-25.479	$\lambda$ (Ser) Had	239.113333	15.661667	41.64207535	$\iota$ (Oph) Hadonos	253.502083	10.165278	36.51923862	$\beta$ (Ser) Had	236.547083	15.421944	41.88135391
Sirius ( $\alpha$ Cma) Veľký pes	101.159	-18.786	$\chi$ Car (Kýl)	119.194583	-52.982222	38.66088273	$\epsilon$ Car (Kýl)	125.628333	-59.509722	47.50968102	$\delta$ Vol (Lietajúca ryba)	109.2075	-67.957222	49.82556999
Achernar ( $\alpha$ Eri) Eridanus	341.998	-58.167	$\alpha$ Ind (Indián)	309.391667	-47.291389	34.37225431	$\alpha$ Pav (Páv)	306.412083	-56.735	35.61471764	$\iota$ Sgr (Strelec)	298.815417	-41.868333	46.15606158
Fomalhaut ( $\alpha$ PsA) Južná ryba	328.669	-34.059	$\beta$ Agr (Vodnár)	322.889583	-5.571111	29.06822115	$\delta$ Cap (Kozorožec)	326.76	-16.127222	18.03310687	$\lambda$ Cap (Kozorožec)	325.022917	-16.662222	17.77475193
Alnasil ( $\gamma$ Sgr) Strelec	266.371	-34.899	$\alpha$ (Oph) Hadonos	263.73375	12.56	47.53221822	Bez názvu Oph (Hanonos)	271.8375	9.563889	44.79766869	$\alpha$ 1 Her (Hercules)	258.662083	14.390278	49.8884789

Tab. 3: Vybrané hviezdy na posúdenie presnosti mapy Planisfero del globo celeste , zdroj: Vlastný (2019) , stredná polohová chyba = 406.3056623°, pozn.: čísla označujú poradie najbližších susedov z katalógu Bright Star Catalogue; B. n. = Bez názvu

### 6.1.4 Analýza zmien polôh hviezd s využitím izočiar

Na zaznamenanie zmien objektov na mape boli naopak vykreslené izolínne bez započítania vplyvu precesie (viz Obr. 54 a Obr. 55).



Obr. 54: Izolínne zmeny zázresu objektov (bez započítania vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)



Obr. 55: Izolinie zmeny zákresu objektov (bez započítania vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)

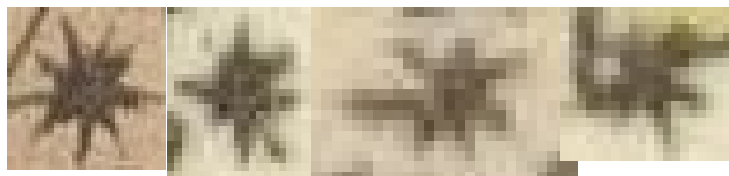
Opäť je zjavná najnižšia presnosť v oblasti polárnych kruhov a rovníkov (ekliptikálneho a kartografického), naopak vyššia v oblasti obratníkov a pólů. V tomto prípade je však podstatnejšia zmena oproti predošlému zákresu (so započítaním vplyvu precesie) a síce patrný posun doprava na „severovýchod“ na severnej pologuli resp. do druhého kvadrantu rektascenzie  $\alpha$  a doľava na „severozápad“ resp. do prvého kvadrantu rektascenzie  $\alpha$ , čo by odpovedalo precesnému posunu.

## 6.2 Planiglobium coeleste

Táto mapa bola získaná vo farebnej podobe. Je rozdelená, podobne ako predošlá mapa na 2 hemisféry (severnú a južnú), obe zachytené v stereografickej projekcii v obecnjej polohe, kartografická sieť je taktiež dvojsúradnicová. Prvá sústava súradníc je ekliptikálna, jej stred je umiestnený do stredu mapy, resp. hemisféry, z ktorého vychádzajú úsečky znázorňujúce ekliptikálne poludníky. Druhou sústavou je sústava rovníková, jej stred je otočený o  $18.079^\circ$  smerom vľavo resp. na juh na severnej hemisfére a o totožnú hodnotu vľavo resp. na sever na južnej hemisfére. Obvod mapového poľa je ohraničený stupnicou  $360^\circ$  vyjadrujúcich stupne ekliptiky, rozdelené na 12 častí po  $30^\circ$ , ale už nie označené podľa jednotlivých znamení. Samotné súhvezdia sú znázornené umeleckými dielami a pomenované latinskými názvami priamo v mapovom poli. Medzi kompozičné prvky patrí veľký názov mapy v hornej časti cez celú mapu. V ľavom hornom rohu je znázornený Mesiac a v pravom Slnko. V strede pod názvom mapy je zaznamenaný názov observatória a pod hemisférami v ľavej časti Jupiter a vpravo Saturn. Kvôli chybám, ktoré tieto kompozičné prvky vykazovali pri analýze bola mapa, podobne ako predošlá, orezaná len na mapové pole.

### 6.2.1 Automatická detekcia hviezd

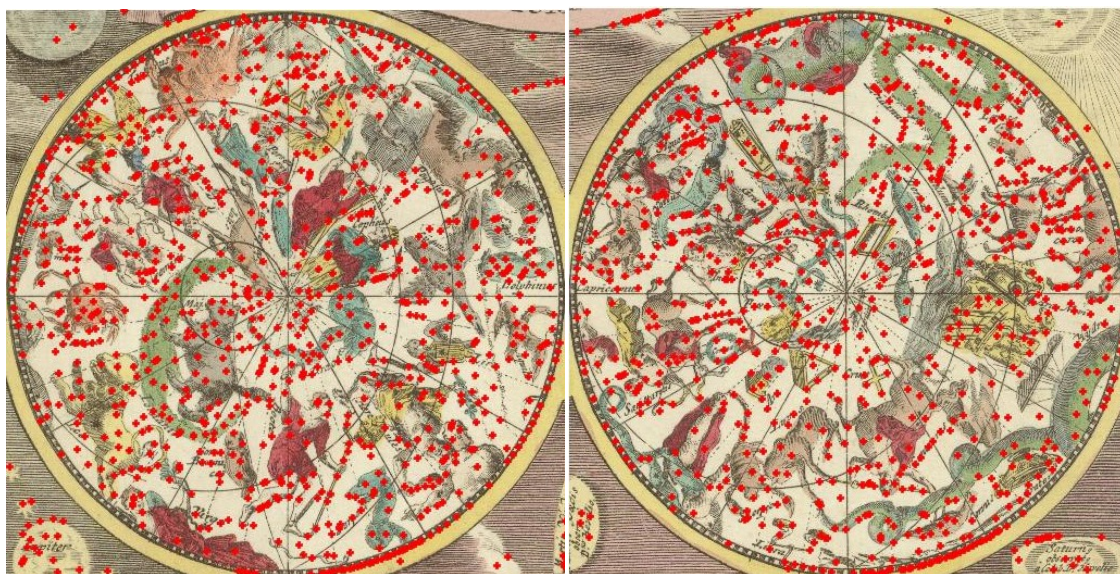
Na identifikáciu hviezd boli použité nasledovné vzory hviezd (viz Obr. 56).



Obr. 56: deväťcípá, osemcípá, sedemcípá a šesťcípá hviezda použitá ako vzorový príklad na identifikáciu hviezd na mape Planiglobium coeleste

Pomocou týchto hviezd a algoritmu popísaného v 4. kapitole boli identifikované hviezdy na mape nasledovne pre severnú hemisféru (viz Obr. 57).

V porovnaní s predošlou mapou, však došlo k viacerým chybným určeniam a to nie len na okraji mapy alebo písmen a číslíc, ale dokonca už aj samotnej súradnicovej siete. Na tejto mape je totiž znázornená aj prerušovaná čiarou (viz Obr. 58).

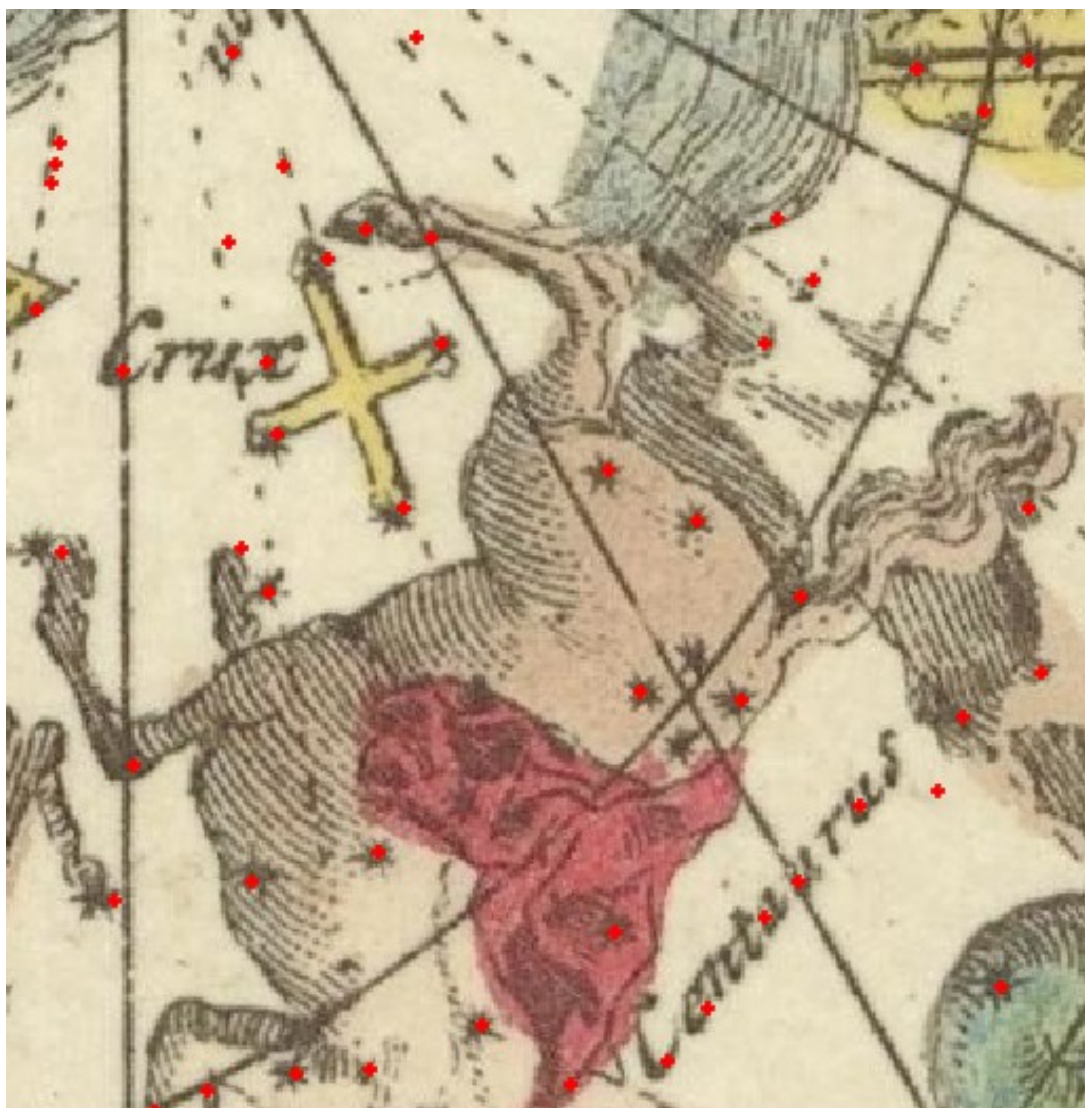


Obr. 57: Identifikácia hviezd na severnej (vľavo) a južnej (vpravo) hemisfére na mape Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019)



Obr. 58: Ukážka chybne identifikovaných objektov (okraj mapového poľa, kartuš, písmo, číslice) na mape Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019)

Viacere hviezdy však boli identifikované správne (viz Obr. 59).



Obr. 59: Ukážka pomerne vysokého množstva správne detekovaných hviezd na mape Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019)

Celkový počet hviezd je podľa algoritmu 3576 z toho na severnej pologuli 1857 a na južnej 1719. Približná miera presnosti je znázornená v tabuľke 4:

Správne identif. obj.	Nesprávne identif. obj.	Neidentif. obj.	Celkovo identif. obj.
31.55%	57.67%	10.78%	100%

Tab. 4: Ukážka miery presnosti algoritmu pomocou percentuálneho zastúpenia identifikácie objektov na mape Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2020)

## 6.2.2 Analýza presnosti mapy s využitím izočiar

Následne bola určovaná presnosť mapy resp. presnosť zákresu pomocou izolínií (viz Obr. 60 a Obr. 61).



Obr. 60: Izolínie presnosti zákresu (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019)



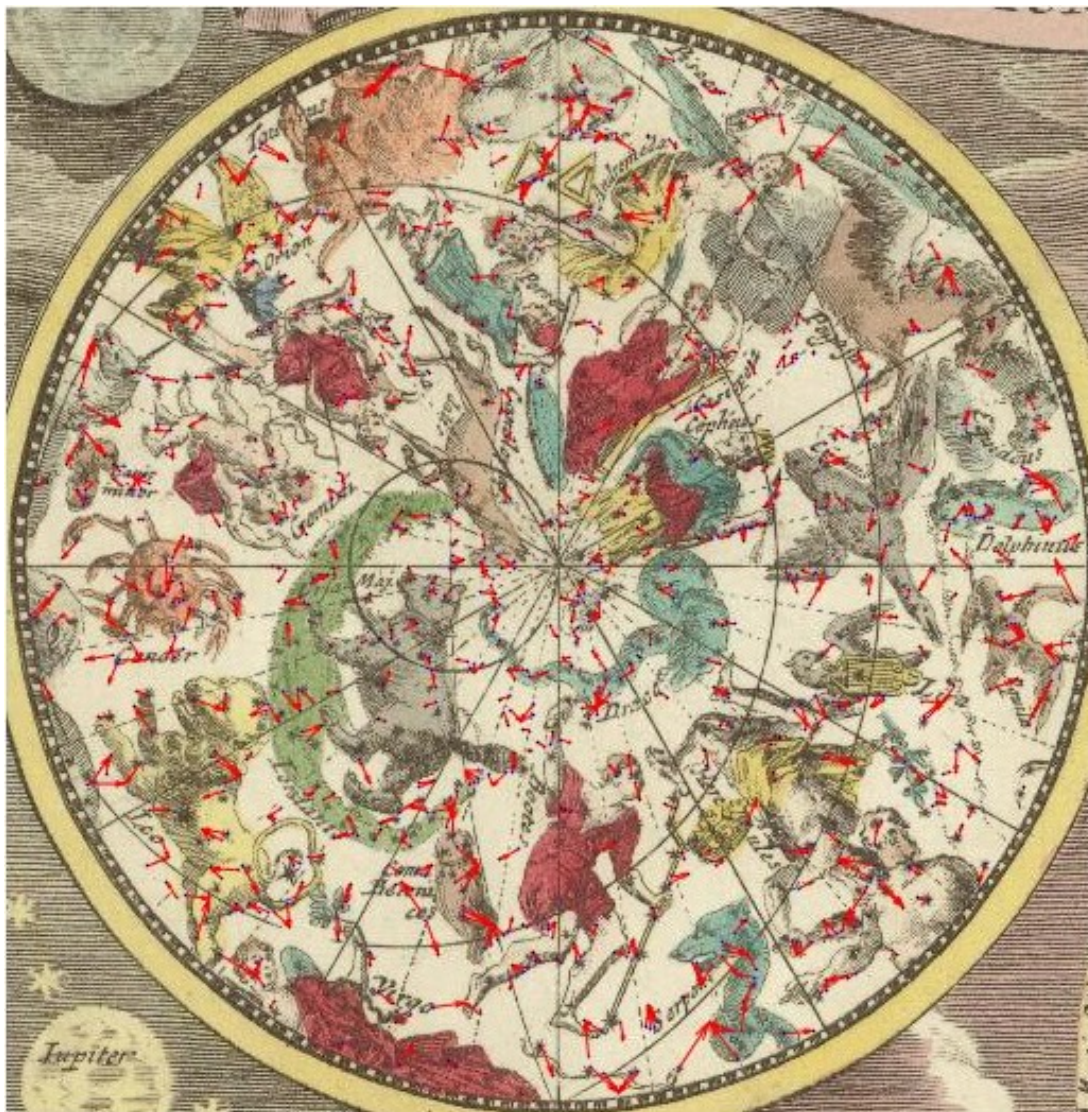


Obr. 61: Izolínie presnosti zákresu (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019)

Na mape sú zaznamenané podobné zákonitosti skreslenia zákresu ako na predošlej mape. Najnižšia presnosť je zaznamenaná na okrajoch mapového poľa, kartografického rovníka a polárneho kruhu. Najvyššia naopak v oblasti obratníkov a pólou. Nepresností je však viac a sú väčšie. Obrázky s izolíniami sú dostupné vo väčšom a lepšom formáte ešte aj v prílohe práce.

### 6.2.3 Analýza polohovej presnosti mapy s využitím polohových odchýlok vybraných hviezd

V ďalšej fázi prebehla analýza presnosti pomocou polohových vektorov polohových odchýlok (viz Obr. 62 a Obr. 63) aj konkrétnych hviezd (viz Tab. 5).



Obr. 62: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019)



Obr. 63: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019)

Táto mapa je oproti predošlej výrazne nepresnejšia a to už len pri zbežnom rozboře. Nie len, že hviezdy na nej zachytené nie sú vyznačené dopodrobna, ale predovšetkým ich polohy nezodpovedajú realite. Najpresnejšia bola znázornená hviezda, najmenej presne hviezda. Stredná hodnota polohovej chyby mapy činí. V prípade vektorových odchýlok ide o podobný prípad ako pri predošlej mape a síce, že z mapy vektorov nie je možné určiť prípadnú zákonitosť nepresnosti zakresu. Hviezdy majú svojich najbližších susedov umiestnených neorganizovane do všetkých smerov.

Názov	$\alpha$	$\delta$	1	$\alpha$	$\delta$	d	2	$\alpha$	$\delta$	d	3	$\alpha$	$\delta$	d
Sheliak ( $\beta$ Lyrae) Lyra	250.347	5.007	$\iota$ Ophiuchi (Hadosos)	253.502083	10.165278	6.0466834	$\kappa$ Ophiuchi (Hadosos)	254.417083	9.375	5.970343342	$\lambda$ Ophiuchi (Hadosos)	247.728333	1.983889	3.9995771
Vega ( $\alpha$ Lyrae) Lyra	241.647	12.063	$\alpha 1$ Hercules	258.662083	14.390278	17.173505	$\iota$ Ophiuchi (Hadosos)	253.502083	10.165278	12.00601273	$\kappa$ Ophiuchi (Hadosos)	254.417083	9.375	13.04991815
Gemma ( $\alpha$ Crb) Severná koruna	217.721	20.066	$\alpha$ Boo (Pastier)	213.915417	19.1825	3.9067933	$\zeta$ Boo (Pastier)	220.287083	13.728333	6.83745603	$\eta$ Boo (Pastier)	208.67125	18.397778	9.202224715
Denebola ( $\beta$ Leo) Lev	167.48	221.578	$\mu$ Leo (Lev)	148.190833	26.006944	196.52	$\zeta$ Leo (Lev)	154.1725	23.417222	198.6071084	Lmi (bez názvu) 3974	151.8575	35.244722	186.9870396
Regulus ( $\alpha$ Leo) Lev	136.474	25.603	$\kappa$ Leo (Lev)	141.16375	26.182222	4.7253839	$\iota$ Cnc (Rak)	131.674167	28.76	5.745001813	$\lambda$ Leo (Lev)	142.93	22.968056	6.973009815
Alkaid ( $\eta$ UMa) Veľká Medvedica	190.067	48.755	$\alpha 2$ CVn (Poľovné psy)	194.007083	38.318333	11.155639	$\beta$ CVn (Poľovné psy)	188.435417	41.3575	7.57529335	$\xi$ UMa (Veľká Medvedica)	200.985	54.921667	12.5391589
Mizar ( $\zeta$ UMa) Veľká Medvedica	200.045	58.007	$\delta$ Uma (Veľká Medvedica)	183.856667	57.0325	16.217638	$\beta$ CVn (Poľovné psy)	188.435417	41.3575	20.29749412	$\epsilon$ UMa (Veľká Medvedica)	193.507083	55.959722	6.850963867
Alioth ( $\epsilon$ UMa) Veľká Medvedica	210.418	58.019	$\delta$ Uma (Veľká Medvedica)	183.856667	57.0325	26.579646	$\beta$ CVn (Poľovné psy)	188.435417	41.3575	27.58331992	$\epsilon$ UMa (Veľká Medvedica)	193.507083	55.959722	17.03583692
Megrez ( $\delta$ Uma) Veľká Medvedica	219.877	59.336	$\gamma$ Uma (Veľká Medvedica)	178.4575	53.694722	41.801902	$\delta$ Uma (Veľká Medvedica)	183.856667	57.0325	36.09391225	$\alpha$ Uma (Veľká Medvedica)	165.932083	61.750833	53.9989397
Alnath ( $\beta$ Tauri) Býk	41.999	33.719	$\beta$ Tri (Trojuholník)	32.385833	34.987222	9.6964616	$\gamma$ Tri (Trojuholník)	34.32875	33.847222	7.671321656	$\gamma 1$ And (Andromeda)	30.975	42.329722	13.98832046
Mirach ( $\beta$ And) Andromeda	19.003	7.969	$\xi$ Peg (Pegas)	341.673333	12.172778	322.69772	$\zeta$ Peg (Pegas)	340.365417	10.831389	321.3751645	$\alpha$ Peg (Pegas)	346.190417	15.205278	327.2674282
Ruchbah ( $\delta$ Cas) Kasiopea	20.848	38.004	$\alpha$ Cyg (Labuť)	310.357917	45.280278	289.60134	$\xi$ Cyg (Labuť)	316.232917	43.927778	295.44431	$\nu$ Cyg (Labuť)	314.293333	41.167222	293.4623816
Antares ( $\alpha$ Sco) Škorpión	208.226	-27.779	$\iota$ (Vir) Panna	214.00375	-6.000556	22.531822	$\mu$ (Vir) Panna	220.765	-5.658333	25.42735593	$\kappa$ Vir (Panna)	213.224167	-10.273611	18.2049531
Sirius ( $\alpha$ Cma) Veľký pes	63.113	14.786	$\alpha$ Hor (Hodiny)	63.500417	-42.294444	57.081759	Neznáma 1195	57.36375	-36.200278	51.30939894	$\upsilon$ Eri (Eridanus)	64.47375	-33.798333	48.60338521
Achernar ( $\alpha$ Eri) Eridanus	355.808	-47.047	$\alpha$ Gru (Žeriav)	332.058333	-46.961111	23.749822	$\delta$ Ind (Indián)	329.479583	-54.9925	27.50120928	$\lambda$ Gru (Žeriav)	331.52875	-39.543333	25.4123395
Fomalhaut ( $\alpha$ PsA) Južná ryba	314.269	-37.055	Bez názvu Aql (Orol) 7884	309.584583	-1.105278	36.253638	Bez názvu Agr (Vodnár) 7951	311.934167	-5.027778	32.11221565	$\epsilon$ Agr (Vodnár)	311.919167	-9.495833	27.65916486
Alnasl ( $\gamma$ Sgr) Strelec	234.999	-40.807	$\mu$ Ser (Had)	237.405	-3.430278	37.454081	$\delta$ Oph (Hanosos)	243.58625	-3.694444	38.0930791	$\epsilon$ Oph (Hanosos)	244.580417	-4.6925	37.36389517

Tab. 5: Vybrané hviezdy na posúdenie presnosti mapy Planiglobium coeleste, zdroj: Vlastný (2019), stredná polohová chyba = 1123.193829°, pozn.: čísla označujú poradie najbližších susedov z katalógu Bright Star Catalogue; B. n. = Bez názvu

## 6.2.4 Analýza zmien polôh hviezd s využitím izočiar

Rozdiel oproti predošlej mape nenastáva pri zachytení vplyvu precesie (viz Obr. 64 a Obr. 65). Opäť je patrný posun doprava na „severovýchod“ na severnej pologuli resp. do druhého kvadrantu rektascenzie  $\alpha$  a doľava na „severozápad“ resp. do prvého kvadrantu rektascenzie  $\alpha$ , čo by odpovedalo precesnému posunu.



Obr. 64: Izolínie presnosti zákresu (bez započítania vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)



Obr. 65: Izolínie presnosti zákresu (bez započítania vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy Planisfero del globo celeste, zdroj: Vlastný (2019)

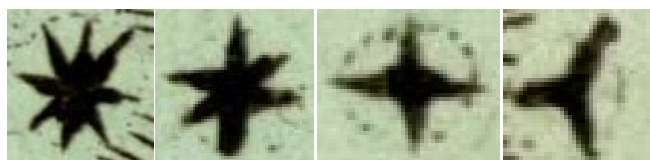
Treba podotknúť fakt, že táto mapa mala so všetkých skúmaných najmenej presný zákres objektov ako aj malú rôznorodosť znakového kľúča. Je preto na mieste úvaha, že šlo primárne o umelecké dielo, než o presnejší kartografický dokument.

## 6.3 PLANISPHAERIUM COELESTE

Táto mapa bola získaná taktiež vo farebnej podobe. Je rozdelená, podobne ako predošlé mapy na 2 hemisféry (severnú a južnú), obe zachytené v stereografickej projekcii v obecnej polohe, kartografická sieť je taktiež dvojsúradnicová. Prvá sústava súradníc je ekliptikálna, jej stred je umiestnený do stredu mapy, resp. hemisféry, z ktorého vychádzajú úsečky znázorňujúce ekliptikálne poludníky. Druhou sústavou je sústava rovníková, jej stred je otočený o  $20.35^\circ$  smerom nahor resp. na juh na severnej hemisfére a o totožnú hodnotu nahor resp. na sever na južnej hemisfére. Obvod mapového poľa je ohraničený stupnicou  $360^\circ$  vyjadrujúcich stupne ekliptiky, rozdelené na 12 častí po  $30^\circ$ , označené podľa jednotlivých znamení zverokruhu. Samotné súhvezdia sú znázornené umeleckými dielami a pomenované latinskými názvami priamo v mapovom poli. Hoci pri matematických znakoch sa mapa odlišovala len v prípade orientácie posunu stredu kartografických sietí, tak medzi kompozičnými prvkami už sú značné pomerne veľké rozdiely. Napríklad najvýraznejším prvkom hneď po mapovom poli nie je názov diela, ale maľba vyobrazujúca nebesá s postavami svätých a anjelikmi. Názov mapy je umiestnený pod ňou. V ľavom hornom rohu je znázornené striedanie dňa a noci, resp. rotácia zeme ako vlastnej osy a v pravom obeh Zeme okolo Slnka. V ľavej dolnej časti je znázornené iným spôsobom opäť striedanie dňa a noci a v pravej opäť rotácia Zeme okolo Slnka. Medzi nimi sú potom zakreslené 3 modely slnečnej sústavy, zľava od Tycha de Brahe, v strede od Mikuláša Koperníka a vpravo od Klaudia Ptolemaia. Kvôli chybám, ktoré tieto kompozičné prvky vykazovali pri analýze bola mapa, podobne ako predošlá, orezaná len na mapové pole.

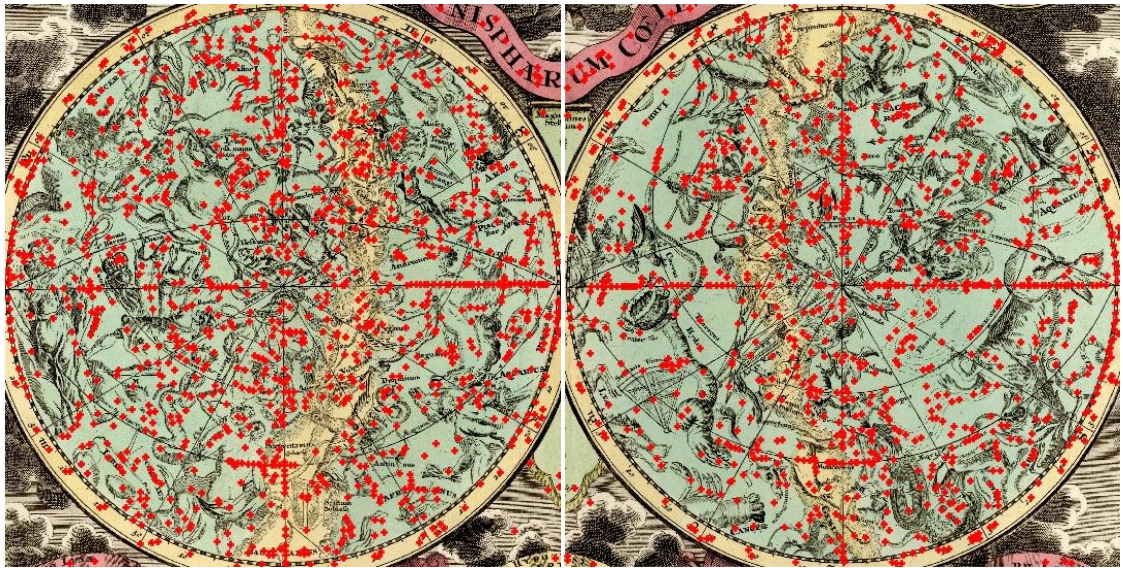
### 6.3.1 Automatická identifikácia hviezd

Na identifikáciu hviezd boli použité nasledovné vzory hviezd (viz Obr. 66).



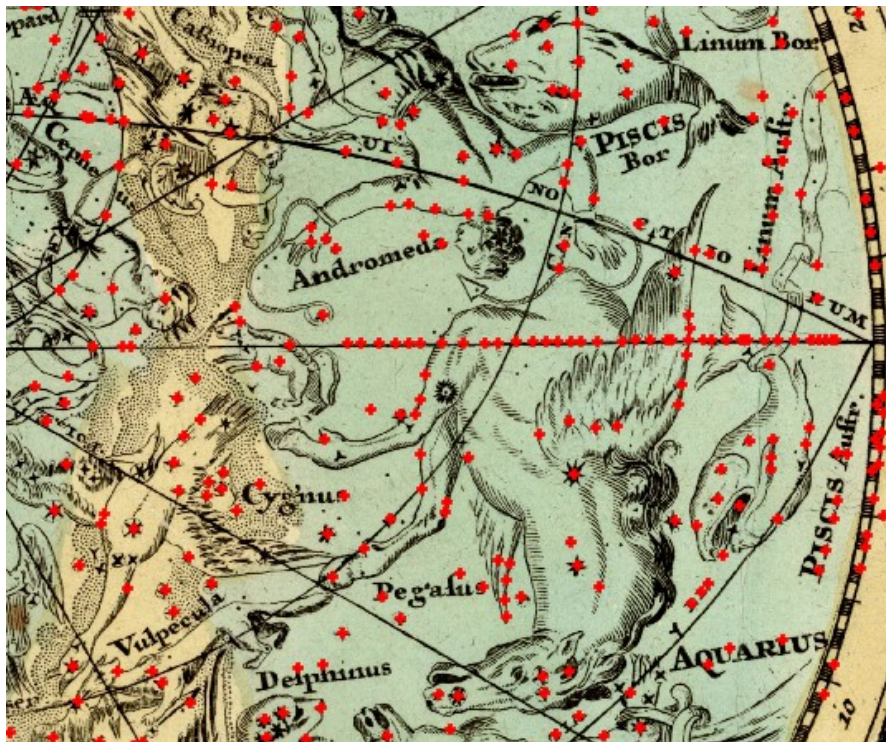
Obr. 66: Osemcípá, šesťcípá, štvorcípá a trojcípá hviezda použitá ako vzorový príklad na identifikáciu hviezd na mape PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019)

Pomocou týchto hviezd a algoritmu popísaného v 4. kapitole boli identifikované hviezdy na mape nasledovne pre obe hemisféry (viz Obr. 67).



Obr. 67: Identifikácia hviezd na severnej (vľavo) a južnej (vpravo) hemisfére na mape PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019)

Celkový počet hviezd je podľa algoritmu 3431 z toho na severnej pologuli 1844 a na južnej 1587. Opäť sa vyskytli chyby spojené s chybnou identifikáciou, prípadne neidentifikáciou hviezd (viz Obr. 68). Ale aj príklady pozitívneho určenia (viz Obr. 69).



Obr. 68: Ukážka chybne identifikovaných objektov (okraj mapového poľa, zemepisná sieť, písmo, číslice) na mape PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019)





Obr. 69: Ukážka pomerne vysokého množstva správne detekovaných hviezd na mape PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019)

Približnú mieru presnosti znázorňuje tabuľka 6.

Správne identif. obj.	Nesprávne identif. obj.	Neidentif. obj.	Celkovo identif. obj.
41.39%	45.86%	12.75%	100%

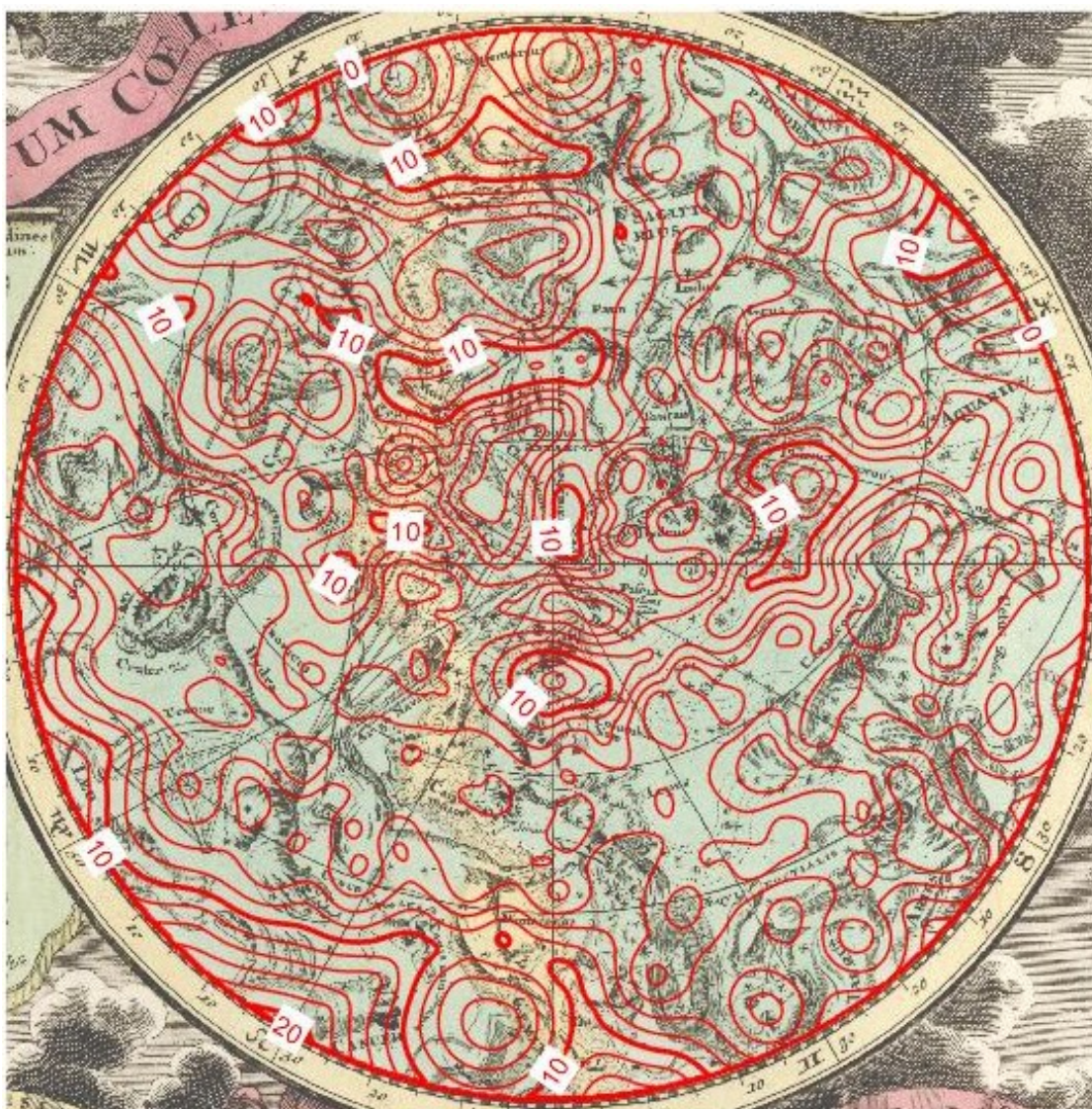
Tab. 6: Ukážka miery presnosti algoritmu pomocou percentuálneho zastúpenia identifikácie objektov na mape PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2020)

### 6.3.2 Analýza presnosti mapy s využitím izočiar

Miera presnosti zákresu je opäť vyjadrená izolínami (viz Obr. 70 a Obr. 71).



Obr. 70: Izolínie presnosti zákresu (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019)

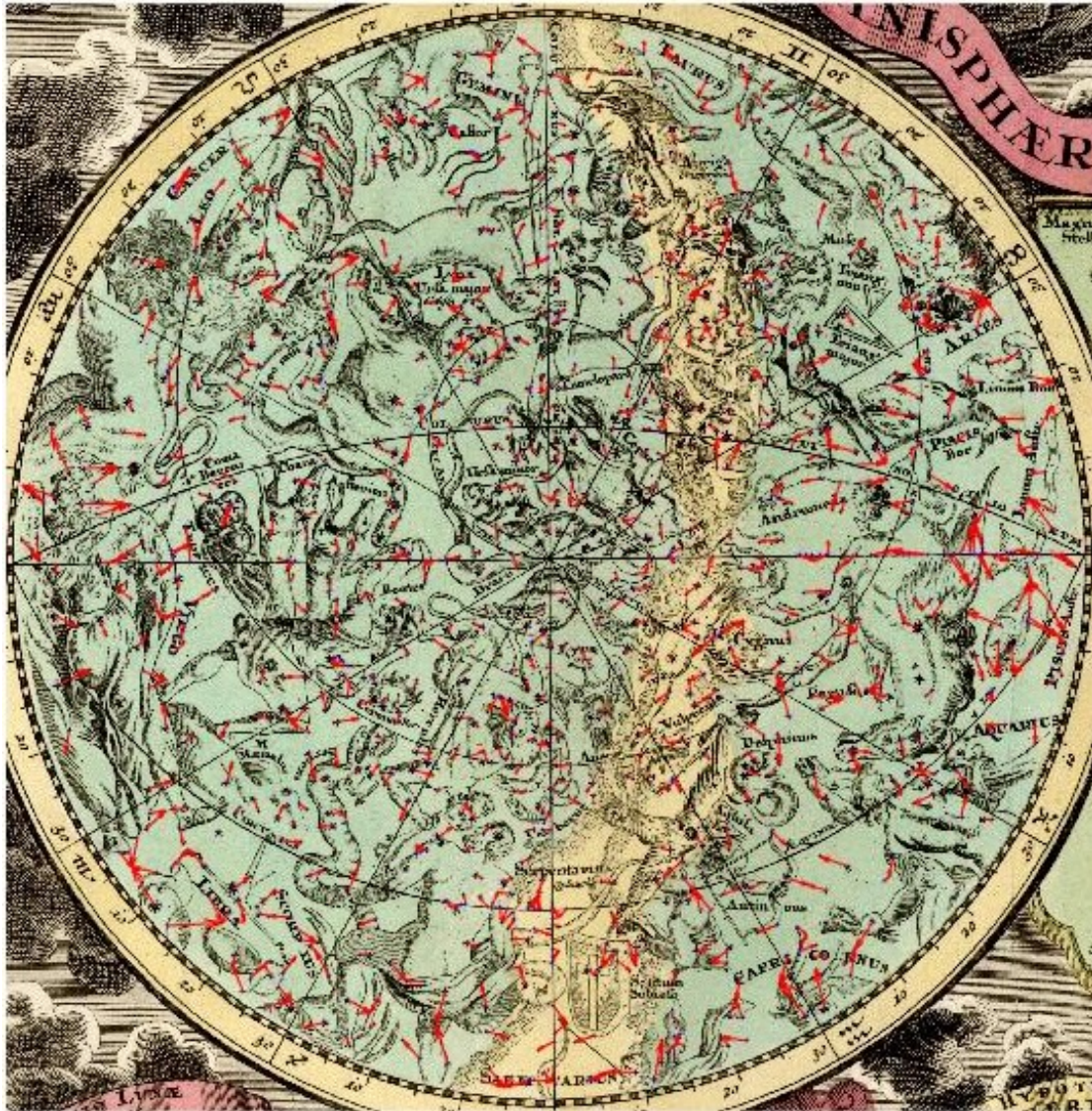


Obr. 71: Izolínie presnosti zákresu (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019)

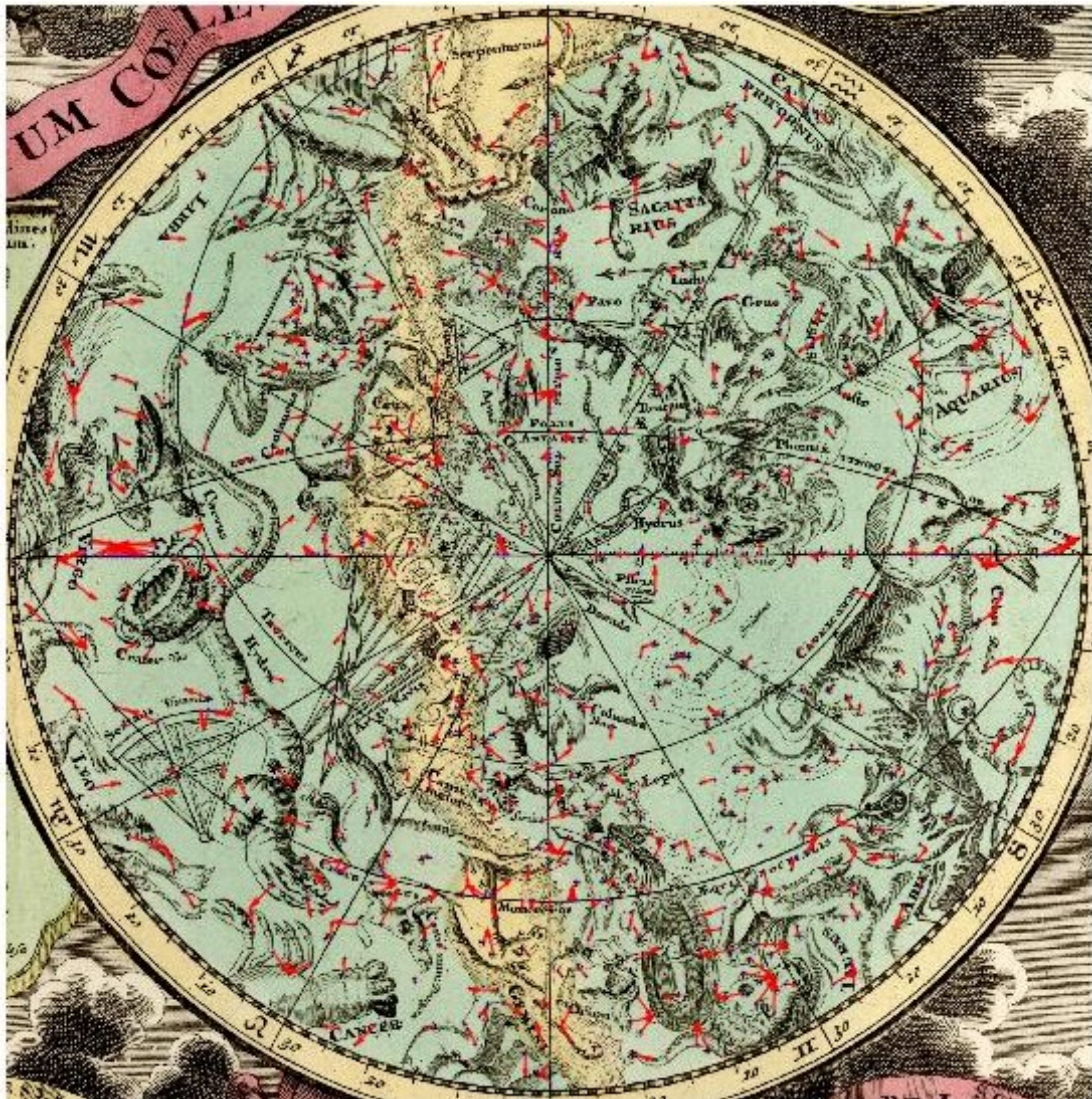
V tomto prípade je zaznamenaná najvyššia presnosť medzi kartografickým rovníkom a obratníkmi. Na okraji mapového poľa ako aj v oblasti polárnej kružnice je presnosť podobná ako pri predošlých mapách avšak nepresnosť zostáva aj na póloch, k čomu u predošlých mapách nedošlo. Taktiež mapa vykazuje lepšiu presnosť ako mapa „Planiglobium coeleste“, avšak horšiu než mapa „Planisfero del globo celeste“. Ide tak trochu o „strednú cestu“.

### 6.3.3 Analýza polohovej presnosti mapy s využitím polohových odchýlok vybraných hviezd

Presnosť je opäť hodnotená aj vektormi polohových odchýlok (viz Obr. 72 a Obr. 73) a výberom konkrétnych hviezd (viz Tab. 7).



Obr. 72: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019)



Obr. 73: Vektory polohových posunov hviezd (so započítaním vplyvu precesie) na južnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019)

Podobne ako na predošlých mapách aj v tomto prípade na vektoroch posunov sú podobné hodnoty vo vzdialenostiach a taktiež nekoordinované smery. Naopak z tabuľky je patrné, že hodnoty polohových odchýlok dosahujú nižšie hodnoty než na mape „Planiglobium coeleste“, avšak vyššie než mapa „Planisfero del globo celeste“. Najpresnejšia bola znázornená hviezda, najmenej presne hviezda. Stredná hodnota polohovej chyby mapy činí.

Názov	$\alpha$	$\delta$	1	$\alpha$	$\delta$	d	2	$\alpha$	$\delta$	d	3	$\alpha$	$\delta$	d
Sheliak ( $\beta$ Lyr) Lyra	284.277	33.533	$\alpha$ Cyg (Labuť)	282.52	33.362778	1.765226	Bez názvu Cyg (Labuť)	284.735833	32.689444	0.960268	Bez názvu Cyg (Labuť)	283.625833	36.898889	3.4283
Vega ( $\alpha$ Lyr) Lyra	282.265	38.993	$\eta$ Cep (Kefeus)	279.234583	38.783611	3.037642	$\alpha$ Cep (Kefeus)	281.193333	37.605	1.753572	$\theta$ Cep (Kefeus)	274.965417	36.064444	7.8651
Gemma ( $\alpha$ Crb) Severná koruna	218.107	27.112	$\theta$ Dra (Drak)	233.672083	26.714722	15.57015	$\eta$ Dra (Drak)	231.957083	29.105833	13.99286	$\tau$ Her (Hercules)	235.685833	26.295556	17.598
Denebola ( $\beta$ Leo) Lev	167.239	20.449	$\xi$ Uma (Veľká Medvedica)	176.465	6.529444	16.69949	$\nu$ Uma (Veľká Medvedica)	181.302083	8.733056	18.30392	Lmi (bez názvu)	177.265	14.571944	11.622
Regulus ( $\alpha$ Leo) Lev	145.627	19.701	$\epsilon$ Leo (Lev)	151.833333	16.762778	6.866711	$\lambda$ Leo (Lev)	154.994167	19.840556	9.368207	$\mu$ Leo (Lev)	154.992917	19.841667	9.367
Alkaid ( $\eta$ UMa) Veľká Medvedica	172.194	50.999	$\kappa$ Dra (Drak)	188.370833	69.788333	24.79373	Bez názvu UMa (Veľká Medvedica)	172.850833	69.331111	18.34387	$\delta$ UMa (Veľká Medvedica)	183.856667	57.0325	13.131
Mizar ( $\zeta$ UMa) Veľká Medvedica	160.439	56.021	$\nu$ Uma (Veľká Medvedica)	200.98125	54.925278	40.55705	Bez názvu UMa (Veľká Medvedica)	142.882083	63.061944	18.91614	Neznáma 3751	144.271667	81.326389	30.029
Alioth ( $\epsilon$ Uma) Veľká Medvedica	154.017	56.023	Bez názvu UMa (Veľká Medvedica)	142.882083	63.061944	13.1732	Neznáma 3751	144.271667	81.326389	27.11518	$\nu$ Uma (Veľká Medvedica)	147.7475	59.038611	6.957
Megrez ( $\delta$ Uma) Veľká Medvedica	145.606	57.391	$\omicron$ Uma (Veľká Medvedica)	127.56625	60.718056	18.34399	B. n. Uma (Veľká Medvedica) 2560	142.882083	63.061944	6.291211	Neznáma 3751	144.271667	81.326389	23.973
Alnath ( $\beta$ Tauri) Býk	108.756	29.414	Bez názvu Ori (Orion)	82.69625	5.948056	35.06795	$\gamma$ Ori (Orion)	81.282917	6.349722	35.87104	$\phi$ Ori (Orion)	84.22625	9.290556	31.728
Mirach ( $\beta$ And) Andromeda	56.327	35.007	$\eta$ Psc (Ryby)	22.870833	15.345833	38.80563	$\beta$ Ari (Baran)	28.66	20.808056	31.0978	$\omicron$ Psc (Ryby)	26.348333	9.157778	39.584
Ruchbah ( $\delta$ Cas) Kasiopea	74.479	58.105	$\lambda$ Tauri (Býk)	60.17	12.490278	47.80638	$\gamma$ Tauri (Býk)	64.948333	15.6275	43.53357	B. n. Tauri (Býk) 1394	66.586667	15.618333	43.213
Antares ( $\alpha$ Sco) Škorpión	246.776	-26.478	$\theta$ (Sgr) Strelec	239.113333	15.661667	42.83069	$\iota$ Oph (Hadosos)	253.502083	10.165278	37.25547	$\beta$ (Ser) Had	236.547083	15.421944	43.13
Sirius ( $\alpha$ Cma) Veľký pes	289.259	-18.747	$\lambda$ (Sgr) Strelec	299.934167	-35.276389	19.67689	$\iota$ (Sgr) Strelec	298.815417	-41.868333	25.01842	$\alpha$ (Sgr) Strelec	290.971667	-40.616111	21.936
Achernar ( $\alpha$ Eri) Eridanus	181.8	-60.763	Bez názvu 4102	156.09875	-74.031667	28.92424	$\gamma$ Cha (Chameleón)	158.867083	-78.607778	29.05778	$\omega$ Car (Kýl)	153.434167	-70.038056	29.844
Fomalhaut ( $\alpha$ PsA) Južná ryba	169.549	-32.051	$\psi$ Vel (Plachty)	142.675	-40.466667	28.16088	Bez názvu 3836	144.206667	-49.355278	30.68667	$\lambda$ Vel (Plachty)	136.999167	-43.4325	34.482
Alnasl ( $\gamma$ Sgr) Strelec	97.373	-33.009	$\kappa$ Ori (Orion)	86.939167	-9.669722	25.56534	$\gamma$ Mon (Jedorožec)	93.71375	-6.274722	26.98355	$\eta$ Lep (Zajac)	89.10125	-14.167778	20.577

Tab. 7: Vybrané hviezdy na posúdenie presnosti mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019), stredná polohová chyba = 407.6451977° pozn. čísla označujú poradie najbližších susedov z katalógu Bright Star Catalogue; B. n. = Bez názvu

### 6.3.4 Analýza zmien polôh hviezd s využitím izočiar

Na vyjadrenie zmeny zákresu boli vykreslené izolínie so započítaním vplyvu precesie (viz Obr. 74 a Obr. 75).



Obr. 74: Izolínie presnosti zákresu (bez započítania vplyvu precesie) na severnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019)



Obr. 75: Izolíne presnosti zákresu (bez započítania vplyvu precesie) na a južnej hemisfére mapy PLANISPHAERIUM COELESTE, zdroj: Vlastný (2019)

Aj v tomto prípade je na mape patrný posun objektov. A má taktiež podobné zákonitosti. Opäť je patrný posun doprava na „severovýchod“ na severnej pologuli resp. do druhého kvadrantu rektascenzie  $\alpha$  a doľava na „severozápad“ resp. do prvého kvadrantu rektascenzie  $\alpha$ , čo by odpovedalo precesnému posunu. Pri tomto mapovom diele však nie sú zmeny také výrazné ako na predošlých mapách.



## 7. Záver

Základným cieľom práce bola analýza objektov na starých mapách hviezdnej oblohy s cieľom zistiť presnosť ich zákresu a zmenu polohy objektov v čase. Tieto údaje boli rozdelené za každú mapu zvlášť.

V prvej časti práce je venovaný priestor literárnej rešerši, ktorá zahŕňa zdroje literatúry, ktoré sa danej téme už v minulosti venovali a tiež je zameraná na samotnú históriu nebeských máp.

V kapitole 4 je popísaná metodika postupu, ktorá popisuje, akým spôsobom pristupovať k analýzám starých máp nebeskej sféry. Prvý krok predstavovala obrazová korelácia, ktorá bola použitá pre identifikáciu jednotlivých hviezd na základe ich podobnosti so vzorom. Ručný zber identických bodov by bol pomerne zdĺhavý. Mapy hviezdnej oblohy boli vyhotovené v stereografickej projekcii, pixelové súradnice hviezd bolo možné previesť na ekliptikálne a rovníkové. V práci bol zohľadnený vplyv precesie v čase na polohu hviezd, ktorej vplyv bol matematicky korigovaný. Ukázalo sa však, že vzhľadom k malej geometrickej presnosti starých máp hviezdnej oblohy vplyv precesie nehral kľúčovú úlohu, hoci bol viditeľný.

Implementácia jednotlivých krokov metodiky prebehla v kapitole 5. Všetky skripty boli realizované v prostredí Matlab.

Praktické výstupy analýz je možné nájsť v kapitole 6. Metodika bola otestovaná na trojici starých máp nebeskej sféry z fondu Mapové sbírky Přírodovědecké fakulty UK. Pre každú mapu bola zhodnotená jej polohová presnosť, ktorá bola vizualizovaná prostredníctvom izočiar, vektorov polohových odchýlok a strednou hodnotou polohovej odchýlky, pomocou ktorej hodnotíme gometrickú presnosť mapy.

Po vykonaní analýz je možné vysloviť záver, že jediná mapa, u ktorej je možné uvažovať o relevantnosti výsledkov a presnosti zákresu je mapa „Planisfero del globo celeste“. Jej polohovú presnosť charakterizovanú strednou hodnotou je možné hodnotiť ako najlepšiu zo všetkých hodnotených máp. Z výsledkov je patrné, že pri 9 hviezdach určených ich najbližší sused presne, pri 2 je hviezda samotná určená do 3 miesta a pri ostatných sa susedia nachádzajú v okolitých súhvezdiach, prípadne ich tvoria iné hviezdy zo súhvezdia, v ktorom sa skúmaná hviezda nachádza. Niet však pochyb, že mapa je aj výrazným umeleckým dielom.

Mapa „Planiglobium coeleste“ je naopak zo všetkých máp najmenej presná, stredná polohová odchýlka činí. Polohové odchýlky sú zo všetkých najväčšie a ani najbližší sused neodpovedá umiestneniu danej hviezdy, hoci treba priznať, že pri väčšine hviezd sú ako najbližší susedia aspoň určené hviezdy z daného súhvezdia, prípadne okolitých súhvezdí. Už pri letmom nehliadnutí je však zrejmé, že mapa je predovšetkým umeleckým dielom a nejde primárne o polohovo presnú mapu.

Mapa „PLANISPHAERIUM COELESTE“ nie je tak presná ako „Planisfero del globo celeste“ ani tak nepresná ako „Planiglobium coeleste“, stredná polohová odchýlka činí. Jej hodnoty odchýlok aj polohy najbližších susedov sú v podstate medzi hodnotami máp predošlých. Označiť ju za dielo vhodné na orientáciu na oblohe je možné, nedosahuje však až tak vysokú presnosť, ide ale taktiež o umelecké dielo.

V praxi sa teda ukázalo, že väčšina z vyššie uvedených máp predstavujú skôr umelecké diela, ktoré je možné pre orientáciu na hviezdnej oblohe použiť len s výhradami.

Táto práca naznačila smer, akým je možné pristúpiť k semiautomatickej analýze starých máp nebeskej sféry.

Automatická identifikácia identických bodov s využitím obrazovej korelácie, ktorá nahrádza ručný zber identických bodov, sa ukázala ako problematická, nevýhodou je nižšia úspešnosť rozpoznávania hviezd. Dôvodom je fakt, že ide o ručne kreslenú mapu, u ktorej môže dochádzať k tvarovým, veľkostným aj farebným odchýlkam pri zákrese jednotlivých hviezd. Výsledky obrazovej korelácie museli byť preto manuálne opravené.

Zohľadnenie vplyvu precesie, ktoré je jedným z inovatívnych bodov navrhutej metodiky, sa ukázalo ako dôležitý krok, ktorý spresnil dosiahnuté výsledky. U máp, ktoré sú datované do 17. – 18. storočia hrá vplyv precesie podstatnú rolu. Avšak geometrická nepresnosť týchto máp nie je tak dobrá a presahuje vplyv tejto chyby. Na tento bod je možné naviazať aj v prípadnom ďalšom výskume a venovať sa zohľadneniu ďalších astronomických javov na polohu hviezd.

## Zoznam literatúry

BARENTINE, C. J. 2016. *Uncharted Constellations*. Springer International Publishing Switzerland, 2016. 207 s. ISBN 978-3-319-27619-9.

BAYER, T. 2014. *Estimation of an Unknown Cartographic Projection and its Parameters from the Map*. *GeoInformatica*, 18, č. 3, s. 621-669. ISSN 1384-6175.

BAYER, T. 2016. *Advanced Methods for the Estimation of an Unknown Projection from a Map*. *GeoInformatica*, 20, č. 2, s. 241-284. ISSN 1384-6175.

BAYER, T. 2017. *Estimation of the Cartographic Projection and its Application in Geoinformatics-habilitation thesis presentation*. *Geoinformatics FCE CTU*, 16, č. 1, s. 17-52. ISSN 1802-2669.

BESL, P. J.; MCKAY, N. D. 1992. *A Method for Registration of 3D Shapes*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14, č. 2, s. 239-256. ISSN: 1939-3539.

BONNET-BIDAUD, J. M.; WHITEFIELD, S. 2009. *The Dunhuang chinese sky: a comprehensive study of the oldest known star atlas*. *Journal of Astronomical History and Heritage*, 12, č. 1, s. 39-59. ISSN: 1440-2807.

DATHE, H.; KRÜGER, H. 2018. *Morphometric findings on the Nebra Sky Disc*. *Time and Mind*, 11, č. 1, s. 89-104. ISSN 1751-696X.

DU, S.; ZHENG, N.; XIONG, L.; YING, S.; XUE, J. 2010. *Scaling iterative closest point algorithm for registration of  $m$ -D point sets*. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 21, č. 5-6, s. 442-452. ISSN: 1047-3203.

FENG, S.; DENG, L.; SHU, G.; WANG, F.; DENG, H.; JI, K. 2012. *A Subpixel Registration Algorithm for Low PSNR Images*. *IEEE 5th International Conference on Advanced Computational Intelligence*, s. 626-630.

GOLD, S.; RANGARAJAN, A.; LU, CH. P.; PAPPU, S.; MJOLSNESS, E. 1997. *New algorithms for 2d and 3d point matching: pose estimation and correspondence*. *Pattern Recognition*, 31, č. 8, s. 1019-1031. ISSN: 0031-3203.

- GONZALEZ, C. I.; MELIN, P.; CASTRO, J. R.; MENDOZA, O.; CASTILLO, O. 2016. *An improved sobel edge detection method based on generalized type-2 fuzzy logic*. Soft Computing, 20, č. 2, s. 773-784. ISSN: 1433-7479.
- GONZALEZ, G. I.; MELIN, P.; CASTRO, R. J.; CASTILLO, O.; MENDOZA, O. 2016. *Optimization of interval type-2 fuzzy systems for image edge detection*. Applied Soft Computing, 47, s. 631-643. ISSN: 1568-4946.
- GRUEN, A. 2012. *Development and Status of Image Matching in Photogrammetry*. The Photogrammetric Record, 27, č. 137, s. 36-57. ISSN 1477-9730.
- HEMALATHA, G.; SUMATHI, C. P. 2016. Preprocessing Techniques of Facial Image with Median and Gabor Filters. 2016 International Conference on Information Communication and Embedded Systems, s. 1-6. ISBN: 978-1-5090-2552-7.
- HLAVÁČ, V.; SEDLÁČEK, M. 2002. *Zpracování signálů a obrazů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 220 s. ISBN 80-01-02114-9.
- HO, J.; YANG, M-H.; RANGARAJAN, A.; VEMURI, B. 2007. *A New Affine Registration Algorithm for Matching 2D Point Sets*. Computer Society, ISSN 0-7695-2794-9.
- HOFFLEIT, D.; WARREN, W. H. JR. 1991. *Yale Bright Star Catalog*. 5. upravené vyd. New Haven: Yale University, 1964. 418 s.
- HOŠEK, L. (2007): Filtrace šumu z digitálních fotografií. Bakalářská práce. Ústav formální a aplikované lingvistiky MFF UK, Praha.
- CHEN, Y.; MEDIONI, G. 1991. *Object modelling by registration of multiple range images*. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991, s. 2724-2729. ISBN 0-8168-2163-X.
- CHETVERIKOV, D.; STEPANOV, D.; KRSEK, P. 2005. *Robust Euclidean alignment of 3D point sets: the trimmed iterative closest point algorithm*. Image and Vision Computing, 23, č. 3, s. 299-309. ISSN: 0262-8856.
- JAIN, V.; LI, X. 2004. *Point Matching Methods: Survey and Comparison*. Project report for CMPT 888

- JIAO, W.; FANG, Y.; HE, G. 2008. *An integrated feature based method for sub-pixel image matching*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress Beijing 2008, 37, s. 1157-1160. ISSN: 1682-1750.
- JOGLEKAR, H.; VAHIA, N. M.; SULE, A. 2011. *Oldest sky-chart with Supernova record*
- KABELÁČ, J.; KOSTELECKÝ, J. 2009. *Geodetická astronomie 10*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2009. 251 s. ISBN 978-80-01-04322-6.
- KAPOUTSIS, C. A.; VAVOULIDIS, C. P.; PITAS, I. 1999. *Morphological iterative closest point algorithm*. IEEE Transactions on Image Processing, 8, č. 11, s. 1644-1646. ISSN: 1941-0042.
- KARYBALI, I. G.; PSARAKIS, E. Z.; BERBERIDIS, K.; EVANGELIDIS, G. D. 2008. *An efficient spatial domain technique for subpixel image registration*. Signal Processing: Image Communication, 23, č. 9, s. 711-724. ISSN 0923-5965.
- KIM, D-S.; LEE, W-H.; KWEON, I-S. 2004. *Automatic edge detection using 3x3 ideal binary pixel patterns and fuzzy-based edge thresholding*. Pattern Recognition Letters, 25, č. 1, s. 101-106. ISSN: 0167-8655.
- KLÍČ, A.; VOLKA, K.; DUBCOVÁ, M. 2002. *Fourierova transformace. S příklady z infračervené spektroskopie*. 3. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2002. 196 s. ISBN 80-7080-478-5.
- LEWIS, J. P. 2001. *Fast Normalized Cross-Correlation*. Industrial Light & Magic, 10
- LIN, Y-H.; CHEN, CH-H.; WEI, CH-CH. 2006. *New method for subpixel image matching with rotation invariance by combining the parametric template method and the ring projection transform process*. Optical Engineering, 45, č. 6, s. 2201-2009. ISSN: 0091-3286.
- LV, Y.; FENG, Q.; QI, L. 2008. *A study of sub-pixel interpolation algorithm in digital speckle correlation method*. International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Applications, 7160, s. 740-748.

- MA, N.; SUN, P.; MEN, Y.; MEN, CH.; LI, X. 2017. *A Subpixel Matching Method for Stereovision of Narrow Baseline Remotely Sensed Imagery*. Mathematical Problems in Engineering, 2017, s. ISSN: 1024-123X.
- NOVOTNÝ, M. (2010): Grafické filtry pro projekt AGE. Bakalářská práce. Katedra distribuovaných a spolehlivých systémů MFF UK, Praha.
- PAN, B.; XIE, H.; XU, B.; DAI, F. 2006. *Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation*. Measurement Science and Technology, 17, č. 6, s. 1615-1621. ISSN: 1361-6501.
- PERCIVALDI, E. 2018. *Atlasy hvězd. Cesta do nebe a zlatý věk kartografie*. 1. vyd. Praha: Slovart, 2018. 207 s. ISBN 978-80-7529-642-9
- POLACHOVÁ, M. (2018): Design LMMSE filtru pro MR obrazová data. Bakalářská práce. Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství VŠB, Ostrava.
- POVAŽAN, J. (2017): Analýza atlasových map planisféry v 17. století. Bakalářská práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PřF UK, Praha.
- REMONDINO, F.; SPERA, M. G.; NOCERINO, E.; MENNA, F.; NEX, F.; 2014. *State of the art in high density image matching*. The Photogrammetric Record, 29, č. 146, s. 144-166. ISSN 1477-9730.
- SHAPIRO, L. S.; BRADY, J. M. 1992. *Feature Based Correspondence: An Eigenvector Approach*. Image and Vision Computing, 10, č. 5, s. 283-288. ISSN: 0262-8856.
- SPRINZAK, J.; WERMAN, M. 1994. *Affine point matching*. Pattern Recognition Letters, 15, č. 4, s. 337-339. ISSN: 0167-8655.
- STEWART, C. V.; TSAI, CH. L.; ROYSAM, B. 2003. *The dual-bootstrap iterative closest point algorithm with application to retinal image registration*. IEEE Transactions on Image Processing, 22, č. 11, s. 1379-1394. ISSN: 1558-254X.
- SZELISKI, R.; SCHARSTEIN, D. (2002): Symmetric Sub-Pixel Stereo Matching. In: Heiden, A.; Sparr, G.; Nielsen, M.; Johansen, P. (eds): Computer Vision - ECCV 2002. 2. vyd., Springer, Copenhagen, 525-540.

- ŠVEJDA, A. 1981. *Z dějin geodézie a kartografie 17. Zeměměřičské práce, mapová díla, osobnosti a sbírky*. 17. zvázok. Praha: Národní technické muzeum v Praze, 2014. 325 s. ISBN 978-80-7037-249-4.
- THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. 2006. *Pattern recognition*. 3. vyd. San Diego: Academic Press, 2006. 837 s. ISBN 978-0-12-369531-4.
- TIAN, Q.; HUHNS, M. N. 1986. *Algorithms for Subpixel Registration*. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 35, č. 2, s. 220-233. ISSN: 0734-189X.
- VOGEL, M. 2007. *Hvězdy a souhvězdí*. 1. vyd. Praha: Euromedia Group, k. s., 2008. 256 s. ISBN 978-80-242-2192-2.
- VŠETIČKA, V. (2010): Digitální filtry pro obrazová data. Bakalářská práce. Ústav telekomunikací VUT, Brno.
- WEBER, G.; KNIPPING, L.; ALT, H. 1993. *An Application of Point Pattern Matching in Astronautics*. Journal of Symbolic Computation, 17, č. 4, s. 321 -340. ISSN: 0747-7171.
- WOLF, M. a kol. 1992. *Astronomická příručka*. Praha: Academia, 1992. 200 s. ISBN 80-200-0467-X
- WOODWARD, D. a spol. 2007. *The History of Cartography. Cartography in the European Renaissance*. 3. vyd. Chicago: University of Chicago Press, 2007. 2272 s. ISBN 9780226907321.
- XIE, J.; MO, F.; YANG, CH.; LI, P.; TIAN, S. 2016. *A novel sub-pixel matching algorithm based on phase correlation using peak calculation*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, s. 253-257.
- YAJI, G. S.; SARKAR, S.; MANIKANTAN, K.; RAMACHADRAN, S. 2012. *DWT feature extraction based face recognition using intensity mapped unsharp masking and laplacian of gaussian filtering with scalar multiplier*. Procedia Technology, 6, s. 475-484. ISSN: 2212-0173.
- ZINBER, T.; SCHMIDT, J.; NIEMANN, H. 2003. *A refined icp algorithm for robust 3-d correspondence estimation*. Institute of Electrical and Electronics Engineers,

Proceedings 2003 International Conference on Image Processing, s. 695-698. ISSN: 1522-4880.

ZOU, Q.; CAO, Y.; LI, Q.; MAO, Q.; WANG, S. 2012. *CrackTree: Automatic crack detection from pavement images*. Pattern Recognition Letters, 33, č. 3, s. 227-238. ISSN: 0167-8655.

## **Elektronické zdroje:**

Slideline (2019).

Dostupné z: <https://slideslive.com/38898274/premyslovsky-globus-hvezdne-oblohy> [cit. 10. 04. 2019]

Česká Astronomická Společnost (2020).

Dostupné z: <https://www.astro.cz/> [cit. 31. 07. 2020]

Jason Danton (1999).

Dostupné z: <http://greatpanic.com/> [cit. 09. 04. 2018]

David Rumsey Map Collection (2020). Dostupné z: <http://www.davidrumsey.com> [cit. 18. 05. 2017]

Library of Congress (2017). Dostupné z: <https://www.loc.gov/maps/> [cit. 15. 06. 2017]

Trove (2020). Dostupné z: <https://trove.nla.gov.au/> [cit. 31. 07. 2020]

International astronomical union (2020).

Dostupné z: <https://www.iau.org/> [cit. 11. 08. 2020]

## **Zdroje dát:**

Mapová sbírka Univerzity Karlovy (2019). [cit. 30. 04. 2019]

Yale Bright Star Catalog (2020).

Dostupné z: <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/bsc5.html> [cit. 30. 07. 2020]