

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Naváděcí systém pro malý astronomický dalekohled na azimutální montáži

Daniel Jirsa

Vedoucí: doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.

Studijní program: Elektronika a komunikace

Zaměření: Audiovizuální technika a zpracování signálů

Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jirsa** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **474770**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Naváděcí systém pro malý astronomický dalekohled na azimutální montáži

Název diplomové práce anglicky:

Guidance System for Small Astronomical Telescope on Azimutal Mount

Pokyny pro vypracování:

Zrealizujte naváděcí systém pro malý astronomický dalekohled na azimutální montáži.
- Vytvořte sestavu jednodeskového počítače, akcelerometru, gyroskopu, magnetometru a GPS přijímače.
- Navrhněte a implementujte algoritmus pro fúzi dat z akcelerometru, gyroskopu a magnetometru s cílem přibližného odhadu orientace dalekohledu v prostoru.
- Zrealizujte systém pro ovládání motorů, které dalekohled navedou do požadovaného směru.
- Práci je možné rozšířit použitím obrazu z kamery na dalekohledu. Získaný obraz se koreguje s katalogem hvězd a na základě této koregistrace se upřesní poloha získaná z výše uvedených senzorů

Seznam doporučené literatury:

[1] Kork, M., Hol, J.D., Schon, T.B.: Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation. Now Publishers, 2017.
[2] Madgwick, S.O.H., Harrison, A.J.L., Vaidyanathan, R.: Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. 2011 IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robotics Rehab Week Zurich, Switzerland, 2011.
[3] C. Xia.: Permanent Magnet Brushless DC Motor Drivers and Controls. Wiley, 2012.
[4] Lang, D., Hogg, D.W, Mierle, K., Blanton, M., Roweis, S.: Astrometry.net: blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images. The Astronomical Journal, Vo. 139, No. 5, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D. katedra teorie obvodů FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **02.02.2022** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, doc. Ing. Radoslavu Bortelovi, Ph.D., za trpělivé vedení mé práce a předané zkušenosti

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 20. května 2022

Abstrakt

Tato práce se zabývá realizací naváděcího systému pro malý astronomický dalekohled na azimutální montáži. Pro odhad počáteční orientace dalekohledu je v této práci uveden fúzní algoritmus dat akcelerometru, gyroskopu a magnetometru. Dále je v této práci popsána realizace řídicí elektroniky a systému ovládání krokových motorů použitých pro automatické směřování dalekohledu. Součástí práce je také popis hlavní řídicí aplikace ovládání naváděcího systému a popis implementovaných algoritmů. Práce je uzavřena demonstrací funkčnosti navrženého naváděcího systému, který byl otestován na malém astronomickém dalekohledu.

Klíčová slova: astronomický dalekohled, astronomické souřadnice, odhad orientace, quaterniony, inerciální měřící jednotka, naváděcí systém, krokový motor

Vedoucí: doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.
ČVUT v Praze,
Fakulta elektronická,
Katedra teorie obvodů,
Technická 2,
166 27 Praha 6

Abstract

This thesis deals with the implementation of a guidance system for an small astronomical telescope on azimuthal mount. To estimate the initial orientation of the telescope, a fusion algorithm of the accelerometer, gyroscope and magnetometer data is presented here. This thesis also describes the implementation of control electronics and stepper motor control system used for automatic telescope orienting. In addition the implementation of main control application of the guidance system and a description of implemented algorithms are presented here. A demonstration of a functionality of the implemented guidance system tested on a small astronomical telescope are shown at the end of the thesis.

Keywords: astronomical telescope, astronomical coordinates, orientation estimation, quaternions, inertial measure unit, guidance system, stepper motor

Title translation: Guidance System for Small Astronomical Telescope on Azimutal Mount

Obsah

1 Úvod	1	5 Realizace naváděcího systému	25
1.1 Obsah práce	3	5.1 Realizace řídicí elektroniky pro naváděcí systém	25
2 Astronomické souřadnice	5	5.1.1 Popis použitých modulů a komponent	26
2.1 Transformace mezi souřadnými systémy	6	5.1.2 Napájení systému a podrobnější schéma	27
2.1.1 Převod rovníkových souřadnic na obzorníkové	6	5.2 Systém natáčení dalekohledu	28
2.1.2 Lokální hvězdný čas	7	5.2.1 Kompenzace zdánlivého pohybu hvězd	30
2.2 Změna souřadnic v závislosti na čase	7	6 Popis programové části naváděcího systému	33
3 Orientace dalekohledu	9	6.1 Inicializace programu a počáteční orientace dalekohledu	33
3.1 Inerciální senzor	10	6.2 Korekce orientace dalekohledu s využitím kamery	35
3.1.1 Gyroskop	10	7 Výsledky	39
3.1.2 Akcelerometr a magnetometr	12	7.1 Ověření funkčnosti naváděcího systému	40
3.2 Parametrizace orientace	13	8 Závěr	43
3.2.1 Quaterniony	13	Literatura	45
3.2.2 Transformace na obzorníkové souřadnice	15		
3.3 Algoritmus fúze pro odhad orientace	15		
3.3.1 Odhad orientace z měření gyroskopu	16		
3.3.2 Odhad orientace z měření akcelerometru a magnetometru	16		
3.3.3 Fúzní proces algoritmu	18		
4 Krokový motor	21		
4.1 Řízení krokového motoru	21		
4.1.1 Pozice	21		
4.1.2 Konstantní rychlost otáčení	22		
4.1.3 Algoritmus řízení pozice motoru maximální rychlostí	22		
4.2 Kalibrace krokového motoru a optimalizace spotřeby	23		

Obrázky

1.1 Newtonův dalekohled [2]	2	7.1 Fotografie zhotoveného prototypu	39
2.1 Rovníkové souřadnice [1]	5	7.2 Výsledek zaměření hvězdokupy M 5	41
3.1 Souřadný systém Země	9	7.3 Výsledek zaměření galaxie M 104	42
3.2 Histogram naměřených hodnot pro jednu osu statického gyroskopu . . .	11		
3.3 Integrovaná chyba gyroskopu v průběhu 100 s	12		
3.4 Směr vektoru magnetického pole země [7]	13		
3.5 Rotace souřadného systému A okolo vektoru ${}^A\mathbf{r}$ o úhel θ	14		
3.6 Blokový diagram fúzního algoritmu odhadu orientace [8]	19		
4.1 Schéma zpětnovazební regulace úhlu natočení motoru	22		
4.2 Ideální průběh pozice motoru v čase	23		
4.3 Diagram algoritmu kalibrace krokového motoru	24		
5.1 Blokové schéma navržené řídicí elektroniky pro naváděcí systém . .	26		
5.2 Podrobnější schéma zapojení jednotlivých modulů řídicí elektroniky	28		
5.3 Soustava krokového motoru, závitové tyče a matice	29		
5.4 Geometrické řešení natáčecího systému	31		
6.1 Diagram aplikace řídicí naváděcí systém	33		
6.2 Diagram inicializace více vláken programu	35		
6.3 Blokový diagram korekce chyby orientace dalekohledu	36		

Kapitola 1

Úvod

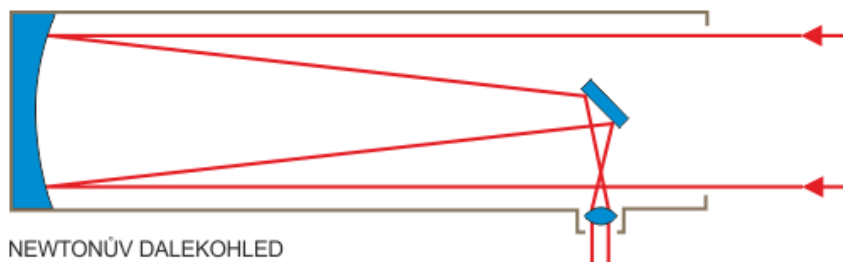
Astronomický dalekohled je obecně poměrně náročné zaměřit na konkrétní objekty na obloze. Pozorované objekty často nejsou viditelné lidským okem a pozorovatel nemá zpětnou vazbu o správném nasměrování dalekohledu. Astronomické dalekohledy mají také obecně malé zorné pole, které vyžaduje jemné nastavení orientace. Další zásadní problém spočívá ve zdánlivém pohybu hvězd po obloze způsobeném rotací Země kolem své osy. Z tohoto důvodu je nutné, aby astronomický dalekohled kopíroval zdánlivý rotační pohyb objektů a tím si pozorovaný objekt udržel v zorném poli. Tyto problémy je možné řešit motorizací montáže astronomického dalekohledu s využitím naváděcího systému. Nejčastěji používané montáže pro astronomické dalekohledy jsou paralaktická a azimutální.

- *Paralaktická montáž* umožňuje rotační pohyb a orientaci dalekohledu ve dvou osách. Jednu osu dalekohledu je nutné před zaměřením objektu zarovnat tak, aby byla orientovaná rovnoběžně s osou rotace Země. Druhá osa je na ni kolmá. Výhoda paralaktické montáže je v jednoduchém sledování zdánlivého pohybu hvězd po obloze, kdy postačuje měnit orientaci dalekohledu pouze kolem osy zarovnané s osou rotace Země.
- *Azimutální montáž* umožňuje rotační pohyb a orientaci dalekohledu také ve dvou osách. Svislá osa rotace umožňuje měnit azimut nasměrování dalekohledu. Rotace kolem druhé osy k ní kolmé mění elevaci nasměrování dalekohledu. Pro sledování zdánlivého pohybu hvězd na obloze je zapotřebí rotovat dalekohledem v obou jeho osách. Nevýhoda této montáže spočívá také v tom, že dochází ke stáčení zorného pole dalekohledu a to i přes udržování zaměřeného objektu ve středu snímku.

Paralaktická montáž je v porovnání s azimutální montáží méně stabilnější a váhově těžší. Je to z toho důvodu, že paralaktická montáž vyžaduje kompenzaci hmotnosti tubusu protizávažím.

V této práci je použit Newtonův dalekohled, který je upevněn na azimutální montáži v provedení Dobsonovy montáže, kdy je tubus dalekohledu připevněn na kolébku pomocí kloubu, který umožňuje rotaci a nastavení elevace. Tato

kolébka je připevněna k podložce stojící na zemi pomocí druhého kloubu, který umožňuje rotovat celou kolébkou a měnit tak azimut natočení dalekohledu. Kombinace Dobsonovy montáže a Newtonova dalekohledu je hojně využívána v amatérské astronomii. Princip Newtonova typu dalekohledu je ukázán na obrázku 1.1. Světlo pronikající do tubusu dalekohledu se zde odráží od parabolického zrcadla a ještě před průchodem ohniska je sekundárním zrcadlem odkloněno stranou do okuláru [2].



Obrázek 1.1: Newtonův dalekohled [2]

Pro amatérské dalekohledy existují tzv. GoTo systémy (např. SynScan GoTo systém firmy Skywatcher, SiTech GoTo firmy Hubble Optics, EXOS-2 firmy Explore Scientific). Tyto systémy umožňují automatické nasměrování dalekohledu na požadovaný objekt a následné sledování daného objektu. Před použitím je třeba tyto systémy zkalibrovat manuálním zaměřením dalekohledu na několik hvězd. Některé GoTo systémy jsou navíc schopné přijímat data z naváděcí kamery. Tato kamera umožňuje snímat zorné pole dalekohledu. Na základě pohybu vybrané hvězdy je pak upraven pohyb montáže dalekohledu pro přesnější kompenzaci pohybu objektu. Tato kamera může být umístěna na separátním naváděcím dalekohledu nebo může být využit tzv. off-axis-tracking, kdy je okraj zorného pole dalekohledu odvedený mimo hlavní optickou osu do naváděcí kamery. Tyto systémy využívají ke správnému navádění dalekohledu měření natočení os montáže pomocí enkodérů, které nemusí být tolik přesné, a nebo jsou velice drahé.

Cílem této diplomové práce je zrealizovat naváděcí systém pro malý astronomický dalekohled na azimutální montáži, ale s odlišným přístupem. Počáteční navedení dalekohledu je stanoveno na základě odhadu orientace dalekohledu v prostoru ze sensorů gyroskopu, akcelerometru a magnetometru. Finální korekce orientace a navedení dalekohledu na cílový objekt je optické s využitím astronomické kamery. Ta snímá zorné pole dalekohledu a pomocí koregistrace pozorovaných objektů s hvězdným katalogem se upřesní orientace dalekohledu. Tento přístup nevyžaduje počáteční kalibraci ani přesné měření natočení os dalekohledu jako výše popsané GoTo systémy.

V této práci se má ověřit koncept a funkčnost zmíněného postupu naváděcího systému na malém astronomickém dalekohledu. V dalším praktickém využití je možné tento koncept zopakovat pro využití na větším dalekohledu s menším naváděcím dalekohledem nebo s naváděcí kamerou v pozici off-axis-tracking. Pracuje se s dalekohledem na azimutální montáži. Rozšíření aplikace

na montáž paralaktickou je v principu možné, ale je už mimo rozsah této práce.

■ 1.1 Obsah práce

V úvodu práce je uveden stručný popis základních faktů týkajících se zaznamenávání poloh vesmírných objektů pomocí různých typů astronomických souřadnic. Uvedena je zde také transformace popisující převod mezi těmito souřadnicemi.

Dále je v práci uveden algoritmus pro fúzi dat z akcelerometru, gyroskopu a magnetometru, který je implementován za účelem počátečního odhadu přibližné orientace dalekohledu. Popsána je také parametrizace orientace, která je použita pro implementaci tohoto algoritmu.

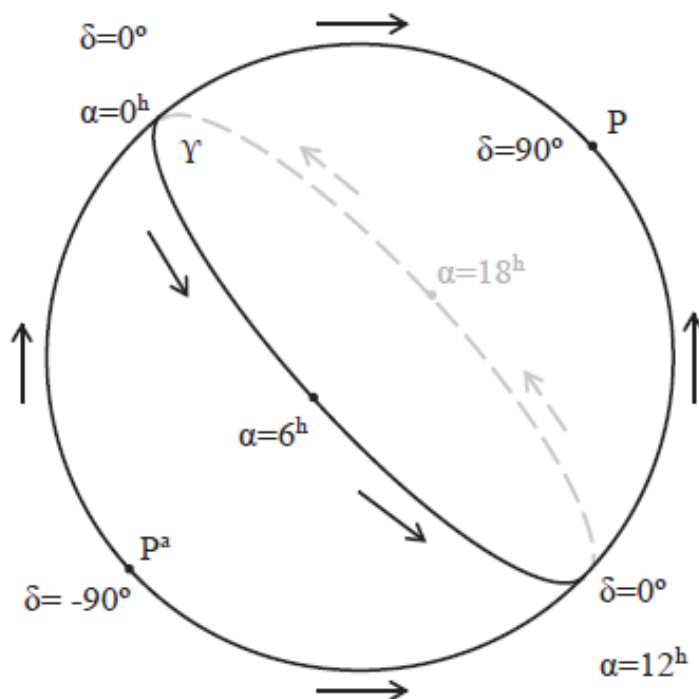
V práci je také popsána řídicí elektronika použitá pro realizaci naváděcího systému. Ukázáno je mechanické řešení motorizace Dobsonovy montáže dalekohledu spolu s popisem řízení krokového motoru, který je využit pro automatické směřování dalekohledu. Dále je v práci popsána implementace řídicích algoritmů a hlavní řídicí aplikace pro realizovaný naváděcí systém.

V poslední části této práce jsou demonstrovány dosažené výsledky naváděcího systému podložené reálným zaměřením a pozorováním konkrétních vesmírných objektů.

Kapitola 2

Astronomické souřadnice

Polohu hvězdných objektů je možné určit pomocí různých astronomických souřadnic. Astronomické souřadnice určují pozici vesmírných těles na nebeské sféře, kde nebeská sféra je myšlená koule nekonečného poloměru v jejímž středu je Země. Nebeská sféra obsahuje dva hlavní orientační body, severní P a jižní P^a nebeský pól. Tyto body vzniknou v místě průsečíku nebeské sféry s protaženou zemskou osou. Každá kružnice na nebeské sféře procházející oběma póly P a P^a se nazývá deklinační kružnice. Nebeská sféra je rozdělena na dvě polokoule rovinou zemského rovníku. Kružnice vzniklá tímto průsečíkem se nazývá nebeský rovník [1].



Obrázek 2.1: Rovníkové souřadnice [1]

kde ϕ je zeměpisná šířka pozorovatele a S_m značí lokální hvězdný čas. Elevaci a a azimut A je možné po vydělení rovnice (2.3) rovnicí (2.2) vyjádřit jako

$$a = \arcsin(\sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(S_m - \alpha)), \quad (2.4)$$

$$A = \arctan\left(\frac{\cos(\delta) \sin(S_m - \alpha)}{\sin(\delta) \cos(\phi) - \cos(\delta) \sin(\phi) \cos(S_m - \alpha)}\right). \quad (2.5)$$

Je předpokládáno, že goniometrické funkce pracují ve stupních.

2.1.2 Lokální hvězdný čas

Pro určení lokálního hvězdného času je zapotřebí znát zeměpisnou délku pozorovatele λ , univerzální světový čas \mathbf{UT} a Greenwichský hvězdný čas S_0 . Výpočet lokálního hvězdného času je dán rovnicí [3]

$$S_m = c(S_0 + k\mathbf{UT}) + \lambda, \quad (2.6)$$

kde $k = 1,0027379093$ je převodní konstanta odpovídající poměru slunečního a hvězdného dne [4] a konstanta c představuje převod z hodin na stupně. Za předpokladu, že 24 h odpovídá 360° má tato konstanta hodnotu

$$c = \frac{360}{24} = 15. \quad (2.7)$$

Greenwichský hvězdný čas S_0 je možné vypočítat pomocí aproximace (2.10). K výpočtu je třeba vyjádřit čas v juliánských stoletích, která uplynula od standardní epochy J2000, podle rovnice (2.9). Juliánské datum JD se určí dle vztahu (2.8) z Gregoriánského kalendáře, kde D je den v měsíci, M je pořadové číslo měsíce v roce a Y je rok [3].

$$JD = 1721118,5 + D + \frac{153M - 457}{5} + 365Y + \frac{Y}{4} - \frac{Y}{100} + \frac{Y}{400}, \quad (2.8)$$

$$T_u = \frac{JD - 2451545}{36525}, \quad (2.9)$$

$$S_0 = 24110,54841 + 8460184,812866T_u + 5,006 \cdot 10^{-11}T_u - 5,9 \cdot 10^{-15}T_u^2. \quad (2.10)$$

2.2 Změna souřadnic v závislosti na čase

Při pozorování vesmírného objektu během delšího časového úseku, například v případě pořizování snímků kamerou s delší dobou expozice, je nutné uvažovat

zdánlivý pohyb hvězd způsobený rotací Země kolem své osy. Tento pohyb se projevuje změnou azimutu a elevace pozorovaného objektu v závislosti na čase. Změnu obzorníkových souřadnic v závislosti na čase je možné vypočítat derivací rovnic (2.4) a (2.5) podle času daných jako

$$\frac{da}{dt} = \frac{d \arcsin(u)}{dt} = \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \frac{du}{dt}, \quad (2.11)$$

$$\frac{dA}{dt} = \frac{d \arctan(v)}{dt} = \frac{1}{1+v^2} \frac{dv}{dt}, \quad (2.12)$$

kde u a v jsou označeny argumenty vnějších funkcí pro větší přehlednost. Vzhledem k tomu, že jediný parametr závislý na čase je lokální hvězdný čas S_m , jsou derivace u a v podle času dané jako

$$\frac{du}{dt} = ck \cos(\delta) \cos(\phi) \sin(S_m - \alpha), \quad (2.13)$$

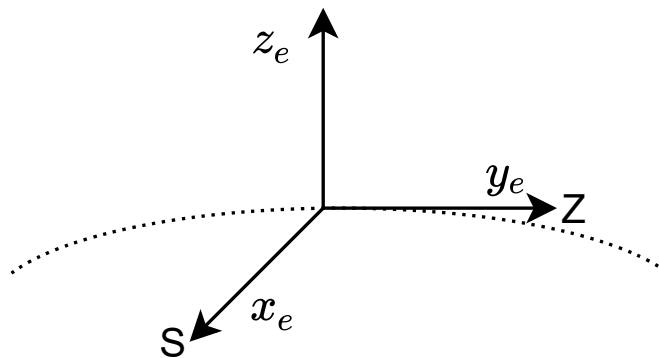
$$\frac{dv}{dt} = -ck \frac{\cos(\delta)(\cos(\delta) \sin(\phi) - \cos(\phi) \cos(S_m - \alpha) \sin(\delta))}{(\cos(\phi) \sin(\delta) - \cos(\delta) \cos(S_m - \alpha) \sin(\phi))^2}, \quad (2.14)$$

kde c a k jsou výše zmíněné převodní konstanty. Rovnice (2.11) a (2.12) určují rychlost, jakou se mění obzorníkové souřadnice v čase. Pomocí těchto rovnic je možné vypočítat rychlost rotace dalekohledu, aby kopíroval zdánlivý pohyb vesmírných objektů na noční obloze.

Kapitola 3

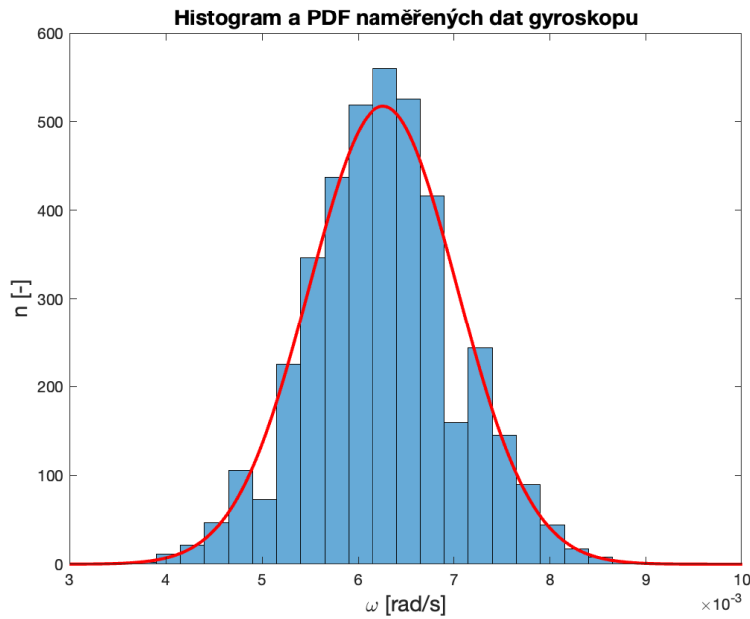
Orientace dalekohledu

Prvním bodem implementace naváděcího systému pro hvězdářský dalekohled je odhad jeho orientace v prostoru vzhledem k zemským souřadnicím. V této diplomové práci jsou zemskými souřadnicemi myšleny kartézské souřadnice, kde osa x_e směřuje na zeměpisný sever, osa y_e směřuje na zeměpisný západ a osa z_e kolmo vzhůru. Na obrázku 3.1 jsou tyto souřadnice zobrazeny. Počátek souřadnic je v místě stání pozorovatele. Výsledná orientace teleskopu je následně převedena na astronomické obzorníkové souřadnice, azimut a elevaci, které jsou uvedeny v kapitole 2. Azimut odpovídá rotaci kolem osy z_e a elevace rotaci kolem osy y_e . Pomocí určených obzorníkových souřadnic a znalosti lokálního hvězdného času, je možné přesně určit bod na nebeské sféře, na který je dalekohled nasměrován.



Obrázek 3.1: Souřadný systém Země

V této kapitole je uveden algoritmus fúze dat z gyroskopu, akcelerometru a magnetometru za účelem odhadu orientace. V podkapitole 3.1 jsou podrobněji popsány měřící senzory, jejichž data jsou využita pro algoritmus fúze. Jednotlivé senzory jsou rozebrány z hlediska zpracování dat a následného využití pro algoritmus odhadu orientace. V podkapitole 3.2 je vysvětlena parametrizace rotace použité ve fúzním algoritmu. V podkapitole 3.3 je uveden

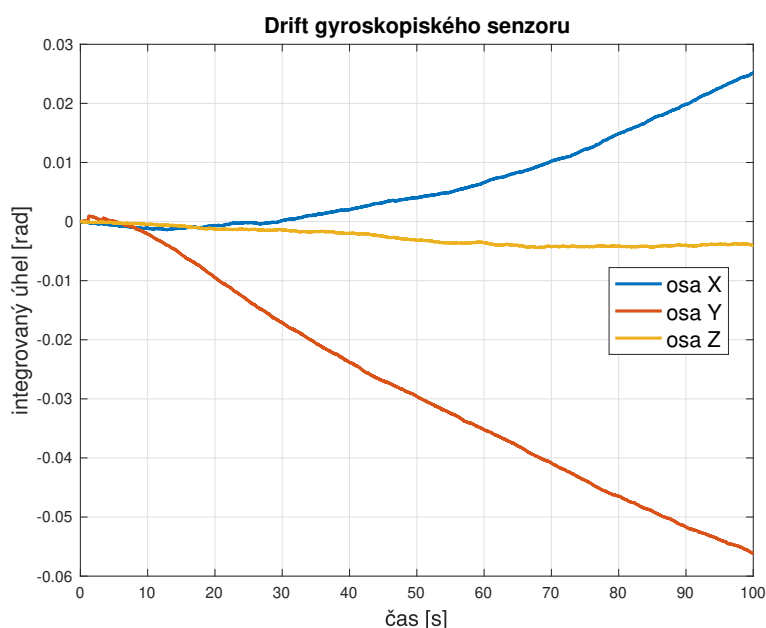


Obrázek 3.2: Histogram naměřených hodnot pro jednu osu statického gyroskopu

Na obrázku 3.2 je znázorněn histogram naměřených reálných dat pro jednu osu gyroskopu. Měření probíhalo na statickém senzoru, který byl po dobu 100 sekund nehybný a nerotoval. V grafu je znázorněn odhad hustoty pravděpodobnosti (PDF) naměřených dat, který představuje normální rozdělení. Z toho je možné usoudit, že měření je zatíženo Gaussovským šumem. Data jsou také zatížena ofsetem, který je nenulový a dán střední hodnotou měření. Pro přesné určení orientace senzoru podle (3.1) je nutné měřená data vycentrovat, jinak by vznikala permanentní chyba integrace.

Ofset měřených dat je kvůli konstrukci MEMS gyroskopů časově proměnný. Tato chyba se nazývá gyroskopický drift [9]. Na obrázku 3.3 je zobrazen integrovaný úhel z dat nerotujícího, statického senzoru za dobu 100 s. Do grafu jsou vyneseny úhly ve všech třech osách gyroskopu. V ideálním případě by integrované úhly ze statického senzoru měly být blízké nule a s časem se nezvětšovat. Z grafu je ale patrné, že i přes počáteční vycentrování dat se po 10 s ofset nepatrně změní. Tím vznikne nezanedbatelná chyba integrace a odhad orientace není přesný. Ofset není závislý pouze na čase, ale také na okolní teplotě.

Tento drift je pro přesný odhad orientace zapotřebí kompenzovat. Z tohoto důvodu jsou data z gyroskopu kombinována s daty z akcelerometru a magnetometru pomocí fúzního algoritmu, který je popsán v sekci 3.3.



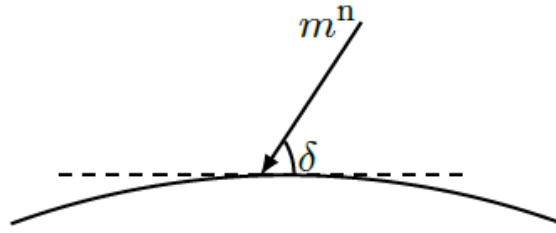
Obrázek 3.3: Integrovaná chyba gyroskopu v průběhu 100 s

3.1.2 Akcelerometr a magnetometr

Pro kompenzaci gyroskopického driftu a určení počáteční orientace senzoru vzhledem k zemským souřadnicím jsou využita data z akcelerometru a magnetometru. Akcelerometr umožňuje měřit vektor gravitačního zrychlení. Tento vektor je spjatý se souřadným systémem Země. Jeho směr je rovnoběžný s osou z_e . Těto informace je možné využít pro odhad počáteční elevace senzoru vzhledem k zemským souřadnicím. Pro určení azimutu pouhá data z akcelerometru nejsou dostačující. Akcelerometr umožňuje měřit také translační zrychlení, kterým se senzor pohybuje. V této práci je předpokládáno, že je senzor statický a měří pouze vektor gravitačního zrychlení.

Magnetometr umožňuje měřit vektor lokálního magnetického pole. Za předpokladu, že v jeho okolí není žádný magnetický materiál, je možné usuzovat, že magnetometr měří lokální magnetické pole Země. Na obrázku 3.4 je zobrazen směr magnetického pole Země, kde tento vektoru směřuje k severnímu magnetickému pólu Země. Úhel δ , který tento vektor svírá s rovinou zemského povrchu, se nazývá magnetická inklinace. Tento úhel je závislý na geografické poloze [7]. Pomocí magnetometru je možné odhadnout orientaci senzoru, konkrétně azimut.

Naměřená data obou senzorů jsou stejně jako u gyroskopu zatížena šumem a ofsetem. Pro správné měření je třeba senzory zkalibrovat. Fúzí dat akcelerometru, který poskytuje informaci o elevaci, magnetometru poskytujícím informaci o azimutu spolu s měřením gyroskopu, je možné odhadnout orientaci senzoru vzhledem k referenčním souřadnicím Země.



Obrázek 3.4: Směr vektoru magnetického pole země [7]

3.2 Parametrizace orientace

V této podkapitole je podrobněji rozebrána parametrizace orientace. Je zapotřebí orientovat teleskop astronomického dalekohledu vzhledem k referenčním souřadnicím zemského povrchu. Následně se z nalezené orientace teleskopu určí astronomické souřadnice, aby mohl být dalekohled nasměrován na konkrétní pozorovaný vesmírný objekt.

Možných popisů reprezentujících parametrizaci orientace objektu v prostoru je několik [5]. Algoritmus popsany v kapitole 3.3 využívá parametrizaci pomocí jednotkového quaternionu. Níže je nastíněna nezbytná algebra quaternionů, která je použita při algoritmu fúze dat gyroskopu, akcelerometru a magnetometru.

3.2.1 Quaterniony

Quaternion je čtyřdimenzionální komplexní číslo dané obecně jako

$$\mathbf{q} = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T, \quad (3.2)$$

kde $q_0 \in \mathbb{R}$ představuje reálnou část a prvky $q_1, q_2, q_3 \in \mathbb{R}$ imaginární část quaternionu. Komplexně sdružený quaternion \mathbf{q}^* k (3.2) je definován jako

$$\mathbf{q}^* = q_0 - q_1i - q_2j - q_3k = [q_0 \quad -q_1 \quad -q_2 \quad -q_3]^T. \quad (3.3)$$

Obecně je možné normu quaternionu zapsat jako

$$\|\mathbf{q}\| = \sqrt{\mathbf{q}\mathbf{q}^*}. \quad (3.4)$$

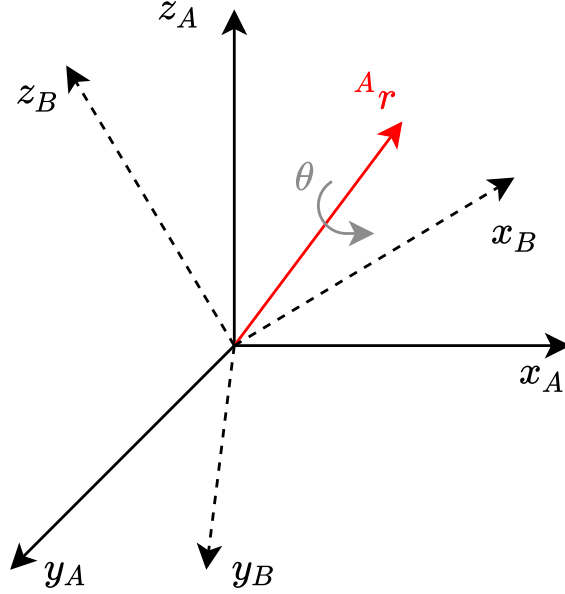
Pro jednotkový quaternion platí vztah

$$\|\mathbf{q}\| = 1. \quad (3.5)$$

Jednotkový quaternion ${}^A_B\mathbf{q}$ popisuje 3D rotaci relativního souřadného systému B vzhledem k souřadnému systému A o úhel θ okolo vektoru ${}^A\mathbf{r}$. Tato rotace je ilustrována na obrázku 3.5. Quaternion popisující tuto rotaci je dán vztahem [6]

$${}^A_B\mathbf{q} = \left[\cos \frac{\theta}{2} \quad -r_x \sin \frac{\theta}{2} \quad -r_y \sin \frac{\theta}{2} \quad -r_z \sin \frac{\theta}{2} \right]^T, \quad (3.6)$$

kde r_x , r_y a r_z jsou souřadnice vektoru ${}^A\mathbf{r}$ v referenčním souřadném systému A.



Obrázek 3.5: Rotace souřadného systému A okolo vektoru ${}^A\mathbf{r}$ o úhel θ

Komplexně sdružený quaternion reprezentuje rotaci v případě prohození referenčního a relativního souřadného systému. Platí tedy

$${}^A_B\mathbf{q}^* = {}^B_A\mathbf{q}. \quad (3.7)$$

Vektor může být pomocí quaternionu rotován podle vztahu (3.8).

$${}^B\mathbf{v} = {}^A_B\mathbf{q} \otimes {}^A\mathbf{v} \otimes {}^A_B\mathbf{q}^*. \quad (3.8)$$

Operátor \otimes značí násobení dvou quaternionů. Toto násobení není komutativní, tedy platí $\mathbf{q} \otimes \mathbf{p} \neq \mathbf{p} \otimes \mathbf{q}$ a je definováno jako [6]

$$\mathbf{q} \otimes \mathbf{p} = \begin{bmatrix} q_0 p_0 - q_1 p_1 - q_2 p_2 - q_3 p_3 \\ q_0 p_1 + q_1 p_0 + q_2 p_3 - q_3 p_2 \\ q_0 p_2 - q_1 p_3 + q_2 p_0 + q_3 p_1 \\ q_0 p_3 + q_1 p_2 - q_2 p_1 + q_3 p_0 \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Obecně vektory ${}^A\mathbf{v}$, ${}^B\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ reprezentují stejný bod v prostoru o třech dimenzích vzhledem k různým souřadnicovým systémům A a B. Aby rovnice (3.8) dávala smysl, jsou vektory ${}^A\mathbf{v}$, ${}^B\mathbf{v}$ ztotožněny s quaternionem, pro který platí, že $q_0 = 0$. Tedy pro obecný vektor $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ podle této totožnosti platí [6]

$$\mathbf{v} = [v_x \quad v_y \quad v_z]^T \cong [0 \quad v_x \quad v_y \quad v_z]^T. \quad (3.10)$$

3.2.2 Transformace na obzorníkové souřadnice

Pomocí jednotkového quaternionu je parametrizována rotace vzhledem k referenčnímu souřadnému systému. V případě orientace dalekohledu se jedná o rotaci IMU senzoru vzhledem k souřadnému systému Země. Quaternion lze dle vztahů (3.11), (3.12) a (3.13) převést na Eulerovy úhly

$$\psi = \arctan\left(\frac{2q_1q_2 - 2q_0q_3}{2q_0^2 + 2q_1^2 - 1}\right), \quad (3.11)$$

$$\vartheta = -\arcsin(2q_1q_3 + 2q_0q_2), \quad (3.12)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{2q_2q_3 - 2q_0q_1}{2q_0^2 + 2q_3^2 - 1}\right), \quad (3.13)$$

kde ψ , ϑ a ψ představují parametrizaci rotace nového souřadného systému, který byl nejprve zarovnaný s referenčním souřadným systémem a vznikl postupnou rotací podle z_B , y_B a x_B [6].

Pro orientaci astronomického dalekohledu je zapotřebí určit z odhaduté orientace azimut a elevaci. Jak bylo uvedeno na začátku této kapitoly a podle kapitoly 2 je azimut dán jako $A = -\psi$ a elevace je dána jako $a = -\vartheta$.

3.3 Algoritmus fúze pro odhad orientace

Pro odhad orientace z měření gyroskopu, akcelerometru a magnetometru existuje řada přístupů a metod [7]. V praxi je hojně využíván Kálmánův filter, který z dat zatíženými nepřesnostmi měření a šumem odhaduje, v tomto případě, orientaci senzoru. Pro účely této práce byl implementován fúzní algoritmus [8], který kombinuje data gyroskopu, akcelerometru a magnetometru pomocí gradientní metody. Tento algoritmus byl vybrán z důvodu jeho jednoduché implementace a dobré funkčnosti i při malých vzorkovacích frekvencích senzoru. Přesnost výsledného odhadu orientace získané pomocí tohoto algoritmu je postačující a pro účely této diplomové práce plně vyhovuje.

Vstupem do tohoto algoritmu jsou naměřená data gyroskopem ${}^S\boldsymbol{\omega}_t$, akcelerometrem ${}^S\hat{\boldsymbol{a}}_t$ a magnetometrem ${}^S\hat{\boldsymbol{m}}_t$. Jedná se o trojrozměrné vektory, které je možné podle (3.10) zapsat jako

$${}^S\boldsymbol{\omega}_t = [0 \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T, \quad (3.14)$$

$${}^S\hat{\boldsymbol{a}}_t = [0 \quad a_x \quad a_y \quad a_z]^T, \quad (3.15)$$

$${}^S\hat{\boldsymbol{m}}_t = [0 \quad m_x \quad m_y \quad m_z]^T, \quad (3.16)$$

kde horní index S značí, že měřené veličiny jsou měřeny v souřadném systému pevně spjatého s IMU senzorem. Účelem algoritmu je určit parametrizaci ${}^S\hat{\boldsymbol{q}}_{est,t}$, která představuje odhad orientace souřadného systému S pevně

spjatého se senzorem vzhledem k referenčnímu souřadnému systému Země označeného pomocí indexu E .

3.3.1 Odhad orientace z měření gyroskopu

Z měření gyroskopu ${}^S\boldsymbol{\omega}_t$ je možné určit velikost změny orientace ${}^S\dot{\boldsymbol{q}}_{\omega,t}$ zemských souřadnic relativně k souřadnicím senzoru pomocí rovnice [8]

$${}^S\dot{\boldsymbol{q}}_{\omega,t} = \frac{1}{2} {}^S\hat{\boldsymbol{q}}_t \otimes {}^S\boldsymbol{\omega}_t. \quad (3.17)$$

Odhad orientace na základě měření gyroskopu je pak dán pomocí numerické integrace rovnice (3.17) jako

$${}^S\boldsymbol{q}_{\omega,t} = {}^S\hat{\boldsymbol{q}}_{est,t-1} + {}^S\dot{\boldsymbol{q}}_{\omega,t}\Delta t, \quad (3.18)$$

kde Δt představuje vzorkovací periodu senzoru a ${}^S\hat{\boldsymbol{q}}_{est,t-1}$ odhad orientace v předchozím časovém okamžiku. Jak bylo vysvětleno v sekci 3.1.1, odhad orientace pouze z měření gyroskopu nestačí k plné orientaci senzoru vzhledem k referenčním souřadnicím Země. Navíc jsou měřená data zatížena gyroskopickým driftem, který zanáší do tohoto odhadu nezanedbatelnou chybu integrace, a orientace tak není přesná. Proto je, pro přesné výsledky, nutná korekce orientace na základě měření dodatečných senzorů.

3.3.2 Odhad orientace z měření akcelerometru a magnetometru

Odhad orientace ${}^S\hat{\boldsymbol{q}}_t$ z měření akcelerometru ${}^S\hat{\boldsymbol{a}}_t$ a magnetometru ${}^S\hat{\boldsymbol{m}}_t$ je možné určit jako řešení rovnic

$${}^S\hat{\boldsymbol{a}}_t = {}^S\hat{\boldsymbol{q}}_t^* \otimes {}^E\hat{\boldsymbol{g}} \otimes {}^S\hat{\boldsymbol{q}}_t, \quad (3.19)$$

$${}^S\hat{\boldsymbol{m}}_t = {}^S\hat{\boldsymbol{q}}_t^* \otimes {}^E\hat{\boldsymbol{b}} \otimes {}^S\hat{\boldsymbol{q}}_t, \quad (3.20)$$

kde ${}^E\hat{\boldsymbol{g}}_t$ představuje referenční směr působení gravitačního pole a ${}^E\hat{\boldsymbol{b}}_t$ určuje referenční směr lokálního magnetického pole. Směry působení referenčních vektorů těchto polí vzhledem k souřadnému systému Země jsou dány jako

$${}^E\hat{\boldsymbol{g}}_t = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T, \quad (3.21)$$

$${}^E\hat{\boldsymbol{b}}_t = [0 \ b_x \ 0 \ b_z]^T. \quad (3.22)$$

Rovnice (3.19) a (3.20) říkají, že transformované referenční směry působení polí ${}^E\hat{\boldsymbol{g}}$ a ${}^E\hat{\boldsymbol{b}}$ do souřadného systému senzoru S pomocí parametrizace ${}^S\hat{\boldsymbol{q}}$ se musí rovnat naměřeným směrům působení polí pomocí senzorů. Tyto rovnice navíc platí pouze za předpokladu, že akcelerometr měří pouze směr působení gravitačního pole a magnetometr směr působení lokálního magnetického pole

Země. Rovnice (3.19) a (3.20) nemají analytické řešení. Orientaci ${}^S_E\hat{\mathbf{q}}$ je proto možné odhadnout jen přibližně řešením optimalizační úlohy [8]

$$\min_{{}^S_E\hat{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^4} f_{g,b} \left({}^S_E\hat{\mathbf{q}}_t, {}^E\hat{\mathbf{g}}, {}^S\hat{\mathbf{a}}_t, {}^E\hat{\mathbf{b}}, {}^S\hat{\mathbf{m}}_t \right), \quad (3.23)$$

kde se minimalizuje účelová funkce $f_{g,b}$, která představuje rozdíl transformovaných směrů působení referenčních polí a měření senzorů. Účelová funkce $f_{g,b}$ je dána vztahy

$$f_g \left({}^S_E\hat{\mathbf{q}}_t, {}^E\hat{\mathbf{g}}, {}^S\hat{\mathbf{a}}_t \right) = {}^S_E\hat{\mathbf{q}}_t^* \otimes {}^E\hat{\mathbf{g}} \otimes {}^S_E\hat{\mathbf{q}}_t - {}^S\hat{\mathbf{a}}_t, \quad (3.24)$$

$$f_b \left({}^S_E\hat{\mathbf{q}}_t, {}^E\hat{\mathbf{b}}, {}^S\hat{\mathbf{m}}_t \right) = {}^S_E\hat{\mathbf{q}}_t^* \otimes {}^E\hat{\mathbf{b}} \otimes {}^S_E\hat{\mathbf{q}}_t - {}^S\hat{\mathbf{m}}_t, \quad (3.25)$$

$$f_{g,b} \left({}^S_E\hat{\mathbf{q}}_t, {}^E\hat{\mathbf{g}}, {}^S\hat{\mathbf{a}}_t, {}^E\hat{\mathbf{b}}, {}^S\hat{\mathbf{m}}_t \right) = \begin{bmatrix} f_g \left({}^S_E\hat{\mathbf{q}}_t, {}^E\hat{\mathbf{g}}, {}^S\hat{\mathbf{a}}_t \right) \\ f_b \left({}^S_E\hat{\mathbf{q}}_t, {}^E\hat{\mathbf{b}}, {}^S\hat{\mathbf{m}}_t \right) \end{bmatrix}. \quad (3.26)$$

Řešením této optimalizační úlohy je možné odhadnout parametrizaci orientace ${}^S_E\mathbf{q}_{\nabla,t}$ z měření akcelerometru a magnetometru. Pro vyřešení této optimalizační úlohy je využita gradientní metoda daná vztahem

$${}^S_E\mathbf{q}_{\nabla,t} = {}^S_E\mathbf{q}_{est,t-1} - \mu_t \frac{\nabla f_{g,b}}{\|\nabla f_{g,b}\|}, \quad (3.27)$$

kde ${}^S_E\mathbf{q}_{est,t-1}$ představuje odhadnutou parametrizaci orientace v předchozím časovém okamžiku a μ_t je nastavitelná velikost kroku gradientní metody. Velikost μ_t ovlivňuje rychlost konvergence algoritmu ke správnému řešení. Výraz $\nabla f_{g,b}$ představuje gradient funkce $f_{g,b}$ daný vztahem

$$\nabla f_{g,b} = J_{g,b}^T f_{g,b}, \quad (3.28)$$

kde $J_{g,b}$ je jakobián funkce $f_{g,b}$ dán jako

$$J_{g,b} \left({}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t-1}, {}^E\hat{\mathbf{b}} \right) = \begin{bmatrix} J_g^T \left({}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t-1} \right) \\ J_b^T \left({}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t-1}, {}^E\hat{\mathbf{b}} \right) \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

Jakobián J_g funkce (3.24) je možné vypočítat jako [8]

$$J_g \left({}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t-1} \right) = \begin{bmatrix} -2q_2 & 2q_3 & -2q_0 & 2q_1 \\ 2q_1 & 2q_0 & 2q_3 & 2q_2 \\ 0 & -4q_1 & -4q_2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.30)$$

Jakobián J_b funkce (3.25) závisí na referenčním směru magnetického pole Země ${}^E\hat{\mathbf{b}}$. Je to z toho důvodu, že směr tohoto pole se aktualizuje kvůli potlačení možného rušení, jak je uvedeno níže. Vypočítá se jako [8]

$$J_b^T \left({}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t-1}, {}^E\hat{\mathbf{b}} \right) = \begin{bmatrix} -2b_z q_2 & 2b_z q_3 \\ -2b_x q_3 + 2b_z q_1 & 2b_x q_2 + 2b_z q_0 \\ 2b_x q_2 & 2b_x q_3 - 4b_z q_1 \\ -4b_x q_2 - 2b_z q_0 & -4b_x q_3 + 2b_z q_1 \\ 2b_x q_1 + 2b_z q_3 & -2b_x q_0 + 2b_z q_2 \\ 2b_x q_0 - 4b_z q_2 & 2b_x q_1 \end{bmatrix}. \quad (3.31)$$

3.3.3 Fúzní proces algoritmu

Výsledný odhad orientace senzoru ${}^S_E\mathbf{q}_{est,t}$ je dopočítán jako váhovaný součet odhadu orientace vypočítaný na základě měření gyroskopu ${}^S_E\mathbf{q}_{\omega,t}$ a odhadu orientace určený na základě měření akcelerometru s magnetometrem ${}^S_E\mathbf{q}_{\nabla,t}$ popsaný rovnicí

$${}^S_E\mathbf{q}_{est,t} = (1 - \gamma_t){}^S_E\mathbf{q}_{\omega,t} + \gamma_t{}^S_E\mathbf{q}_{\nabla,t}, \quad 0 \leq \gamma_t \leq 1. \quad (3.32)$$

Koeficienty γ_t a $(1 - \gamma_t)$ představují váhy jednotlivých odhadů orientace. Optimální hodnotu γ_t je možné určit pomocí vztahu

$$(1 - \gamma_t)\beta = \gamma_t \frac{\mu_t}{\Delta t}, \quad (3.33)$$

kde β představuje divergenci odhadu ${}^S_E\mathbf{q}_{\omega,t}$ a $\frac{\mu_t}{\Delta t}$ konvergenci gradientního algoritmu pro výpočet ${}^S_E\mathbf{q}_{\nabla,t}$.

Jsou-li fyzické změny orientace minimální a je-li předpokládáno, že gradientní algoritmus konverguje výrazně rychleji, je možné rovnice (3.27) a (3.33) pro velké hodnoty μ_t zjednodušit na tvar [8]

$${}^S_E\mathbf{q}_{\nabla,t} \approx -\mu_t \frac{\nabla f_{g,b}}{\|\nabla f_{g,b}\|}, \quad (3.34)$$

$$\gamma_t \approx \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \approx 0. \quad (3.35)$$

Dosazením rovnic (3.18), (3.34) a (3.35) do rovnice (3.32) se získá

$${}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t} = {}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t-1} + {}^S_E\dot{\mathbf{q}}_{\omega,t}\Delta t - \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \left(\mu_t \frac{\nabla f_{g,b}}{\|\nabla f_{g,b}\|} \right), \quad (3.36)$$

$$\frac{{}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t} - {}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t-1}}{\Delta t} = {}^S_E\dot{\mathbf{q}}_{\omega,t} - \beta \left(\frac{\nabla f_{g,b}}{\|\nabla f_{g,b}\|} \right), \quad (3.37)$$

$${}^S_E\dot{\hat{\mathbf{q}}}_{est,t} = {}^S_E\dot{\mathbf{q}}_{\omega,t} - \beta \left(\frac{\nabla f_{g,b}}{\|\nabla f_{g,b}\|} \right). \quad (3.38)$$

Výsledný odhad orientace senzoru se získá numerickou integrací rovnice (3.38) jako

$${}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t} = {}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t-1} + {}^S_E\dot{\hat{\mathbf{q}}}_{est,t}\Delta t. \quad (3.39)$$

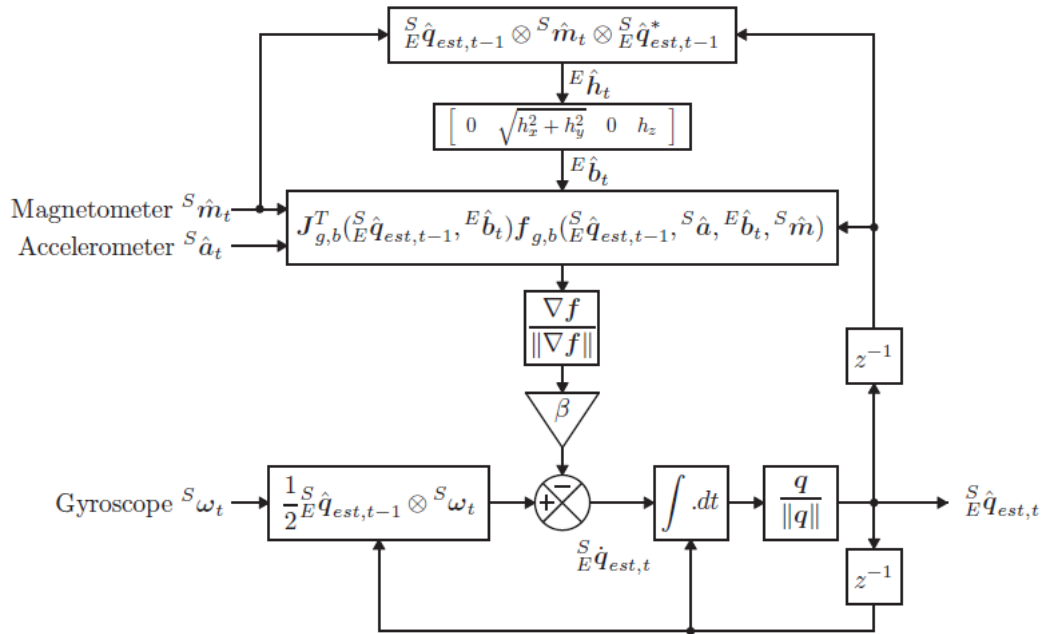
Algoritmus obsahuje také část pro kompenzaci magnetického rušení v dosahu magnetometru. Směr magnetického pole v čase t , ${}^E\hat{\mathbf{h}}_t$, může být určen z naměřených dat magnetometru ${}^S\hat{\mathbf{m}}_t$ a filtrem, který poskytuje odhad orientace ${}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t-1}$ jako

$${}^E\hat{\mathbf{h}}_t = [0 \quad h_x \quad h_y \quad h_z]^T = {}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t-1} \otimes {}^S\hat{\mathbf{m}}_t \otimes {}^S_E\hat{\mathbf{q}}_{est,t-1}^*, \quad (3.40)$$

$${}^E\hat{\mathbf{b}}_t = [0 \quad \sqrt{h_x^2 + h_y^2} \quad 0 \quad h_z]^T. \quad (3.41)$$

Pomocí rovnice (3.41) je učen nový referenční směr lokálního magnetického pole Země. Tento přístup také eliminuje nutnost počátečního určení referenčního magnetického pole a vliv magnetické inklinace v závislosti na geografické poloze [8].

Blokový diagram kompletního algoritmu včetně kompenzace magnetického rušení je zobrazen na obrázku 3.6. Algoritmus je možné nastavovat pomocí parametru β . Tento parametr reprezentuje chybu měření gyroskopu. Výstupní parametrizace orientace senzoru vzhledem k souřadnému systému Země reprezentovaná jednotkovým quaternionem ${}^S_E \hat{q}_{est,t}$ je následně transformována pomocí rovnic (3.11) na azimut a (3.12) na elevaci.



Obrázek 3.6: Blokový diagram fúzního algoritmu odhadu orientace [8]

Kapitola 4

Krokový motor

Pro automatické směřování dalekohledu a nastavení jeho orientace je využito dvou krokových motorů. Jeden krokový motor ovládá azimutální rotaci a druhý krokový motor ovládá rotaci pro nastavení elevace dalekohledu. V této kapitole jsou uvedeny implementované metody řízení krokového motoru. Popsáno je řízení pozice rotoru za použití zpětné vazby s využitím absolutního optického enkodéru. Dále je zde popsáno řízení rychlosti otáčení motoru. Popsána je metoda řízení konstantních malých rychlostí. Uveden je zde také algoritmus sloužící k navedení motoru na požadovanou pozici maximální rychlostí. V poslední části této kapitoly je popsána implementovaná metoda kalibrace a optimalizace spotřeby krokových motorů.

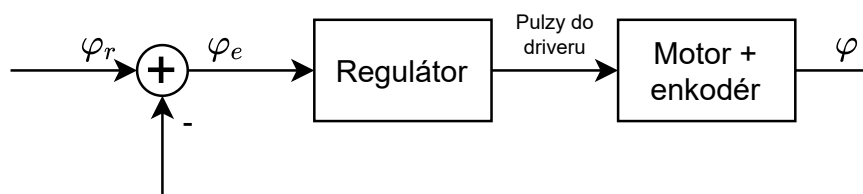
4.1 Řízení krokového motoru

4.1.1 Pozice

Řízení krokového motoru probíhá ve zpětné vazbě. Informaci o aktuálním úhlu rotoru poskytuje absolutní optický enkodér, díky kterému je možné docílit přesného řízení. Na obrázku 4.1 je naznačen princip zpětnovazební regulace úhlu natočení krokového motoru. Referencí zpětnovazební řízení je požadovaný úhel natočení rotoru φ_r . Pomocí enkodéru je snímán skutečný úhel natočení φ . Regulátor pak na základě chyby regulace $\varphi_e = \varphi_r - \varphi$ generuje pulzy vyslané do driveru, který podle přijatých pulzů krouží motorem. Jeden pulz pak odpovídá jednomu kroku. Regulátor rozhoduje, zda vyslat pulz do driveru motoru, na základě nerovnice

$$\varphi_N \leq |\varphi_e|, \quad (4.1)$$

kde úhel φ_N představuje otočení rotoru při jednom kroku. Podle znaménka φ_e je určen směr otáčení krokového motoru. Pokud je nerovnice (4.1) splněna, pak je do driveru vyslán pulz.



Obrázek 4.1: Schéma zpětnovazební regulace úhlu natočení motoru

4.1.2 Konstantní rychlost otáčení

Dosažení konstantních rychlostí krokového motoru je možné pravidelným generováním a vysíláním pulzů do driveru. Při znalosti úhlu φ_N , o který se rotor otočí při jednom kroku, a frekvenci generovaných pulzů f_m je možné určit rychlost otáčení motoru jako

$$\omega_m = \varphi_N f_m = \frac{\varphi_N}{T_m}, \quad (4.2)$$

$$T_m = \frac{1}{f_m}, \quad (4.3)$$

kde ω_m je rychlost otáčení rotoru a T_m je perioda generování pulzů. Takto se dá motor řídit pouze v případě menších rychlostí. Se zvyšující se rychlostí otáčení motoru klesá jeho moment. Při vyšších rychlostech tedy motor není schopen vyvinout dostatečnou sílu pro natočení rotoru do požadované pozice. V případě opětovného rychlého buzení motoru tedy nedojde k jeho roztočení. Vyšší krokovací frekvence není možné dosáhnout okamžitě, ale je zapotřebí ji postupně zvyšovat směrem k maximální hodnotě [10].

4.1.3 Algoritmus řízení pozice motoru maximální rychlostí

Dalekohled je vhodné natočit do požadovaného směru v krátkém čase. To vyžaduje řídit pozici motoru maximální možnou rychlostí. Pro hladký chod natáčení dalekohledu a dosažení požadované pozice je žádoucí postupné zpomalení motoru. Toto zpomalení zajistí, že motor hladce zastaví na cílové pozici. Ideální průběh pozice motoru v čase pro běh maximální možnou rychlostí je zobrazen na obrázku 4.2.

Toto řízení krokového motoru je rozděleno do tří fází. První fáze odpovídá postupnému zrychlování motoru, tedy postupnému zvyšování frekvence generovaných pulzů. Motor postupně zrychluje z počáteční rychlosti na požadovanou maximální možnou rychlost. Druhá fáze je běh motoru maximální rychlostí a třetí fáze odpovídá postupnému zpomalování motoru z dosažené rychlosti až k úplnému zastavení na požadované pozici. Algoritmus pro dosažení takového průběhu je popsán následujícím pseudokódem. Tento algoritmus je periodicky volán s frekvencí 100 Hz.

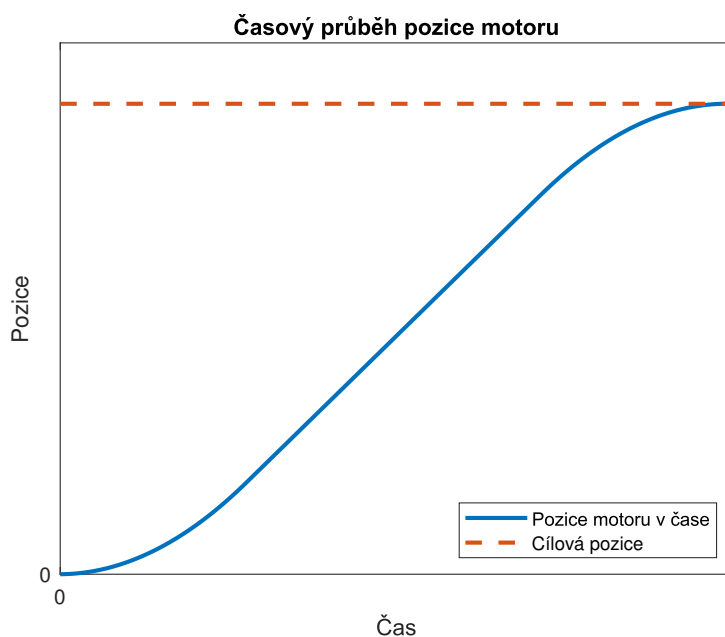
Algoritmus 1 Řízení krokového motoru

```

1: Vstup  $\leftarrow \varphi_r, f_m$  // požadovaný úhel natočení rotoru, frekvence generování
   pulzů do driveru
2:  $\varphi = \text{encoder\_read}()$  // vyčtení aktuálního úhlu natočení rotoru
3:  $\varphi_e = \varphi_r - \varphi$ 
4: if  $|\varphi_e| < \varphi_N$  then
5:    $f_m = 0$ 
6: else if  $\varphi_e \leq \text{DECEL\_TH}$  &&  $f_m > F\_MIN$  then
7:    $f_m = f_m - F\_STEP$ 
8: else if  $f_m < F\_MAX$  then
9:    $f_m = f_m + F\_STEP$ 
10: end if

```

Konstanty F_MIN a F_MAX určují maximální a minimální možnou frekvenci generování pulzů do driveru motoru. Podle (4.2) určují maximální a minimální rychlost otáčení motoru. Konstanta DECEL_TH určuje práh pro začátek zpomalování motoru za účelem hladkého zastavení rotoru na cílové pozici.



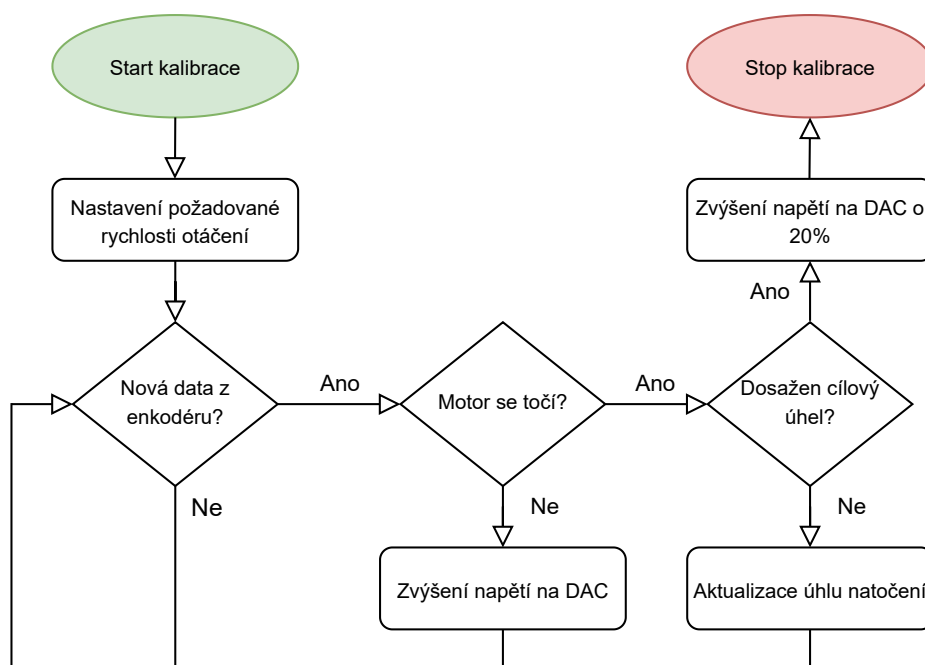
Obrázek 4.2: Ideální průběh pozice motoru v čase

4.2 Kalibrace krokového motoru a optimalizace spotřeby

Veškerá řídicí elektronika naváděcího systému pro astronomický dalekohled je napájena z externí baterie. Je tedy žádoucí, aby spotřeba krokových motorů

byla minimalizována a snížil se jejich proudový odběr na možné minimum. Bylo nutné stanovit minimální hodnotu proudu, při které motor vyvine dostatečný moment pro natáčení dalekohledu.

Driver motoru má vyveden vstupní pin, který je spojený s DAC výstupem mikrokontroléru. Maximální proud krokovým motorem je přímo úměrný napětí na tomto pinu. Kalibrace motoru spočívá v konstantním buzení driveru motoru. Při dostatečném momentu by se měl krokový motor začít konstantně otáčet. To je sledováno pomocí enkodéru. V případě zastavení hřídele je zvýšena hodnota napětí na pinu driveru a tím zvýšen i proud motorem. Kalibrace je zastavena v případě dosažení požadovaného úhlu natočení motoru. Výsledný minimální proud je zvýšen o 20% kvůli zajištění rezervy v případě potřeby vyššího momentu. Tento proces kalibrace je implementovaný na mikrokontroléru jako algoritmus, který je zobrazený na následujícím diagramu.



Obrázek 4.3: Diagram algoritmu kalibrace krokového motoru

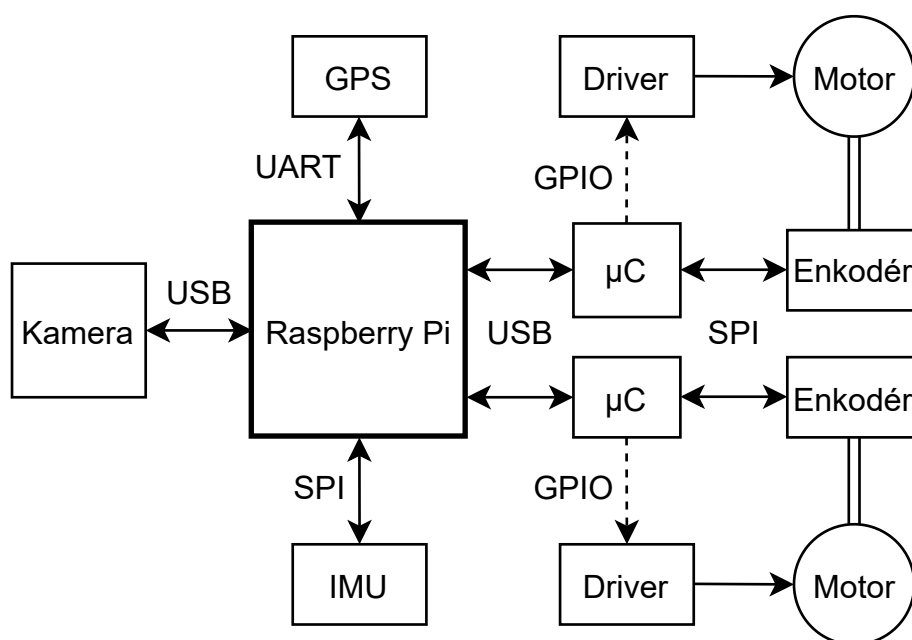
Kapitola 5

Realizace naváděcího systému

V této kapitole je uveden realizovaný systém automatického natáčení a směřování dalekohledu. Je zde popsána použitá řídicí elektronika a jednotlivé moduly poskytující data nezbytná pro navádění dalekohledu do požadovaného směru. Uvedeno je také schéma navržené elektroniky a zmíněno je také napájení jednotlivých modulů. V druhé části této kapitoly je podrobněji popsána mechanická část soustavy, která slouží k motorizaci Dobsonovy montáže a automatickému natáčení dalekohledu v daných kloubech do požadovaného směru. V této části kapitoly jsou také odvozeny rovnice použité pro ovládání krokového motoru.

5.1 Realizace řídicí elektroniky pro naváděcí systém

Naváděcí systém je řízen hlavním jednodeskovým počítačem Raspberry Pi. Přes rozhraní UART s ním komunikuje GPS modul. Dále je k počítači připojen IMU senzor, který odesílá data počítači po SPI sběrnici. Přes rozhraní USB je k Raspberry Pi připojena kamera. Ta snímá vesmírné objekty v zorném poli dalekohledu. Soustava sloužící k automatickému natáčení dalekohledu na požadovanou orientaci se skládá ze dvou krokových motorů. Jeden natáčí dalekohled v jeho azimutálním kloubu a druhý řídí jeho elevaci. Motor je možné řídit pomocí generovaných pulzů vyslaných do jeho driveru motoru. Generování těchto pulzů je řízeno algoritmy popsány v kapitole 4.1. Tyto algoritmy jsou implementovány na samostatném mikrokontroléru. K hlavnímu řídicímu počítači je mikrokontrolér připojen přes USB rozhraní. K hřídeli motoru je napevno připojen optický enkodér, který snímá aktuální úhel natočení hřídele motoru. Mikrokontrolér komunikuje s enkodérem přes SPI sběrnici. Z mikroprocesoru je také možné pomocí DAC převodníku ovládat proud motorem a tím řídit jeho moment. K hlavnímu řídicímu počítači jsou mikroprocesory připojeny přes USB rozhraní. Zjednodušené blokové schéma celé řídicí elektroniky naváděcího systému je uvedeno na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Blokové schéma navržené řídicí elektroniky pro naváděcí systém

5.1.1 Popis použitých modulů a komponent

Pro řízení systému ovládajícího motory byl vybrán modul obsahující mikroprocesor ATSAM21G18 s jádrem ARM Cortex M0+. Referenční hodinový signál procesoru je generován pomocí interního 8 MHz krystalu a je nastaven na 24 MHz pomocí fázového závěsu DFLL48M. Využity jsou také jeho periferie obsluhující SPI sběrnice pro komunikaci s enkodérem, DAC převodník pro nastavení maximálního odebíraného proudu motorem a USB pro komunikaci s jednodeskovým počítačem.

Ovládání krokového motoru zajišťuje modul s integrovaným obvodem DRV8825. Tento driver umožňuje řídit krokové motory s napájením od 8,2 V do 45 V. Je také schopen dodávat do motoru proud o velikosti až 2 A. Směr otáčení motoru je určen nastavením logické hodnoty na pinu driveru DIR. Pohybu motoru se dosáhne generováním pulzů vyslaných na pin driveru STEP, kdy jeden pulz odpovídá jednomu kroku motoru. Frekvence generovaných pulzů může být až 250 kHz. Modul je možné nastavit do režimu mikrokrokování, které umožňuje zjemnit krok otáčení motoru až na 1/32. Pomocí napětí v rozmezí 0 V až 3,3 V přivedeného na VREF pin driveru je možné ovládat maximální proud motorem. Tento pin je propojen s výstupem DAC převodníku na mikrokontroléru.

Krokový motor 11HS12-0956D byl vybrán pro použití jako pohon automatického natáčení dalekohledu. Tento motor má hřídel vyvedenou na obě dvě strany. Na jednu stranu je připojený optický enkodér a na druhou stranu závitová tyč, která je součástí natáčečského optického systému. Jeden krok

motoru odpovídá otočení hřídele o $1,8^\circ$. V kombinaci s driverem se zapnutým mikrokrokováním je možné tento krok ještě zmenšit.

Jako zpětnovazební senzor pro snímání úhlu natočení hřídele motoru je použit optický rotační enkodér AMT222D-V. Jedná se o absolutní enkodér s rozlišením 14 bitů a možností multiturn. To umožňuje měřit kromě úhlu i počet provedených otáček. S mikroprocesorem komunikuje po SPI sběrnici s maximální frekvencí 2 MHz.

Pro odhad orientace byla zvolena inerciální měřicí jednotka MPU9250. Tento modul obsahuje kombinaci gyroskopu s akcelerometrem MPU6050 a magnetometrem AK8963 integrovaných do jednoho pouzdra. Magnetometr je připojen k MPU6050 jako externí senzor a komunikuje s ním po I²C sběrnici s maximální frekvencí 400 kHz. Maximální vzorkovací frekvence tohoto senzoru je omezena magnetometrem na 100 Hz. Sensory mají rozlišení 16 bitů. Gyroskop měří úhlovou rychlost v rozmezí $\pm 250^\circ$, akcelerometr měří zrychlení v rozsahu $\pm 2g$, kde g je velikost gravitačního zrychlení a magnetometr měří v rozsahu $\pm 4800\mu\text{T}$. Senzor umožňuje komunikaci po SPI sběrnici s frekvencí hodin 1 MHz.

K určení zeměpisných souřadnic, data a univerzálního času využitých pro určení lokálního hvězdného času popsaného v sekci 2.1.2 je použit GPS modul NEO-6M. Tento modul umožňuje přijímat NMEA protokoly obsahující zprávy s potřebnými daty. Data posílá po rozhraní UART rychlostí 9600 Bd.

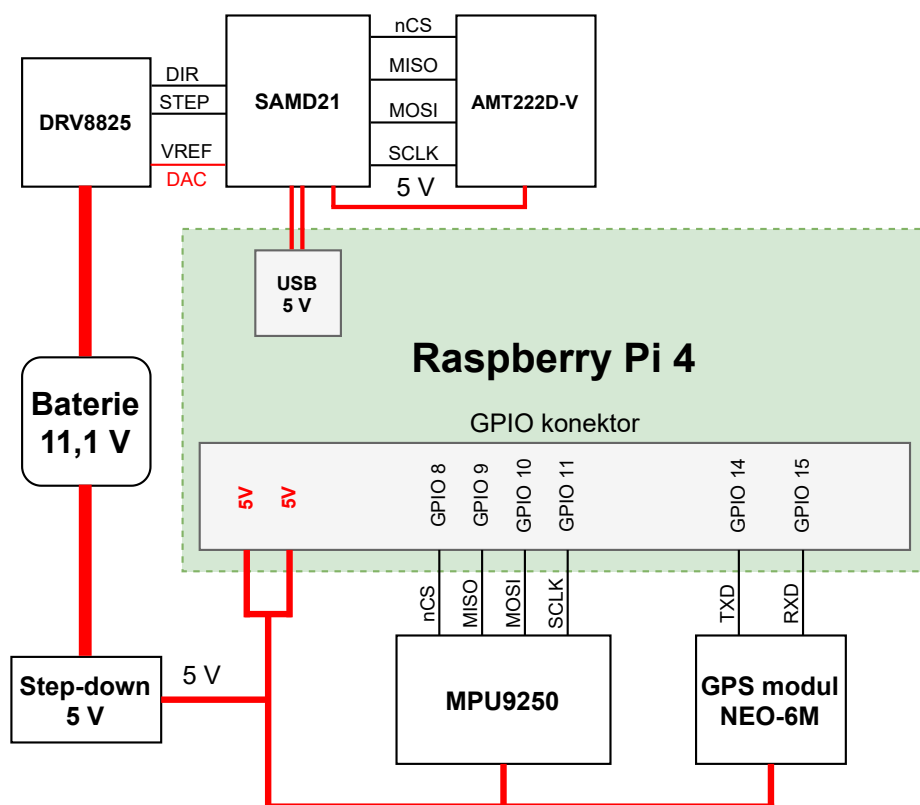
Pro ovládání celého naváděcího systému je využit jednodeskový počítač Raspberry Pi 4 model B - 2 GB RAM s operačním systémem Raspbian. Jedná se o linuxový systém založený na operačním systému Debian. Raspberry Pi disponuje standardním GPIO konektorem se 40 piny. Díky těmto pinům je možné na počítači využít periferie jako SPI nebo UART a komunikovat tak s externími senzory. Raspberry Pi je možné napájet 5 V přes USB-C konektor a nebo pomocí GPIO pinů k tomu určených. Raspberry Pi disponuje také bezdrátovými technologiemi jako je Wi-Fi, díky kterým je možné se k Raspberry Pi vzdáleně připojit z jiného PC a komunikovat s ním.

Pro zachycení snímků v zorném poli dalekohledu je použita kamera ZWO ASI178MM. Tato kamera obsahuje CMOS čip o velikosti 7,4 x 5 mm. Je schopná pořizovat snímky s rozlišením 3096 x 2080 pixelů. Kamera umožňuje, dle potřeby, manuální nastavení zesílení a doby expozice v rozmezí od 32 μs do 1000 s.

■ 5.1.2 Napájení systému a podrobnější schéma

Jako zdroj napájení pro řídicí elektroniku naváděcího systému je použita LiPo baterie o nominální hodnotě napětí 11,1 V. Toto napětí je využito k napájení driverů krokových motorů. Zbylé moduly vyžadují vstupní napětí o hodnotě 5 V. K vytvoření této napěťové hladiny a snížení napětí z 11,1 V na 5 V byl využit modul obsahující step-down konvertor. Vytvořená napěťová hladina 5 V slouží k napájení GPS modulu, IMU senzoru a jednodeskového

počítače Raspberry Pi. Mikroprocesory ovládající motory jsou napájeny přes USB konektor na Raspberry Pi. Enkodéry jsou napájené z modulu mikroprocesoru, ke kterému jsou připojeny. Na následujícím obrázku je zobrazeno podrobnější schéma zapojení modulů včetně znázorněného napájení modulů popsaného výše. Pro větší přehlednost je ve schématu zahrnuta jen jedna soustava ovládající krokový motor zahrnující mikroprocesor, driver motoru a enkodér. Soustava řídící druhý motor je zapojena analogicky.



Obrázek 5.2: Podrobnější schéma zapojení jednotlivých modulů řídicí elektroniky

5.2 Systém natáčení dalekohledu

K automatickému natáčení dalekohledu v azimutálním a elevačním kloubu Dobsonovy montáže dalekohledu slouží soustava dvou krokových motorů, závitových tyčí a matic. Krokové motory jsou uchyceny v kloubu na jedné části Dobsonovy montáže dalekohledu. Ke hřídeli motorů jsou připevněny závitové tyče, které jsou z druhé strany uchyceny v matici. Jedna matice je upevněna na tubusu dalekohledu, jak je vidět na fotografii 5.3a, a druhá matice je upevněna na podložce stojící na zemi, jak je vidět na fotografii 5.3b. Rotací krokových motorů dochází k vynutí závitových tyčí v matici. Tím se mění vzdálenost mezi motorem a maticí a dochází tak k rotačnímu

pohybu dalekohledu v azimutálním a elevačním kloubu montáže. Pomocí této vzdálenosti je pak možné řídit požadovanou orientaci dalekohledu.



(a) : Soustava natáčeji elevaci

(b) : Soustava natáčeji azimut

Obrázek 5.3: Soustava krokového motoru, závitové tyče a matice

Na obrázku 5.4 jsou zobrazeny náčrty mechanického systému pro orientaci dalekohledu v azimutálním a elevačním kloubu. Černě jsou vyznačeny myšlené trojúhelníky, které jsou využity k nalezení geometrického řešení přepočtu orientace dalekohledu a požadovaného úhlu natočení motoru. Tyto trojúhelníky představují myšlené spojnice motoru A, matice B a kloubu natáčení dalekohledu C. Orientace dalekohledu je dána vzdálenostmi D_a a D_A , které jsou proměnné v závislosti na úhlu natočení motoru. Závislost vzdálenosti D_a na elevaci a a vzdálenosti D_A na azimutu A je možné určit pomocí kosinové věty z myšlených trojúhelníků jako

$$D_a = \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2 - R_{a1}R_{a2} \cos(a_0 - a)}, \quad (5.1)$$

$$D_A = \sqrt{R_{A1}^2 + R_{A2}^2 - R_{A1}R_{A2} \cos(A_0 - A)}, \quad (5.2)$$

kde R_{a1} , R_{a2} , R_{A1} a R_{A2} jsou konstanty představující vzdálenost motoru a matice od kloubů dalekohledu. Konstanty a_0 a A_0 představují referenční úhly myšlených trojúhelníků při vrcholu C v případě nulové elevace a azimutu dalekohledu.

Mechanické zpracování natáčení azimutu neumožňuje rotaci v azimutálním kloubu o celých 360° . Soustava závitové tyče, upevnění motoru a matice umožňuje rotaci v azimutálním kloubu pouze o 90° . Před zaměřením cílového objektu je tedy třeba celý dalekohled přibližně natočit na předpokládaný

azimut objektu. Referenční úhel A_0 se musí pro každou novou počáteční orientaci dalekohledu přepočítat, aby převodní vztah (5.2) odpovídal realitě. A_0 je možné dopočítat ze znalosti aktuálního azimutálního nasměrování dalekohledu A a aktuální vzdálenosti D_A podle vzorce

$$A_0 = A + \arccos\left(\frac{R_{A1}^2 + R_{A2}^2 - D_A^2}{2R_{A1}R_{A2}}\right). \quad (5.3)$$

Pomocí rovnic (5.1) a (5.2) jsou vypočítány vzdálenosti motoru a matice odpovídající konkrétní hodnotě azimutu A a elevace a , na které je dalekohled orientován. Při znalosti stoupání závitové tyče K je možné určit požadované úhly natočení motoru φ_r , kterých je potřeba docílit pro konkrétní orientaci dalekohledu. Výsledný referenční úhel ve stupních je dán rovnicí

$$\varphi_r = 360 \frac{D}{K}, \quad (5.4)$$

kde φ_r je požadovaný absolutní úhel natočení motoru a D představuje vzdálenost danou rovnicemi (5.1) nebo (5.2).

5.2.1 Kompenzace zdánlivého pohybu hvězd

Jak bylo zmíněno v sekci 2.2 mění se, kvůli rotaci Země kolem své osy, azimut a elevace pozorovaného objektu na nebeské sféře s uplynulým časem. Pro sledování daného objektu a kompenzaci tohoto zdánlivého pohybu je nutné adekvátně k tomu měnit orientaci dalekohledu. Orientace dalekohledu je daná vzdálenostmi D_a a D_A . Změna těchto vzdáleností v čase je derivace rovnic (5.1) a (5.2) podle času

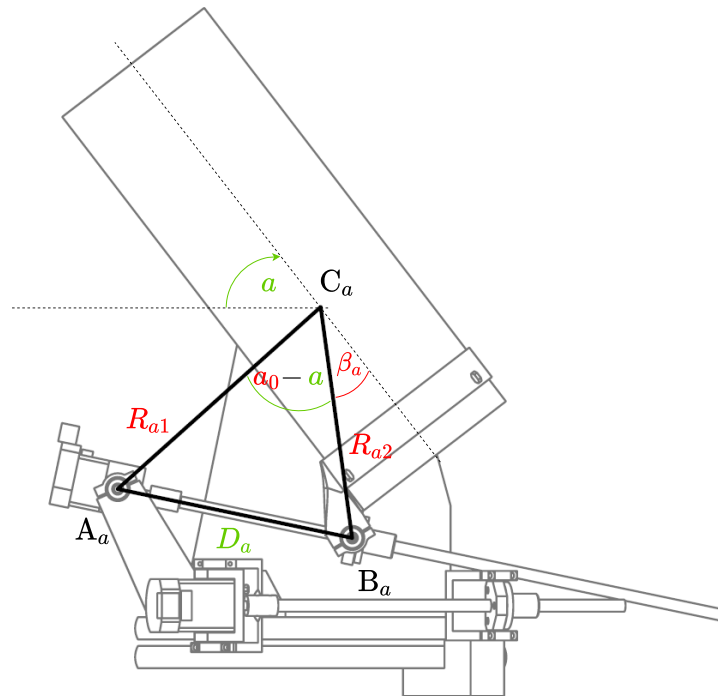
$$\frac{dD_a}{dt} = \frac{R_{a1}R_{a2} \sin(a_0 - a)}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2 - R_{a1}R_{a2}\cos(a_0 - a)}} \frac{da}{dt}, \quad (5.5)$$

$$\frac{dD_A}{dt} = \frac{R_{A1}R_{A2} \sin(A_0 - A)}{\sqrt{R_{A1}^2 + R_{A2}^2 - R_{A1}R_{A2}\cos(A_0 - A)}} \frac{dA}{dt}, \quad (5.6)$$

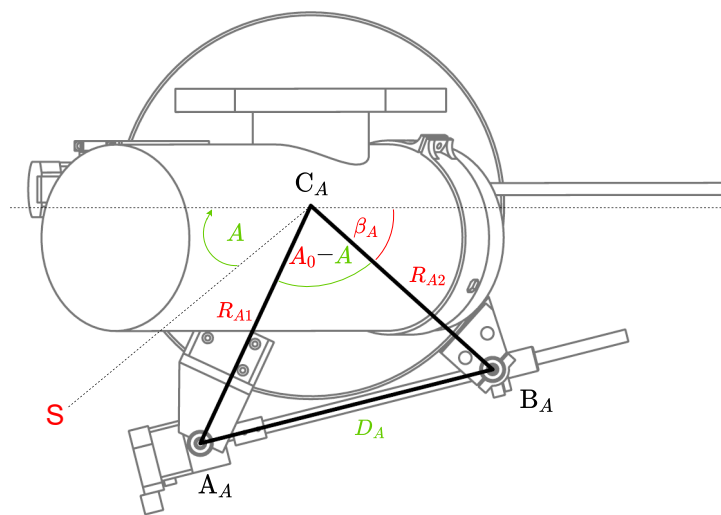
kde výrazy $\frac{da}{dt}$ a $\frac{dA}{dt}$ představují derivace elevace a azimutu podle času dané vztahy (2.12) a (2.11). Z této časové změny vzdáleností je možné určit potřebnou rychlost otáčení motoru pro kompenzaci zdánlivého pohybu objektů na nebeské sféře. Při stoupání závitových tyčí K na jednu otočku, je rychlost otáčení motoru ω_m v otáčkách za minutu možné dopočítat pomocí rovnice

$$\omega_m = \frac{60}{K} \frac{dD}{dt}, \quad (5.7)$$

kde $\frac{dD}{dt}$ představuje změnu vzdáleností danou rovnicemi (2.12) nebo (2.11).



(a) : Řešení elevační rotace dalekohledu



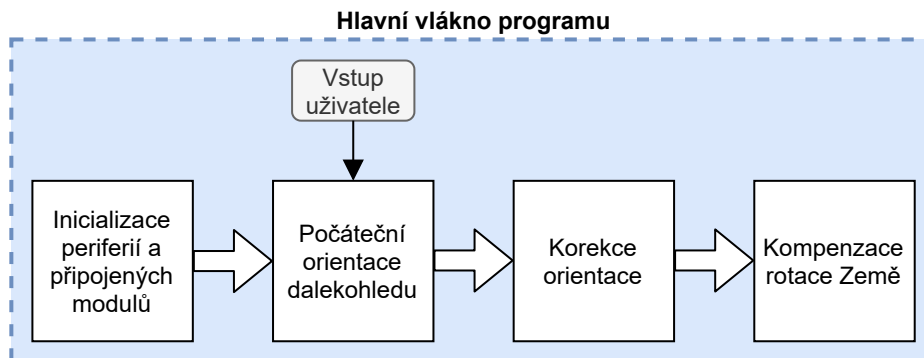
(b) : Řešení azimutální rotace dalekohledu

Obrázek 5.4: Geometrické řešení natáčecího systému

Kapitola 6

Popis programové části naváděcího systému

Pro ovládání naváděcího systému byla vytvořena konzolová řídicí aplikace v jazyce C++. Tato aplikace je implementována na jednodeskovém počítači Raspberry Pi. Z aplikace je uživateli umožněno nastavit souřadnice cílového objektu. Program následně nasměruje dalekohled na souřadnice zadaného objektu, a poté pomocí snímků z kamery a porovnáním s katalogem hvězd upřesní jeho orientaci. Po upřesnění orientace je spuštěna kompenzace zdánlivého pohybu hvězd na obloze za účelem udržení pozorovaného objektu ve středu zorného pole. Běh tohoto programu je nastíněn na obrázku 6.1. Jednotlivé bloky programu jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.



Obrázek 6.1: Diagram aplikace řídicí naváděcí systém

6.1 Inicializace programu a počáteční orientace dalekohledu

Po spuštění programu jsou nejprve inicializovány potřebné periferie jednodeskového počítače, které jsou vyvedeny na GPIO piny. Konkrétně se jedná o SPI sběrnici, ke které je připojen IMU senzor. SPI sběrnice je nastavena do

režimu master a má frekvenci hodin 1 MHz. Senzor odesílá Raspberry Pi data z gyroskopu, akcelerometru a magnetometru se vzorkovací frekvencí 100 Hz. Tato data jsou následně využita pro výpočet odhadu orientace algoritmem popsaným v sekci 3.3.

Dále je na jednodeskovém počítači spuštěna periférie UART, kterou komunikuje s GPS modulem. Rychlost komunikace je nastavena na 9600 Bd. Z GPS modulu jsou zpracovávány zprávy RMC, které obsahují mj. informace o aktuálním datu, univerzálním času a informace o geografické poloze, kde se tento modul nachází. Výstupní data modulu jsou využita pro výpočet lokálního hvězdného času dle rovnic (2.6) a (2.8), který je dále využit pro převod rovníkových astronomických souřadnic na obzorníkové souřadnice.

K programování periférií a nastavení GPIO pinů počítače Raspberry Pi je využita knihovna `WiringPi`. Tato knihovna má implementované funkce, které umožňují a usnadňují ovládání GPIO pinů a potřebných periférií. Knihovna je využita pro komunikaci s IMU senzorem přes SPI sběrnici a také pro komunikaci s GPS modulem pomocí rozhraní UART.

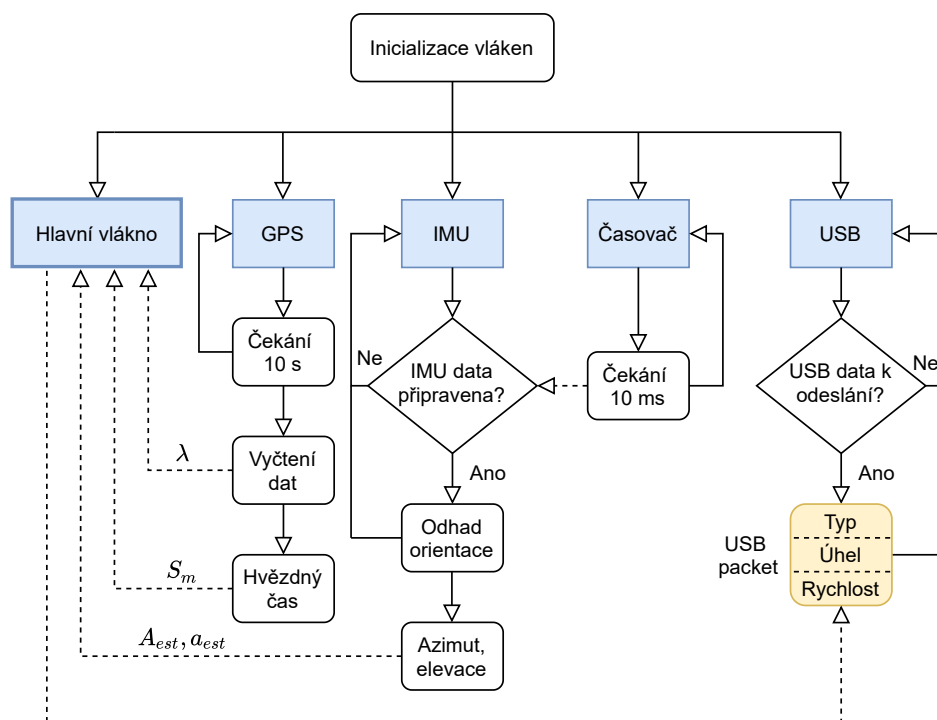
Program poté inicializuje USB drivery. Ty umožňují komunikaci s mikrokontroléry, které řídí krokové motory. Na těchto mikrokontrolérech jsou implementovány algoritmy popsané v kapitole 4.1. USB drivery jsou naprogramovány na Raspberry Pi s využitím knihovny `libusb`. Tato knihovna je napsaná v jazyce C a poskytuje obecný přístup k USB zařízením připojeným k jednodeskovému počítači.

Po inicializaci potřebných periférií je program paralelizován do více vláken, jak je zobrazeno na obrázku 6.2. Do samostatného vlákna je implementováno vyčítání dat z GPS modulu, které se provádí každých 10 s. Vyčtená data jsou následně přepočítána na lokální hvězdný čas S_m a spolu se změřenou zeměpisnou šířkou λ jsou poskytnuta hlavnímu vláknu programu.

Vyčítání IMU senzoru spolu s implementací algoritmu fúze dat gyroskopu, akcelerometru a magnetometru pro odhad orientace dalekohledu je implementováno v samostatném vlákne, aby výpočet mohl běžet na pozadí hlavního programu. Odhadnutá parametrizace orientace je následně převedena pomocí rovnic (3.11) a (3.12) na předpokládané souřadnice azimut A_{est} a elevaci a_{est} , na které je astronomický dalekohled nasměrován. Kvůli správné funkčnosti algoritmu je zapotřebí vyčítat data IMU senzoru pravidelně s frekvencí 100 Hz. Proto je v programu vytvořeno časovací vlákno, které každých 10 ms informuje vlákno obsluhující senzor, že je možné vyčíst nová data a aktualizovat odhadnutou parametrizaci orientace.

V samostatném vlákne je také implementována obsluha odesílání a přijímání USB paketů, které se odesílají mikrokontrolérům ovládajícím krokové motory. Tyto pakety jsou 12 bytů velké. První 4 byty určují typ akce krokového motoru. Může se jednat o řízení pozice rotoru maximální rychlostí, popsané v sekci 4.1.3, nebo o konstantní rychlost otáčení, popsané v sekci 4.1.2, anebo o požadavek kalibrace motorů za účelem optimalizace spotřeby, popsané v sekci 4.2. Následující 4 byty nesou informaci o požadovaném absolutním

úhlu natočení rotoru ve stupních a poslední 4 byty nastavují rychlost otáčení motoru v otáčkách za minutu.



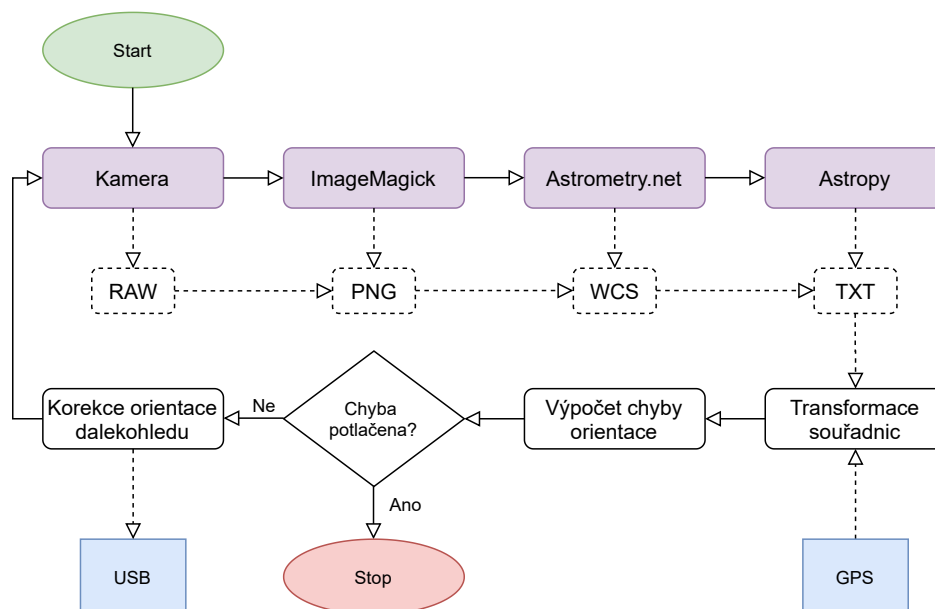
Obrázek 6.2: Diagram inicializace více vláken programu

Po inicializaci programu je uživatel vyzván k zadání rovníkových souřadnic cílového objektu. Pomocí dat z GPS modulu jsou tyto souřadnice převedeny na požadované obzorníkové souřadnice podle rovnic (2.4) a (2.5). Ze znalosti aktuální odhadnuté orientace dalekohledu poskytnuté algoritmem fúze a měřením IMU senzoru jsou vypočítány dle rovnic (5.2), (5.1) a (5.4) požadované absolutní úhly natočení krokových motorů, které ovládají azimutální a elevační rotaci dalekohledu. Mikrokontrolérům, které řídí krokové motory, jsou tyto hodnoty odeslány pomocí USB packetu popsaného výše. Po nasměrování dalekohledu následuje fáze korekce orientace pomocí snímků z kamery.

6.2 Korekce orientace dalekohledu s využitím kamery

Pro upřesnění a korekci počáteční orientace dalekohledu byl implementován algoritmus využívající snímky hvězdné oblohy pořízené kamerou snímající zorné pole dalekohledu. Tyto snímky jsou následně porovnány s hvězdným katalogem, čímž je možné přesně určit astronomické souřadnice středu zorného pole dalekohledu. Z rozdílu požadovaných souřadnic a skutečných souřadnic, na které je dalekohled nasměrován, je vypočítána chyba orientace. Dalekohled

je na základě této chyby přeorientován. Blokový diagram algoritmu je zobrazen na obrázku 6.3. Fialově vyznačené bloky představují podprogramy volané z hlavní aplikace. Jejich funkce jsou vysvětleny níže.



Obrázek 6.3: Blokový diagram korekce chyby orientace dalekohledu

Zachycení snímku pomocí astronomické kamery ZWO ASI178MM umožňuje samostatný program napsaný v jazyce C++. K implementaci byl využit software development kit (SDK) poskytovaný výrobcem ZWO kamer. Pomocí vstupních argumentů při spuštění této aplikace je možné manuálně nastavit konkrétní hodnotu zesílení kamery a dobu expozice. Po spuštění aplikace je pořízen jeden snímek s nastavenými parametry kamery. Tento snímek je následně uložen v 16-ti bitovém RAW formátu a program se ukončí.

K dalšímu zpracování snímku je využit nástroj ImageMagick [11], který je volně dostupný jako stažitelný balíček i pro operační systém Raspbian, pod kterým funguje Raspberry Pi. Tento nástroj umožňuje jednoduše komprimovat uložený RAW snímek z kamery do formátu PNG. Tato konverze je nezbytná pro další zpracování snímku a koregistraci s hvězdným katalogem.

Pořízený snímek je následně koregistrován s katalogem hvězd pomocí nástroje Astrometry.net [12]. Tento nástroj je také volně dostupný ke stažení jako balíček i pro operační systém Raspbian. Pro vstupní data ve formátu PNG, JPEG, GIF nebo FITS umožňuje přesné identifikování zachycených vesmírných těles na snímku. Z řady možných výsledků, včetně generovaných obrázků s vyznačenými identifikovanými objekty na snímku, poskytuje nástroj Astrometry.net informaci o rovníkových astronomických souřadnicích jednotlivých pixelů snímku. Tyto souřadnice jsou uloženy v souboru WCS. Pro účely přesného korigování orientace dalekohledu je třeba ze souboru WCS extrahovat informaci o astronomických souřadnicích pixelu uprostřed

pořízeného snímku. Tento bod odpovídá průniku nebeské sféry a optické osy dalekohledu.

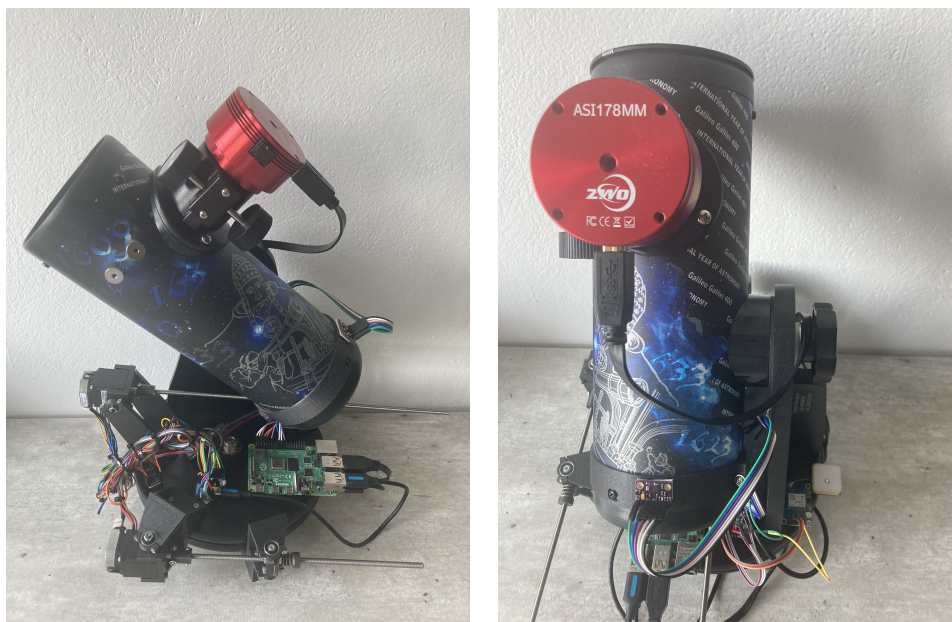
Soubor WCS je zpracován skriptem napsaným v jazyce Python3 s využitím knihovny Astropy. Díky této knihovně je možné extrahovat informace uložené v souboru WCS. Rovníkové astronomické souřadnice centrálního pixelu pořízeného snímku jsou následně uloženy do textového souboru, který je poté zpracován v hlavní aplikaci. Podle rovnic (2.4) a (2.5) a dat z GPS modulu jsou tyto souřadnice převedeny na obzorníkové souřadnice. Tyto souřadnice představují skutečnou orientaci dalekohledu. Rozdíl těchto skutečných souřadnic a souřadnic cílového objektu představuje chybu orientace dalekohledu. Na základě této chyby je určena nová požadovaná orientace dalekohledu. Je-li změřená chyba orientace dalekohledu zanedbatelná, algoritmus je ukončen.

Po ukončení algoritmu by měl být dalekohled nasměrován přesně na daný objekt. Následuje fáze kompenzace rotace Země, kdy jsou motory ovládající rotaci dalekohledu nastaveny do režimu konstantního pohybu o rychlosti vypočítané dle rovnic (5.6), (5.5) a (5.7).

Kapitola 7

Výsledky

Na fotografiích 7.1 je ukázán zhotovený prototyp malého astronomického dalekohledu, na kterém byl testován koncept a funkčnost implementovaného naváděcího systému. Zachycena je řídicí elektronika systému, kde jednodeskový počítač Raspberry Pi spolu s elektronikou ovládající krokové motory jsou upevněny na podstavci konstrukce montáže. Na zadní části tubusu dalekohledu je upevněn IMU senzor tak, aby jeho orientace odpovídala nasměrování dalekohledu. Na místě pro okulár dalekohledu je připevněná kamera, která snímá zorné jeho zorné pole přímo na čip.



Obrázek 7.1: Fotografie zhotoveného prototypu

7.1 Ověření funkčnosti naváděcího systému

Koncept implementovaného naváděcího systému pro malý astronomický dalekohled byl otestován zaměřením a sledováním konkrétních vesmírných objektů. Měření probíhala v Praze 15.5.2022 v 1 hodinu ráno. Přesné geografické souřadnice místa pozorování byly $\lambda = 14,456^\circ$ východní délky a $\phi = 50,044^\circ$ severní šířky. Funkčnost naváděcího systému je demonstrována na výsledcích pozorování kulové hvězdokupy Messier 5 (M 5) a galaxie Sombbrero (M 104).

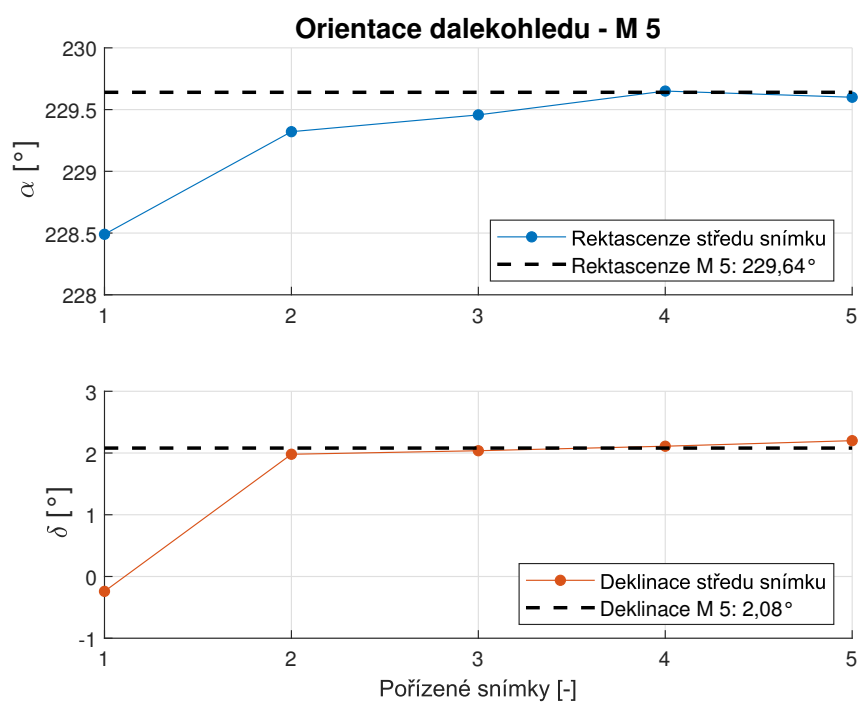
Dalekohled byl nejprve zorientován přibližným směrem k pozorovanému objektu a naváděcí systém byl spuštěn. První nasměrování dalekohledu proběhlo z počátečního odhadu orientace pomocí algoritmu fúze dat IMU senzoru. Následovala fáze korekce orientace dalekohledu na základě snímání zorného pole kamerou a porovnáním pořízených snímků s hvězdným katalogem. Poté byla zapnutá kompenzace zdánlivého pohybu pozorovaného objektu na obloze za účelem jeho udržení ve středu zorného pole dalekohledu.

V grafech na obrázcích 7.2a a 7.3a jsou vyneseny souřadnice centrálních pixelů snímků zorného pole dalekohledu pořízených kamerou. Tyto souřadnice představují přesnou orientaci dalekohledu v čase pořízení snímku během zaměřování daného objektu. První snímek byl pořízen po počáteční orientaci dalekohledu. Následovala série tří snímků, které byly pořízeny za účelem zpřesnění orientace dalekohledu a zaměření cílového objektu do středu zorného pole. Hvězdokupa M 5 byla zaměřena s chybou $0,01^\circ$ v rektascenzi a $0,03^\circ$ v deklinaci. Galaxie M 104 byla zaměřena s chybou $-0,0475^\circ$ v rektascenzi a $0,0131^\circ$ v deklinaci.

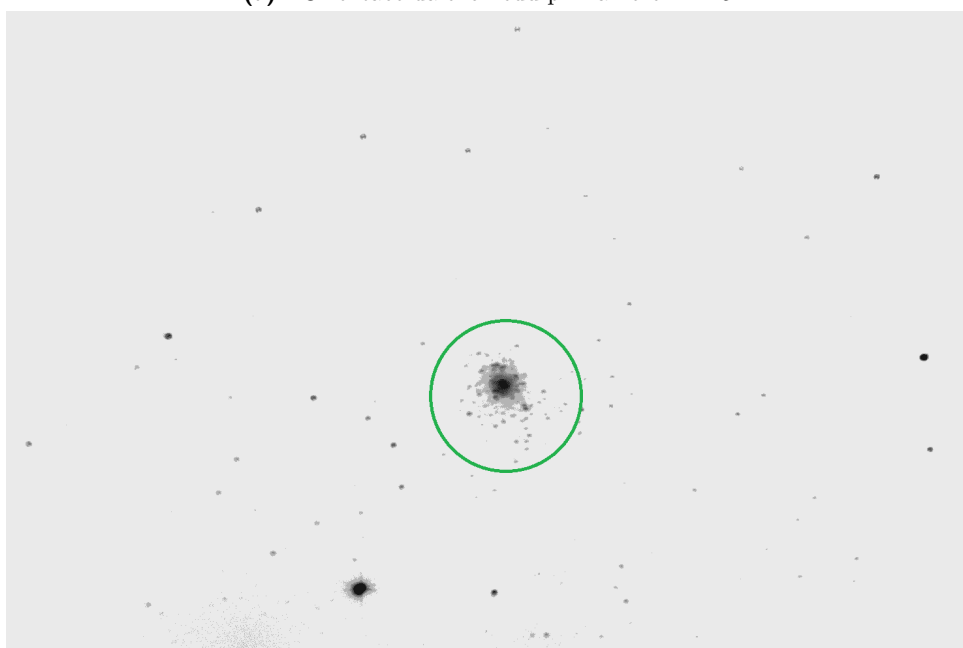
Následně byla spuštěna kompenzace zdánlivého pohybu sledovaného objektu za účelem jeho udržení v zorném poli dalekohledu. Během tohoto sledování byl pořízen pátý snímek. Souřadnice jeho centrálního pixelu jsou také vyneseny v grafech na obrázcích 7.2a a 7.3a. Z grafů je patrné, že došlo k drobnému odchýlení orientace dalekohledu od sledovaného objektu.

Pro demonstraci dosažených výsledků bylo po zaměření objektu a během jeho sledování naváděcím systémem pořízeno 50 snímků pomocí kamery s nastavenou expoziční dobou 5 sekund. Tyto snímky byly následně zprůměrovány a upraveny. Na obrázku 7.2b je zobrazen výsledný snímek s vyznačenou hvězdokupou Messier 5 a na obrázku 7.3b je zobrazen výsledný snímek s vyznačenou galaxií M104.

Implementovaný naváděcí systém je schopen zaměřit cílové objekty s dostatečnou přesností. Na počátku kompenzace zdánlivého pohybu pozorovaných objektů dochází k nepatrnému odchýlení od požadované orientace dalekohledu. Tato chyba může být způsobena vůlí a ohybem materiálu, který byl použit pro zkonstruování mechanického systému natáčení dalekohledu. Použitím tohoto naváděcího systému na malém dalekohledu nemá tato chyba zásadní vliv na výsledek. Při dalším praktickém využití tohoto naváděcího systému na větším dalekohledu je nutné tuto chybu eliminovat dodatečnou kompenzací.

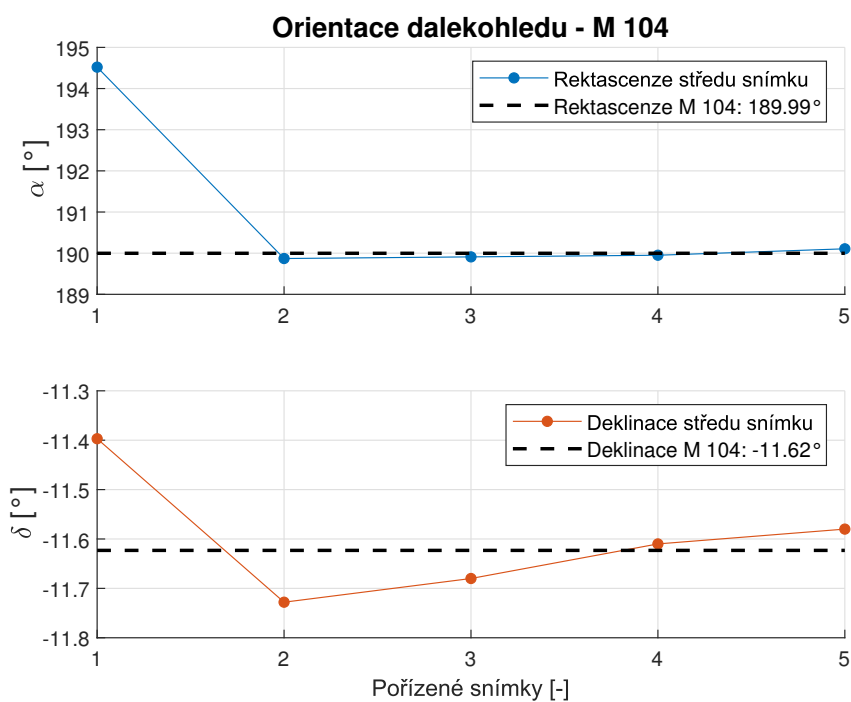


(a) : Orientace dalekohledu při zaměření M 5

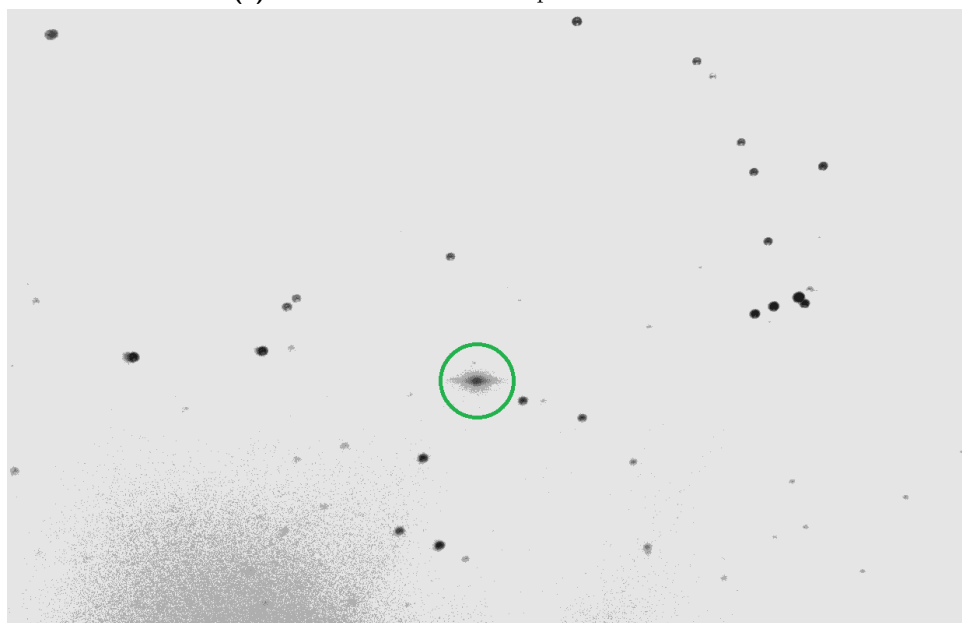


(b) : Snímek kulové hvězdokupy M 5

Obrázek 7.2: Výsledek zaměření hvězdokupy M 5



(a) : Orientace dalekohledu při zaměření M 104



(b) : Snímek galaxie M 104

Obrázek 7.3: Výsledek zaměření galaxie M 104

Kapitola 8

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zrealizovat naváděcí systém pro malý astronomický dalekohled na azimutální montáži. Hlavní motivací bylo ověření konceptu a funkčnosti zvoleného přístupu pro realizaci tohoto systému. Součástí práce byla implementace algoritmu fúze dat gyroskopu, akcelerometru a magnetometru za účelem odhadu počáteční orientace dalekohledu v prostoru. Dalším bodem práce byl návrh a realizace systému pro ovládání motorů s cílem motorizace montáže a automatického směřování dalekohledu. Pro upřesnění orientace dalekohledu bylo práci možné rozšířit použitím obrazu z kamery, která snímá zorné pole dalekohledu. Porovnáním získaného obrazu s katalogem hvězd je možné upřesnit orientaci dalekohledu odhadnutou na základě výsledků algoritmu fúze.

V práci je nejprve uveden stručný popis základních astronomických souřadnic. Zmíněn je zde převod mezi těmito souřadnicemi, který je nezbytný pro zaměření cílového objektu dalekohledem na azimutální montáži. Za účelem kompenzace rotace Země kolem své osy a tím způsobeného zdánlivého pohybu objektů po obloze je v práci také odvozen výpočet změny obzorníkových souřadnic v čase.

Následně je v práci podrobněji popsán implementovaný algoritmus pro odhad orientace. Uvedena je také základní algebra quaternionů, které implementovaný algoritmus využívá pro parametrizaci rotace. Popsány jsou jednotlivé senzory, jejichž data jsou použita pro počáteční odhad orientace dalekohledu.

Součástí práce je také popis realizace řídicí elektroniky naváděcího systému. Uvedeno je zde schéma zapojení jednotlivých komponent řídicí elektroniky spolu s popisem výběru použitých modulů. Popsáno je také mechanické řešení motorizace montáže dalekohledu včetně odvození nezbytných výpočtů pro přesné orientování dalekohledu. Automatické natáčení dalekohledu zajišťují krokové motory. V práci jsou uvedeny implementované metody řízení těchto krokových motorů.

Práce zahrnuje popis implementace hlavní řídicí aplikace realizovaného naváděcího systému na jednodeskovém počítači Raspberry Pi. Z této aplikace

je uživateli umožněno zadat souřadnice cílového objektu. Naváděcí systém pak podle jednotlivých kroků aplikace nasměruje dalekohled požadovaným směrem, zpřesní jeho orientaci na základě obrazu z kamery a poté začne sledovat zdánlivý pohyb objektu po obloze.

V závěru práce jsou uvedeny demonstrační výsledky celkového naváděcího systému. Funkčnost implementovaného naváděcího systému byla ověřena reálným zaměřením astronomického dalekohledu na konkrétní objekty na obloze. Následně dalekohled dané objekty sledoval a za pomoci kamery byla pořízena série snímků zorného pole dalekohledu.

Výsledkem práce je funkční naváděcí systém pro astronomický dalekohled na azimutální montáži. Princip tohoto systému byl otestován na malém astronomickém dalekohledu. Při dalším praktickém využití je možné tento systém použít pro navádění většího astronomického dalekohledu v kombinaci s menším naváděcím dalekohledem anebo naváděcí kamerou v pozici off-axis-tracking.



Literatura

- [1] WHITTLESEY, Marshall A. *Spherical Geometry and Its Applications* [online]. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group: Chapman and Hall/CRC, 2019 [cit. 2022-05-14]. ISBN 9780429328800. Dostupné z: doi:10.1201/9780429328800
- [2] KULHÁNEK, Petr. ALDEBARAN GROUP FOR ASTROPHYSICS. *ALDEBARAN: Astrofyzika* [online]. [cit-2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/>
- [3] HLAVÁČEK, Petr. *Detekce hvězd s použitím celooblohové kamery*. Praha, 2014. Diplomová práce (Ing.), České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra radioelektroniky, 2014-06-05
- [4] *Hvězdný čas*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Hvězdný_čas
- [5] TRAINELLI, Lorenzo a CROCE, Alessandro. *A comprehensive view of rotation parametrization*. 2004. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS. 24-28.
- [6] KUIPERS, Jack B. *Quaternions and rotation sequences: a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality*. 5th print., 1st paperback ed. Princeton: Princeton University Press, 2002. ISBN 0691102988.
- [7] KOK, Manon, Jeroen D. HOL a Thomas B. SCHÖN. *Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation*. Foundations and Trends in Signal Processing [online]. 2017, 11(1-2), 1-153 [cit. 2022-05-14]. ISSN 1932-8346. Dostupné z: doi:10.1561/20000000094
- [8] MADGWICK, S. O. H., A. J. L. HARRISON a R. VAIDYANATHAN. *Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm*. In: 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics [online]. IEEE, 2011, 2011, s. 1-7 [cit. 2022-05-14]. ISBN 978-1-4244-9862-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICORR.2011.5975346

- [9] PASSARO, Vittorio M. N., Antonello CUCCOVILLO, Lorenzo VAIANI, Martino DE CARLO a Carlo Edoardo CAMPANELLA. *Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective*. Sensors [online]. 2017, 17(10) [cit. 2022-05-14]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s17102284
- [10] ACARNLEY, Paul. *Stepping Motors: A guide to theory and practice*. 4th ed. The Institution of Engineering and Technology, 2002. ISBN 9780852964170.
- [11] The ImageMagick Development Team (2021). *ImageMagick* [online]. [cit-2022-05-11]. Dostupné z: <https://imagemagick.org>
- [12] LANG, Dustin, David W. HOGG, Keir MIERLE, Michael BLANTON a Sam ROWEIS. *ASTROMETRY.NET: BLIND ASTROMETRIC CALIBRATION OF ARBITRARY ASTRONOMICAL IMAGES*. The Astronomical Journal [online]. 2010, 139(5), 1782-1800 [cit. 2022-05-14]. ISSN 0004-6256. Dostupné z: doi:10.1088/0004-6256/139/5/1782