

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

Martin Šilpoch

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Zaměřovací hlava
Bakalářská práce

2024

Martin Šilpoch

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin Šilpoch**
Osobní číslo: **I23247**
Studijní program: **B0714A150008 Automatizace**
Téma práce: **Zaměřovací hlava**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh elektroniky pro řízení zaměřovací hlavy (otočná platforma s náklonem) nesoucí kameru případně další snímače. Teoretická část práce provede rešerši možností pohonů a řízení polohy hlavy. Vhodné je zamyslet se nad možnostmi využití platforem používaných u 3d tiskáren. Dále bude teoretická část obsahovat přehledovou rešerši možností zaměření a trasování vybraného objektu (člověk/obličej, objekt na obloze) pomocí kamery, termokamery, případně jiných navržených metod. Praktická část práce provede návrh a konstrukci systému řízení polohy s komunikačním rozhraním k PC. Pro ověření funkčnosti bude na PC, případně jiném zařízení provedena ukázka sledování vybraného objektu.

Rozsah pracovní zprávy: **30-50**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN technická literatura, 2003. 336 s. ISBN 978-80-7300-083-0.
- [2] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C. Praha: BEN technická literatura, 2003. 216 s. ISBN 978-80-7300-102-0.
- [3] VLACH, J. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha: BEN technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 978-80-86056-66-X.
- [4] BRTNÍK, B. Základní elektronické obvody. Praha: BEN technická literatura, 2011. 156s. ISBN 978-80-7300-408-8
- [5] RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Rozsival**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2024**

doc. Ing. Petr Doležel, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Daniel Honc, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Práci s názvem zaměřovací hlava jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 24.5.2024

Martin Šilpoch v.r.

ANOTACE

Práce je věnována návrhu a tvorbě sledovacího zařízení, které bude schopno zaměřování objektů ve svém okolí. V rámci této práce bude navržen 3D model dvouosého ramena, které bude následně fyzicky zhmotněno. Dále bude navrhnout a vyroben řídicí obvod spolu s řídicím softwarem. Nakonec bude otestována funkcionality celé soustavy včetně zaměřování objektů.

KLÍČOVÁ SLOVA

zaměřování, robotické rameno, 3D tisk, automatizace

TITLE

Aiming head

ANNOTATION

This work is dedicated to the design and creation of a tracking device, that will be able to target objects in its surroundings. As part of this work, a 3D model of the dual axis arm will be designed, which will be then physically materialized. Furthermore, control circuit with control software will be designed. Finally, the functionality of the entire system will be tested, including the targeting of objects.

KEYWORDS

tracking, robot arm, 3D printing, automatization

OBSAH

OBSAH	3
ÚVOD.....	12
1 NÁVRH RAMENA	13
1.1 teoretický model	13
1.2 volba komponent a zpracování	13
1.2.1 způsob výroby.....	13
1.2.2 volba materiálu	14
1.2.3 uložení os.....	14
1.2.4 pohon.....	15
1.2.5 převodové ústrojí	16
1.2.6 řízení motorů.....	18
1.2.7 řídicí mikroprocesor	19
1.3 návrh a zpracování řídicí jednotky.....	22
1.3.1 řídicí deska.....	22
1.3.2 napájení	24
1.4 návrh modelu ramena.....	24
1.4.1 základna.....	24
1.4.2 první osa	25
1.4.3 druhá osa.....	26
1.4.4 rozsah os a koncové spínače	27
1.4.5 parametry ramena.....	28
2 ŘÍDÍCÍ SOFTWARE	30
2.1 ovládání ramena.....	30
3 ZAMĚŘOVÁNÍ.....	31
3.1 způsob zaměřování objektů	31
3.1.1 výpočet hodnot pro natočení ramena	31
3.1.2 Výpočet azimutu	31
3.1.3 výpočet elevace.....	32
3.1.4 rychlost pohybu.....	33
3.2 inicializace a kalibrace ramena.....	33
3.2.1 kalibrace pohybu	33
3.2.2 kalibrace ramena vůči okolí.....	34
3.2.3 zaměřovací soustava.....	34
3.2.4 zaměřování statických objektů	34
3.2.5 opakovatelnost zaměření	36

3.2.6	sledování pohybujících se objektů	37
3.2.7	zjištění polohy letadla.....	37
3.2.8	predikce polohy letadla – aproximace z minulých poloh.....	37
3.2.9	predikce polohy letadla – poloha + azimut + rychlost	38
3.2.10	sledování ostatních objektů.....	39
ZÁVĚR.....		41
BIBLIOGRAFIE		43

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

obr. 1 - porovnání parametrů termoplastů používaných pro 3d tisk (12).....	14
obr. 2 - porovnání celkových tolerancí ložisek 6002 a 6818.....	15
obr. 3 - krokový motor NEMA 17 (15).....	16
obr. 4 - řemenový převod první osy ramena.....	17
obr. 5 - arduino uno (ATMEGA328).....	20
obr. 6 - vlevo ESP32 DevKit, vpravo ESP32 C3 AIRM2M CORE.....	20
obr. 7 - NUCLEO (STM F446RE) - horní oddělitelná část ST-LINK.....	21
obr. 8 - první verze PCB.....	22
obr. 9 - provizorní zapojení pro ověření funkčnosti první verze desky.....	23
obr. 10 - druhá verze PCB.....	23
obr. 11 - model základny.....	24
obr. 12 - model základny s přídatnými stabilizátory.....	25
obr. 13 - model první osy.....	25
obr. 14 - řez z profilu první osy.....	26
obr. 16 - řez z profilu druhé osy.....	27
obr. 15 - model druhé osy.....	27
obr. 17 - výsledné uspořádání elektroniky uvnitř základny.....	28
obr. 18 - rozložený pohled celé soustavy.....	29
obr. 19 - výsledná podoba ramena.....	29
obr. 20 - ilustrace rovnoběžek a poledníků určujících GPS souřadnice (16).....	31
obr. 21 - správně vypočtené hodnoty zohledňující zakřivení Země.....	32
obr. 22 - online kalkulačka azimutu FCC (17).....	32
obr. 23 - reprezentace rychlosti pohybu ramena v závislosti na maximální akceleraci (18)....	33
obr. 24 - objektiv AURIOL.....	34
obr. 25 - zaměřované statické objekty.....	35
obr. 26 - přesnost zaměřování polohy objektů podle map vs GPS.....	36
obr. 27 - test opakovatelnosti zaměření.....	37
obr. 28 - sledování letadla – základní aproximace polohy (20x přiblížení).....	38
obr. 29 - sledování letadla – aproximace polohy z rychlosti a směru letadla (60x přiblížení).39	
obr. 30 - vizualizace sledování letadla – oranžový bod – rameno, modré body – aproximované polohy letadla.....	39
obr. 31 - přenosová soustava, zleva: GPS modul, letový počítač, přijímač, vysílač.....	40

SEZNAM ZKRATEK

ADB-S – Automatic Dependent Surveillance-Broadcast

DOF – Degrees Of Freedom

FDM – Fused Deposition Modeling

GPS – Global Positioning System

PCB – Printed Circuit Board

RTC – Real Time Clock

SDR – Software Defined Radio

SMD – Surface Mounted Device

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

TERMINOLOGIE

package – pouzdro, ve kterém je umístěn čip

pinout – rozložení vývodů elektrických součástek

standalone – zařízení či software nezávislý na jiném softwaru/hardware

ÚVOD

Tato práce se bude zabývat návrhem a následným testováním zaměřovacího ramena, které bude schopné autonomního sledování objektů – primárně dopravních letadel – ve svém okolí.

Práce bude rozdělena na 3 části: první část bude věnována návrhu modelu ramena, volbě komponent a způsobu výroby. Druhá část se bude zabývat návrhem řídicího softwaru. Třetí část bude zaměřena na návrh způsobu zaměřování a sledování objektů, následované testováním zaměřování.

Při návrhu bude kladen důraz na robustnost celé soustavy, od dostatečně dimenzované konstrukce ramena, až po řídicí obvod a sledovací algoritmus. Zároveň bude využito komerčně dostupných komponent.

1 NÁVRH RAMENA

1.1 teoretický model

Prvním krokem při návrhu zařízení s možností pohybu je určení potřebného počtu stupňů volnosti (DoF). Zařízení schopné volného pohybu a rotace v prostoru nabývá 6 DoF. Jelikož se v tomto případě jedná o zařízení statické, odpadá nutnost řešení pohybu v prostoru a počet DoF klesá na 3. Těmito stupni mohou být v tomto konkrétním případě azimut, elevace a natočení kamery. Pro sledování objektů jsou dostačující pouze azimut a elevace, natočení kamery slouží pouze pro správnou orientaci objektu např. letadla v záběru fotoaparátu tak, aby mělo správnou orientaci. Pro účely této práce a celkové zjednodušení bude zpracováno zařízení s 2 DoF, a to azimutem a elevací.

Dále je nutné určit vzájemnou orientaci a pořadí jednotlivých kloubů. K dosažení 2 DoF je nutné, aby mezi sebou osy jednotlivých kloubů svíraly nenulový úhel, v ideálním případě, aby na sebe byly kolmé. Jako dvě možná řešení se nabízejí: osy pod úhlem 45° a osy vzájemně kolmé. Vezmeme-li v potaz, že případné sledované objekty (např. dopravní letadla) téměř nikdy nebudou vykonávat ideální pohyb, kdy bylo ke sledování možné využít pouze jeden stupeň volnosti (ze kterého by benefitovala konfigurace s kolmými osami), nezískává v tomto ohledu ani jedna konfigurace značnou výhodu. Výhodou os pod úhlem 45° by mohla být vyšší tuhost konstrukce, nevýhodou je však komplexnost konstrukce a řízení, ať už z hlediska fyzické implementace, nebo nutnosti přesné koordinace pohybu os při lineárních pohybech sledovaného objektu. Z těchto důvodů bude zvolena konstrukce s osami vzájemně kolmými.

1.2 volba komponent a zpracování

1.2.1 způsob výroby

Základním faktorem, který bude dále definovat postup a způsob návrhu je materiál, ze kterého bude sledovací hlava tvořena a jeho zpracování. Nabízení se 3 základní materiály: dřevo, plast a kov. Z hlediska pevnosti a pružnosti se jeví jako ideální materiál na výrobu kov. Ten má však velké nevýhody v náročnosti jeho zpracování – budeme-li brát v potaz jako hlavní způsob zpracování subtraktivní metody jako cnc obrábění, jedná se o relativně finančně náročnou položku ať už se jedná o materiál samotný nebo o jeho zpracování. V případě dřeva se jedná o materiál srovnatelný s fyzikálními vlastnostmi plastu (v závislosti na druhu dřeva) a cenou. Nevýhodou dřeva je však způsob jeho zpracování – pro atypické tvary jako jsou díry o velkých a nestandardních rozměrech nebo ozubená kola/řemenice je nutné využití cnc, jehož cena (ať už pořizovací nebo ve formě služeb firem) může být násobně vyšší než pořizovací cena 3D tiskárny. Ta se jeví jako ideální způsob výroby, který umožňuje obdobné výrobní vlastnosti jako cnc obrábění, navíc je však možné vytvářet tvary, které by u obráběcích strojů byly nemožné (např. dutiny uvnitř materiálu pro zapuštění matek či dutá výplň pro snížení hmotnosti).

1.2.2 volba materiálu

Běžně dostupnými materiály pro tisk na domácích FDM 3D tiskárnách jsou: PLA, ABS, PETG, ASA či pryskyřice v případě SLA tiskáren. Na obr. 1 jsou znázorněny rozdílné parametry jednotlivých materiálů. Z hlediska pružnosti, která bude u přesnosti zařízení klíčová, jasně vítězí materiál HIPS a materiály plněné uhlíkovým vláknem. Pro tuto práci však bude využit materiál PLA díky jeho nízké teplotní smrštivosti, celkové nenáročnosti na tisk a stále nadprůměrně nízké pružnosti. Pokud by bylo při testování zjištěn nedostatek tohoto materiálu, může být nahrazen jedním z výše uvedených ať už celkově, nebo v částech, kde to bude potřebné (např. měknutí kvůli teplotě motorů, nízké odolnosti vůči opotřebení...).

	ABS	Flexible	PLA	HIPS	PETG	Nylon	Carbon Fiber Filled	ASA	Polycarbonate	Polypropylene	Metal Filled	Wood Filled	PVA
Compare Selected	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ultimate Strength	40 MPa	26-43 MPa	65 MPa	32 MPa	53 MPa	40-85 MPa	45-48 MPa	55 MPa	72 MPa	32 MPa	20-30 MPa	46 MPa	78 MPa
Stiffness	5/10	1/10	7.5/10	10/10	5/10	5/10	10/10	5/10	6/10	4/10	10/10	8/10	3/10
Durability	8/10	9/10	4/10	7/10	8/10	10/10	3/10	10/10	10/10	9/10	4/10	3/10	7/10
Maximum Service Temperature	98 °C	60-74 °C	52 °C	100 °C	73 °C	80-95 °C	52 °C	95 °C	121 °C	100 °C	52 °C	52 °C	75 °C
Coefficient of Thermal Expansion	90 µm/m°C	157 µm/m°C	68 µm/m°C	80 µm/m°C	60 µm/m°C	95 µm/m°C	57.5 µm/m°C	98 µm/m°C	69 µm/m°C	150 µm/m°C	33.75 µm/m°C	30.5 µm/m°C	85 µm/m°C
Density	1.04 g/cm ³	1.19-1.23 g/cm ³	1.24 g/cm ³	1.03-1.04 g/cm ³	1.23 g/cm ³	1.06-1.14 g/cm ³	1.3 g/cm ³	1.07 g/cm ³	1.2 g/cm ³	0.9 g/cm ³	2-4 g/cm ³	1.15-1.25 g/cm ³	1.23 g/cm ³
Price (per kg)	\$10-\$40	\$30-\$70	\$10-\$40	\$24-\$32	\$20-\$60	\$25-\$65	\$30-\$80	\$38-\$40	\$40-\$75	\$60-\$120	\$50-\$120	\$25-\$55	\$40-\$110
Printability	8/10	6/10	9/10	6/10	9/10	8/10	8/10	7/10	6/10	4/10	7/10	8/10	5/10
Extruder Temperature	220-250 °C	225-245 °C	190-220 °C	230-245 °C	230-250 °C	220-270 °C	200-230 °C	235-255 °C	260-310 °C	220-250 °C	190-220 °C	190-220 °C	185-200 °C
Bed temperature	95-110 °C	45-60 °C	45-60 °C	100-115 °C	75-90 °C	70-90 °C	45-60 °C	90-110 °C	80-120 °C	85-100 °C	45-60 °C	45-60 °C	45-60 °C
Heated Bed	Required	Optional	Optional	Required	Required	Required	Optional	Required	Required	Required	Optional	Optional	Required
Recommended Build Surfaces	Kapton Tape, ABS Slurry	PEI, Painter's Tape	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	Glass Plate, Glue Stick, Kapton Tape	Glue Stick, Painter's Tape	Glue Stick, PEI	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	Glue Stick, PEI	PEI, Commercial Adhesive, Glue Stick	Packing Tape, Polypropylene Sheet	Painter's Tape, Glue Stick, PEI	Painter's Tape, Glue Stick, PEI	PEI, Painter's Tape
Other Hardware Requirements	Heated Bed, Enclosure Recommended	Part Cooling Fan	Part Cooling Fan	Heated Bed, Enclosure Recommended	Heated Bed, Part Cooling Fan	Heated Bed, Enclosure Recommended, May Require All Metal Hotend	Part Cooling Fan	Heated Bed	Heated Bed, Enclosure Recommended, All Metal Hotend	Heated Bed, Enclosure Recommended, Part Cooling Fan	Wear Resistant or Stainless Steel Nozzle, Part Cooling Fan	Part Cooling Fan	Heated Bed, Part Cooling Fan

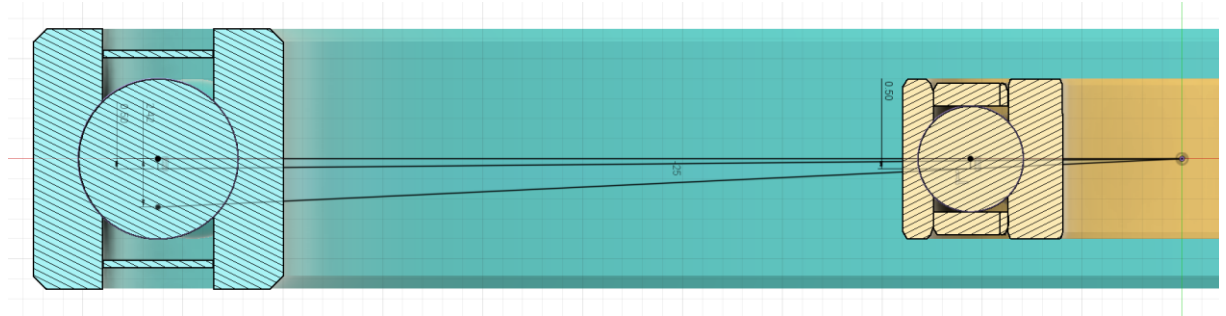
obr. 1 - porovnání parametrů termoplastů používaných pro 3D tisk (12)

1.2.3 uložení os

Pro rotační spojení 2 částí ramena je možné využít několika možností – kluzné spojení typu plast-plast nebo rotačních ložisek. Kluzné spojení je částečně jednodušší na implementaci a při tomto využití (pomalé otáčení) nemusí být problémem ani vyšší třecí síly. Nese s sebou však několik negativ. Jedním z nich mohou být velké tolerance snižující celkovou přesnost ramena. Dalším nedostatkem může být vysoká statická třecí síla, kdy je nutné „utrhnout“ kloub pro uvedení do pohybu. Vhodnějším kandidátem se tedy jeví a budou využita rotační ložiska. Nabízejí se dvě možnosti získání ložisek – 3D tištěná a komerčně dostupná. Nevýhodou komerčních ložisek je vázanost na standardní rozměry, v případě tištěných ložisek je jejich rozměr omezen pouze představivostí designera. Tištěná kuličková ložiska však mají velkou nevýhodu – převisy při tisku kuliček a nízká styčná plocha s tiskovou podložkou. Ty prakticky znemožňují tisk bez podpor, které po odstranění zanechají na jejich výsledném povrchu nerovnosti ústící buď ve vyšší vůle nebo zadrhávání. Nabízí se nahrazení kuliček válečky, tím by však byla omezena axiální fixace. Budou tedy využita komerčně dostupná ložiska, která by měla poskytovat nižší tolerance a návrh ramena se bude primárně odvíjet od jejich rozměrů.

Při výběru ložisek je zohledněn fakt, že ložiska musejí být schopna udržovat vzájemnou pozici 2 částí nezávisle na tom, v jakém směru působí síly na ložiska. Byla tedy zvolena kuličková ložiska. Dále je nutné vzít v potaz vůle v ložiscích. V zásadě platí, že čím větší průměr má ložisko v závislosti k působící síle, tím méně se promítnou jeho vnitřní vůle viz. obr. 2. Zde je

vidět porovnání malého ložiska 6002 o vnějším průměru 28 mm a ložiska 6818 o vnějším průměru 115 mm. U obou ložisek jsou dány stejné teoretické odchylky v místě kuliček, výsledná odchylka v místě kuliček velkého ložiska je u malého násobně větší (2.4 mm) než u většího ložiska (0.5 mm). Pro tuto práci budou využity ložiska 6818 – 90x115x13 mm s gumovými krytkami kuliček. Výhodou takto velkých ložisek je též možnost jejich využití jako části konstrukce a tím zpevnění a snížení množství materiálu potřebného pro konstrukci ramena.



obr. 2 - porovnání celkových tolerancí ložisek 6002 a 6818

1.2.4 pohon

Pro řízení pohybu jednotlivých os je nutné využití motorů. K dosažení přesného a opakovatelného zaměření je nutné, aby měl motor zpětnou vazbu o své poloze. Nabízejí se následující možnosti: DC uhlíkový motor, BLDC (bezkartáčový) motor, servomotor bez omezení úhlu natočení a krokové motory. U všech motorů kromě servomotoru je nutné využít převodového ústrojí, které bude měnit vysokootáčkový profil průběhu jejich výkonu s nízkým kroutícím momentem na nízkootáčkový s vysokým kroutícím momentem. Rozdíly však nastávají při jejich řízení. Pro řízení prvních třech motorů je nutné využití zpětné vazby, která se bude starat o řízení pohybu motoru pro dosažení požadované polohy. U krokového motoru není zpětná vazba potřeba, jelikož je jeho poloha pevně svázána s buzením jeho cívek. V krajních případech by mohlo být využití zpětné vazby vhodné, např. při překonání maximální síly motoru a přeskočení kroků, při běžném provozu však není potřeba – důkazem jsou 3D tiskárny, které jsou schopné několikadenních tisků bez ztráty kroků.

Dalším zásadním faktorem je řízení motorů. U motorů se zpětnou vazbou je nutná řídicí smyčka, která je nejen složitější na implementaci, ale může vnášet do pohybu ramena faktory jako je overshoot a řízení plynulého konstantního pohybu či rychlých přesunů mezi dvěma místy může být obtížné. Proto jsou pro návrh zvoleny krokové motory, které jsou nejen s využitím komerčně dostupných driverů snazší na řízení, ale jsou také vhodné pro pomalé pohyby a jsou schopné přesně držet nastavenou polohu.

Při pohledu na trh s 3D tiskárnami je až na výjimky standardem využívat pro pohyb os krokové motory. V určitých případech, jako jsou např. tiskárny od výrobce Prusa, navíc zjednodušují konstrukci tiskárny tím, že v kombinaci s drivery Trimatic od výrobce Analog devices jsou schopné detekovat náraz. Těto vlastnosti je „zneužíváno“ k detekci koncových bodů ramen a je tak eliminována nutnost koncových spínačů.

Z hlediska velikosti a síly motorů bude volen standardní rozměr využívaný v 3D tiskárnách – NEMA17, konkrétně motor nízkoprofilový motor US-17HS4023 (obr. 3). Hlavním faktorem pro jejich volbu je nízká pořizovací cena, vysoká dostupnost a možnost řízení standardními drivery jako A4988. V případě nedostatečnosti síly je možné jejich nahrazení většími motory NEMA17.



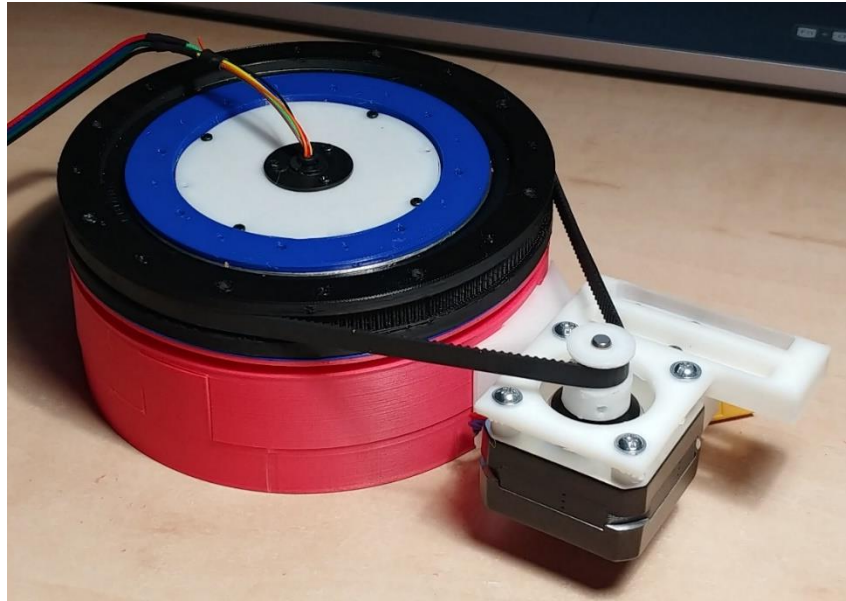
obr. 3 - krokový motor NEMA 17 (15)

1.2.5 převodové ústrojí

Jelikož je cílem co nejvyšší přesnost pohybu, je nutné převodovým ústrojím snížit rychlost a tím i zvýšit přesnost výsledného pohybu os. Nabízí se dva druhy redukce rotačního pohybu: ozubená kola s přímým převodem a ozubená kola s pružným přenašečem síly (řemeni či řetěz).

V prvním případě je možné využít několik druhů převodů: s čelním soukolím, planetární a šnekový převod. První jmenovaný je nejjednodušší na implementaci a nabízí prakticky neomezený převodový rozsah díky neomezenosti počtu převodových stupňů. Planetární převod je náročnější na implementaci a je navíc omezen převodovými rozsahy vzhledem k velikosti celého převodového ústrojí, nabízí však možnost implementace vnějšího ozubeného kola do ostatních částí konstrukce. Šnekový převod má velkou nevýhodu ve vázanosti převodového poměru téměř výhradně na průměru ozubeného kola. Oproti ostatním má však jednu výhradní výhodu – pohyb může do soustavy vnášet pouze šnekové kolo, díky tomu není nutné, aby motorem protékala energie pro držení nastavené pozice. Všechna převodová ústrojí s přímým převodem mají však společnou nevýhodu – vůle v soukolí. Pro dosažení přenosu energie s co nejmenšími ztrátami třením jsou ozubená kola navrhována s vůlemi, které jsou s každým dalším převodovým stupněm násobeny.

Dalším druhem jsou převody s nepřímým přenosem energie. energii je možné přenášet přes pružný/ohebný element jako je řemen nebo soustavou s mnoha pevnými pohyblivými částmi – řetězem. Z hlediska implementace se jeví jako jednodušší využití řemenu, který byť není možné prodlužovat/zkracovat podle potřeby změnou počtu článků, je možné zakoupit jak metráž řemenu a podle potřeby zkrátit, ale je možné i zakoupení uzavřené smyčky s různými délkami. Využití řemenů je primárně inspirováno jejich využitím v 3D tiskárnách, kde je demonstrována přesnost a životnost tohoto převodu. Na rozdíl od přímého převodu je možné dát řemenu předpětí, které eliminuje vůle. Byly tedy zvoleny ozubené řemeny GT2 o šířce 6 mm, identické, jaké jsou využívány u většiny 3D tiskáren.








obr. 4 - řemenový převod první osy ramena

Původním cílem bylo dynamické dopínání řemenu, kde by se element jako pružina či specificky navržený pružný díl staral o konstantní napnutí řemenu. Testování ramena probíhalo nejprve se statickým dopínáním řemenů, kdy je předpětí nastaveno posunem motoru dále/blíže k druhé řemenici. To se ukázalo jako dostačující a dynamické dopínání řemenu nebylo dále implementováno.

1.2.6 řízení motorů


Pro řízení motorů budou využity komerčně dostupné drivery krokových motorů. Vzhledem k využití motorů NEMA17 není nutné využití vysokovýkonových driverů, čímž se rozšiřuje jejich výběr. Při výběru byly z vlastní zkušenosti zvoleny drivery TMC2130, které poskytují téměř všechny dnes dostupné funkce pro řízení krokových motorů. K implementaci budou využity moduly s referenčním zapojením. Zpětně lze porovnat tyto drivery s konkurencí, viz tabulka 1 a 2.

tabulka 1 - porovnání driverů krokových motorů (14)

Stepper Drivers Comparison					
Spec Driver	a4988	DRV8825	TMC2225	TMC2208	TMC2209
Default Current	2a	1.3a	1.25a	1.25a	1.25a
Default Vref	0.8v	0.65v	0.4v	1.25v	1.25v
Max Current	2a	2.5a	2a	2a	2.5a
Formula	$i = Vref/0.8$	$i = Vref \times 2$	$i=Vref$	$i=Vref$	$i=Vref$
Current Adjustment	add clockwise, decrease	add clockwise, decrease	add anticlockwise, decrease clockwise	add anticlockwise, decrease clockwise	add anticlockwise, decrease clockwise
Microstep	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 1/8, 1/16, 1/32,	1/2, 1/4, 1/8, 1/16	Max 1/256
Motor	8V-35V, <2A	8.2V-45V, <2.5A	4.7-36V, <2a	4-35V, <2a	5.5-28v <2.5a
Mode	dir/step	dir/step	stealthchop/spreadCycle, dir/step, UART	stealthchop/spread Cycle, dir/step, UART	stealthchop/spread Cycle, dir/step, UART
Feature	4-layer PCB, 1.5mmx2mm	4-layer PCB, 1.5mmx2mm	4-layer PCB, Silent, Low heat	4-layer PCB, Noiseless, Smooth, Low heat	4-layer PCB, Noiseless, Smooth, Low heat. Homeless
Cautions: Please power off and disconnect motor when plug or remove driver.					
					

V rámci konkurence jsou drivery TMC2130 překonány pouze drivery TMC 5160, které mají vyšší možné napájecí napětí a proudy motorů. Všechny drivery nabízejí microstepping (levnější drivery do hodnoty 1/16, dražší až 1/256), který je schopen zvýšit přesnost krokových motorů na úkor kroutícího momentu, který jsou schopny poskytnout. Hlavní výhodou TMC2130 je však integrace všech dostupných funkcí jako stealthchop (způsob řízení motoru sinusovým průběhem napětí pro snížení hlučnosti), stallguard (detekce nárazu/přeskočení kroku motoru) a hlavně nastavení a řízení za pomoci SPI. Tím je eliminována potřeba fyzického přístupu k driveru pro změnu jeho nastavení, jako je proud motorů, který je běžně nastavován trimrem na modulu samotném. Řídící piny jsou navíc 5 V tolerantní, což znamená, že je na ně možné přivádět signál jak na napěťových úrovních 3.3 V, tak i 5 V.

tabulka 2 - porovnání driverů Trimatic (13)

SilentStepStick	TMC2100 5V	TMC2100	TMC2130	TMC2208	TMC2209	TMC5160
SilentStepStick (bottom view)						
Interface	Step/Dir	Step/Dir	Step/Dir or SPI	Step/Dir	Step/Dir	Step/Dir or SPI
Configuration	CFG Pins	CFG Pins	CFG Pins or SPI	CFG Pins or UART	CFG Pins or UART	SPI ¹
Native Microsteps ²	up to 1/16	up to 1/16	up to 1/256	up to 1/256	up to 1/256	up to 1/256
microPlyer Microsteps	1/256	1/256	1/256	1/256	1/256	1/256
Logic Supply Voltage (VIO)	5V	3 - 5V	3 - 5V	3 - 5V	3 - 5V	3 - 5V
Motor Supply Voltage (VM)	4.75 - 46V	5.5 - 46V	5.5 - 46V	5.5 - 35V	5.5 - 28V	10 - 35V (HV 50V)
Phase Current max (RMS) ³	1.2A	1.2A	1.2A	1.2A	1.7A	3.0A
RDson	0.5 Ohm	0.5 Ohm	0.5 Ohm	0.3 Ohm	0.2 Ohm	0.1 Ohm (HV 0.2 Ohm)
Rsense	110 mOhm	110 mOhm	110 mOhm	110 mOhm	110 mOhm	75 mOhm
Internal V-Regulator ⁴	disabled	enabled	enabled	enabled	enabled	enabled
Standby current reduction	yes	yes	yes	yes	yes	yes
stealthChop	yes	yes	yes	yes	yes	yes
spreadCycle	yes	yes	yes	yes	yes	yes
coolStep	-	-	yes	-	yes	yes
stallGuard	-	-	yes	-	yes	yes
dcStep	-	-	yes	-	-	yes

1.2.7 řídicí mikroprocesor

Na trhu mikroprocesorů jsou primárně 3 dominantní výrobci – STM, Atmel a Espressif. Při výběru byly hlavními faktory pro volbu mikrokontroleru: minimálně 12 GPIO (včetně SPI), alespoň 2 ADC vstupy a UART. Dalšími zohledňovanými fyzickými vlastnostmi jsou 5 V tolerantní GPIO piny a integrovaný UART -> USB převodník; naopak např. zda se jedná o 8 nebo 32bitový procesor či jakou spotřebu má mikroprocesor v této aplikaci nezáleží. V tomto ohledu je nabídka čipů téměř totožná u všech výrobců. Hlavním rozhodovacím faktorem je tedy cena, množství dostupné dokumentace a funkce nad rámec požadovaných.

Jako zástupce potenciálně požitých čipů lze uvést ATMEGA328 od výrobce atmel, což je 8bitový procesor s risc instrukční sadou, disponuje až 23 GPIO piny (v závislosti na package), 8 kanálové 10bitové ADC a hardwarovou podporu I2C, UART a SPI. IO porty pracují s napětím 5 V (1). Jedná se o hojně rozšířený čip díky integraci do prototypových modulů Arduino Uno, jež se časem stal primární volbou pro bastlení. Tomu ve velké míře dopomohla cena neoriginálních kopií desky, jež se pohybovala v řádu desetikorun, ale i extrémně jednoduché programovací knihovny a jejich dokumentace. V dnešní době je téměř nemožné narazit na periférii (obrazovky, klávesnice, motory...), pro kterou by nevznikla knihovna v rámci programovacího prostředí ArduinoIDE.



obr. 5 - Arduino uno (ATMEGA328)

Dalším zástupcem je ESP32 od výrobce Espressif, který je možné získat v různých variantách – základní ESP32 s 2 jádrovým 32bitovým procesorem, wifi (2.4 GHz) a bluetooth až po variantu s ESP32-C6, která rozšiřuje základní verzi o protokoly Zigbee, Thread, novější wifi 6 ale přidává i např. koprocesory pro kryptografii. Základní varianta ESP32 tedy nabízí 34 GPIO portů, 12bitové + 2 x 8bitové ADC, dohromady s až 18 kanály, 4x HW SPI, 2x I2C, 3x UART, CANbus, a další. Za zmínku též stojí základní věc jako interní RTC (relat time clock), které je schopné automatické synchronizace se servery po připojení k internetu, kterým např. ATMEGA328P nedisponuje a je nutné v případě potřeby použít externí RTC čipy.

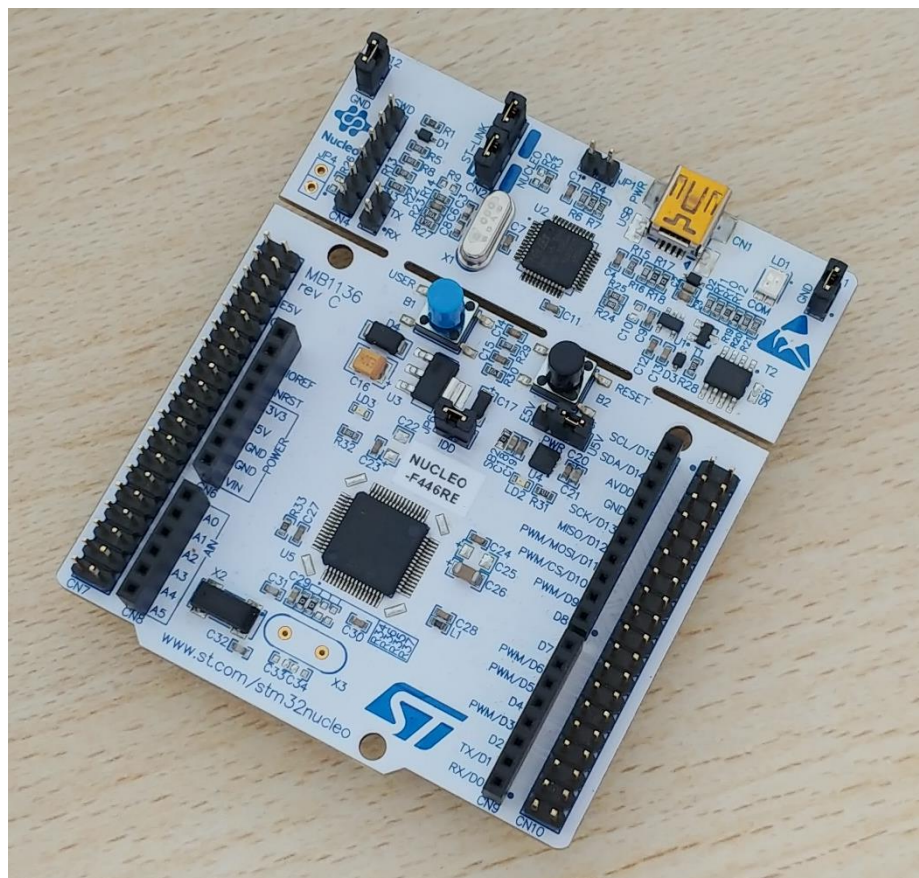


obr. 6 - vlevo ESP32 DevKit, vpravo ESP32 C3 AIRM2M CORE

Při porovnání se zástupcem Atmelu je očividné, že jej svou funkcionalitou násobně převyšuje. To je však vykoupeno menší komunitou okolo čipů ESP, neexistujícím nativním vývojovým prostředím (nejčastěji je paradoxně využíváno prostředí Arduino IDE, příp. Visual studio code).

Většinu dostupných knihoven pro čipy Atmel je však možné využít i pro tyto čipy, případně již byly vytvořeny nativní.

Posledním výrobcem je společnost STM, jejíž nabídka nenabízí žádného výrazného zástupce, pro porovnání bude tedy zvolen čip STM32F103. jedná se o 32bitový mikroprocesor, nabízející 2x12bitový ADC převodník (až 16 kanálů), 2x I2C, 3x UART, 2x SPI, 1x CAN, podporu USB a RTC obvod. Výrobce nabízí vývojové prostředí STM32 CubeMX, s jehož pomocí lze vytvářet a kompilovat firmware. V jeho rámci jsou k dispozici pokročilé UI a HAL knihovny, jež nabízejí téměř absolutní kontrolu nad hardwarem (např. nastavení coutérů, nastavení děličů hodin...). To je však nevýhodou pro mnohé uživatele – nastavení GPIO portu na vstup/výstup je v Arduino IDE provedeno jedním příkazem, v případě HAL knihoven se jedná příkazy 3. Další nevýhodou je nutnost proprietárního flashovacího HW – ST-LINK.



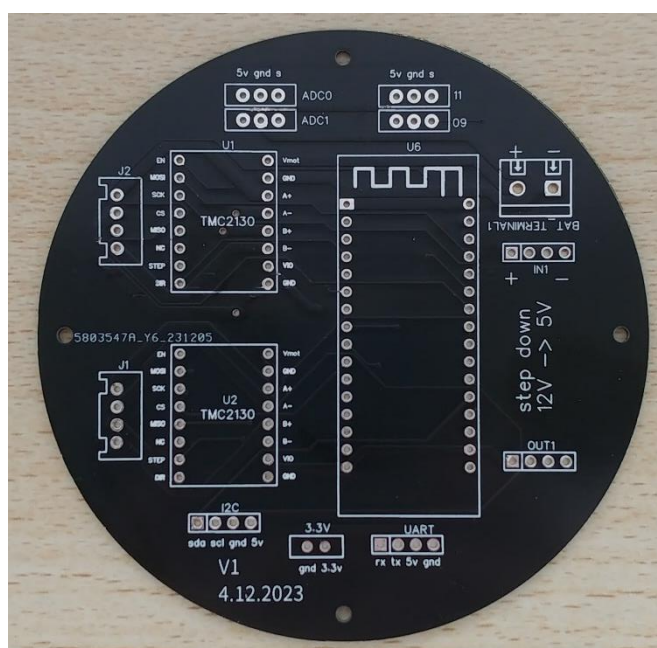
obr. 7 - NUCLEO (STM F446RE) - horní oddělitelná část ST-LINK

Po zhodnocení, byť všechny uvedené mikroprocesory splňují všechny požadavky, se jeví jako nejvhodnější procesor ESP32 díky integraci téměř všech dnes dostupných komunikačních protokolů a funkcí. Původně byla zvolena verze mikroprocesoru ESP32 C3 usazená v prototypovací desce AIRM2M CORE, následně byla volba změněna na starší verzi ESP32 Devkit (viz. Dále).

1.3 návrh a zpracování řídicí jednotky

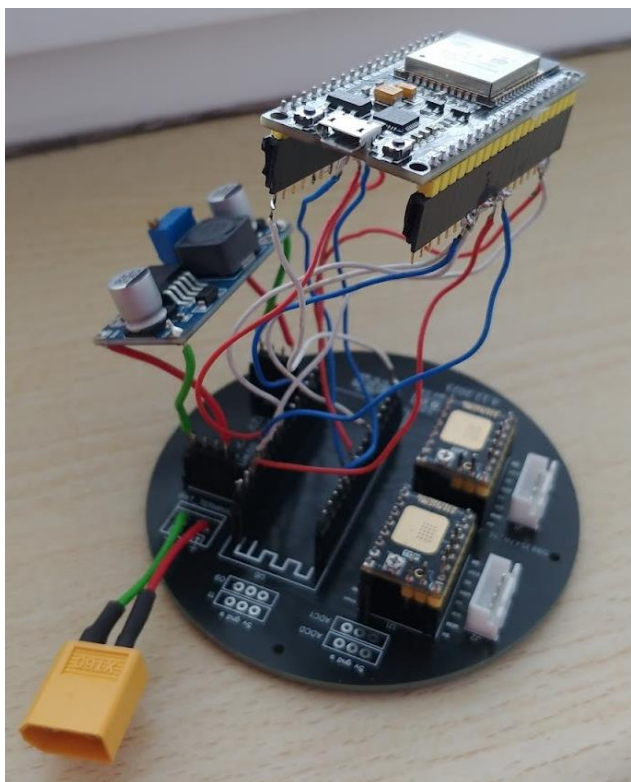
1.3.1 řídicí deska

Řídicí deska byla navržena jako propojovací médium mezi jednotlivými moduly tak, aby bylo v případě chyby v zapojení či vadného modulu možná snadná oprava výměnou. Dále je tímto způsobem značně zjednodušen návrh a následné osazování PCB, kdy je při návrhu úplně eliminována nutnost osazování SMD součástek. První verze desky (obr. 8) byla určena pro modul ESP32 C3 AIRM2M CORE, 2 moduly TMC2130 a stepdown modul. Dále byly vyvedeny ostatní dostupné piny pro případ budoucího využití (např. pro koncové spínače). Po osazení a testování byly odhaleny 2 problémy – rozložení a vzdálenost výstupů stepdown měniče neodpovídá výstupům modulu – rozměry byly chybně převzaty z předchozích projektů pro step-up modul, který má menší rozměry. Druhý problém se netýkal zapojení samotného, ale kompatibility firmware s novějším mikroprocesorem ESP32 C3. Pro otestování funkcionality tak byly vytvořeny redukce umožňující zapojení a otestování desky (obr. 9).



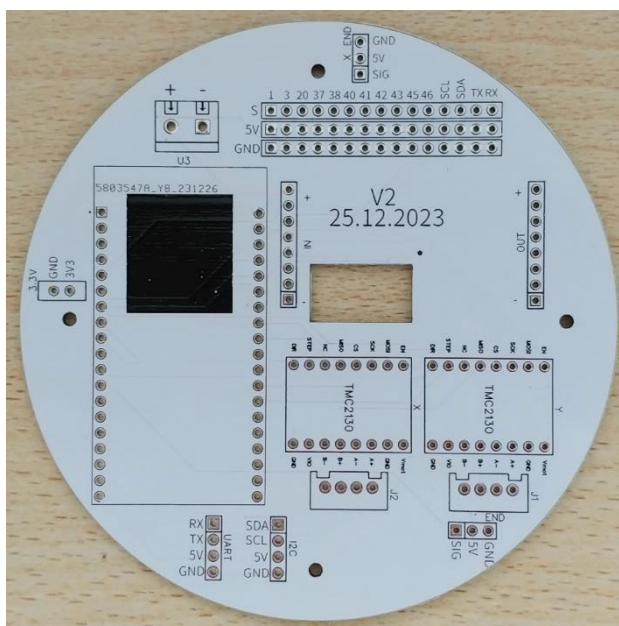
obr. 8 - první verze PCB

Po ověření zapojení a funkčnosti komponent byla vytvořena druhá verze desky (obr. 10), která řešila výše popsané problémy, a navíc obsahovala více dostupných vývodů pro jejich možné budoucí využití a otvor uprostřed desky, který umožňuje protažení napájecího kabelu vedoucímu ke krokovému motoru druhé osy. Obě desky byly též záměrně navrženy jako kruhové tak, aby mohly být zakomponovány do podstavce ramena.



obr. 9 - provizorní zapojení pro ověření funkčnosti první verze desky

Při návrhu byly použity 3 různé tloušťky cest, a to 0.25 mm pro signální cesty, 1 mm pro napájecí cesty a 1.6 mm pro silové cesty sloužící k napájení motorů. Návrh uspořádání komponent byl proveden ručně, uspořádání cest bylo provedeno nástrojem autoroute programu EASYEDA. Pro upevnění řídicí desky k podstavě jsou k dispozici 4 otvory k připevnění šrouby.



obr. 10 - druhá verze PCB

1.3.2 napájení

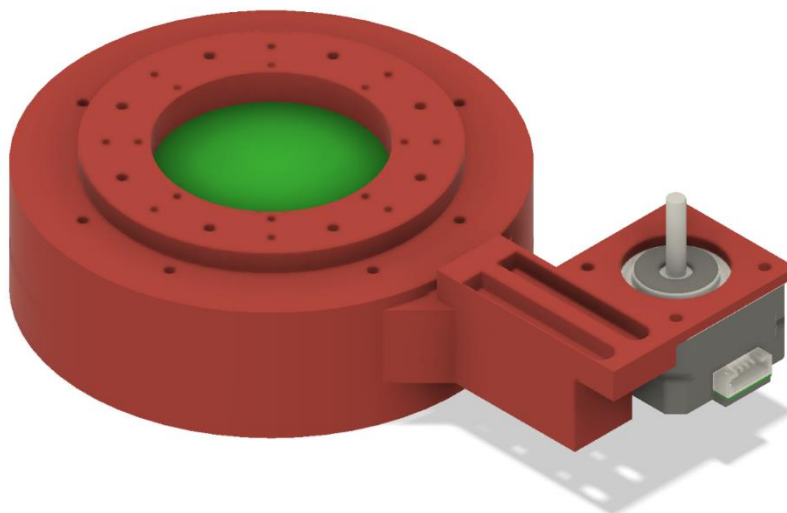
V celém zapojení se vyskytují 3 napěťové úrovně – 3.3 V, 5 V, 12 V (resp. vstupní napětí). První jmenovaná úroveň je využita v rámci jednotlivých modulů pro napájení mikroprocesorů ESP32 a STM2130 a jejich vzájemné komunikaci. 5 V je využito pro napájení jednotlivých modulů a 12 V je vstupní napětí využité pro napájení motorů. Vstupní napětí bylo zvoleno záměrně 12 V, jelikož se jedná o „standardní“ napětí, a hlavní myšlenkou při jeho volbě bylo napájení celé soustavy powerbankou s funkcí USB-PD, kdy je možné za pomoci USB beacon získat 12 V z USB výstupu. Desku je však možné napájet ze zdroje o napětí v rozsahu 6 – 35 V, při kterém se v obou limitních případech stává limitujícím faktorem step-down měnič. Díky tomu je možné i napájení ze zdroje s nekonstantním výstupním napětím, např. přímo z baterie.

1.4 návrh modelu ramena

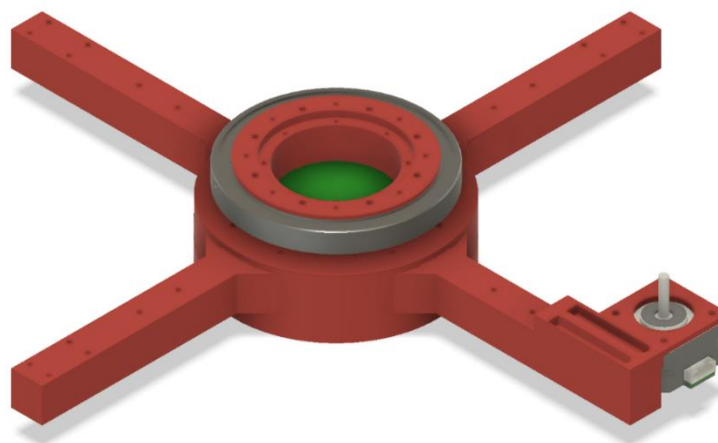
Celé rameno je záměrně navrženo modulárně tak, aby bylo možné v případě potřeby měnit a nahrazovat jednotlivé části dle potřeby. V následujících obrázcích je možné povšimnout si velkého množství otvorů sloužících k propojení jednotlivých částí samořeznými šrouby o rozměrech M3x10 pro konstrukční části a M2x10 pro ostatní díly. Zároveň jsou jednotlivé díly navrženy tak, aby byla minimalizována či úplně eliminována potřeba podpor při tisku.

1.4.1 základna

Cílem při návrhu základny je poskytnout stabilní ukotvení ramena vůči podkladu a zároveň akomodace řídicích komponent. Tvar a velikost základny byly zvoleny záměrně kruhové a o stejném průměru jako řemenice první osy, aby opticky splývaly. Uvnitř základny je místo pro uložení řídicí desky a je možné rozšíření o vnější stabilizační nohy. Jedna z nich zároveň slouží jako místo pro upevnění krokového motoru první osy. Výška základny je definována primárně výškou komponent na řídicí desce.



obr. 11 - model základny



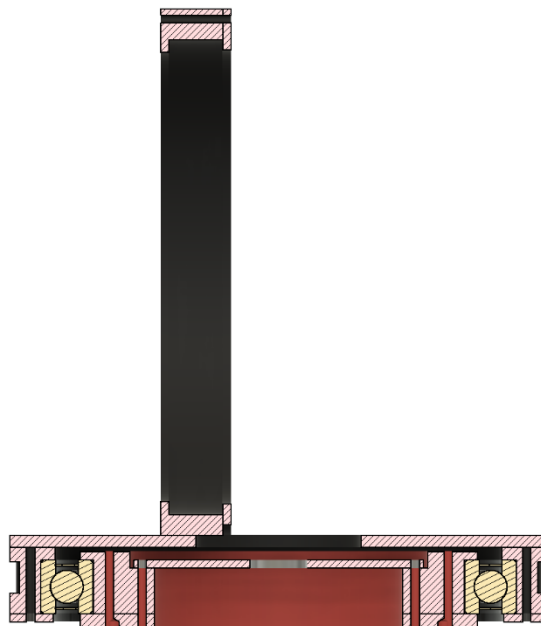
obr. 12 - model základny s přidavnými stabilizátory

1.4.2 první osa

První osa slouží k rotaci ramene v horizontální ose – azimutu. Od základny je oddělena ložiskem, kde vnější strana jeho uložení byla využita jako řemenice pro pohon. Ložisko je upevněno sevřením mezi tělo první osy a „příruby“. Díly byly navrženy s pozitivními tolerancemi tak, aby bylo v případě rozdílných rozměrů 3D modelu a tištěného dílu stále možné vložení ložiska. Tolerance byly následně vymezeny vložním proužků kancelářského papíru mezi ložisko a tělo ramena. Krokový motor byl umístěn na jednu ze stabilizačních nožiček, v případě jejich absence na zkrácenou verzi nožičky. Na předělu mezi základnou a první osou je otvor pro umístění slipringu uloženého na samostatném díle, umožňujícího neomezenou rotaci první osy se zachováním možnosti nepřerušeno napájení motoru druhé osy. Zvolený slipring (2) disponuje 6 vodiči a je schopen přenášet proudy až 2 A. Řemenice byla vytvořena na základě parametrického modelu dostupného na [thingiverse.com](https://www.thingiverse.com) (3).



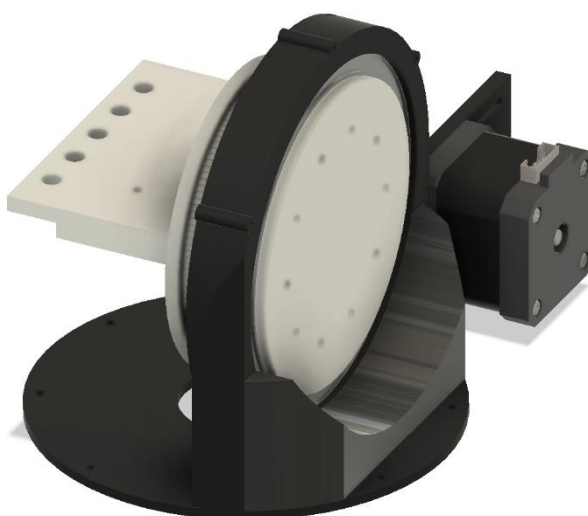
obr. 13 - model první osy



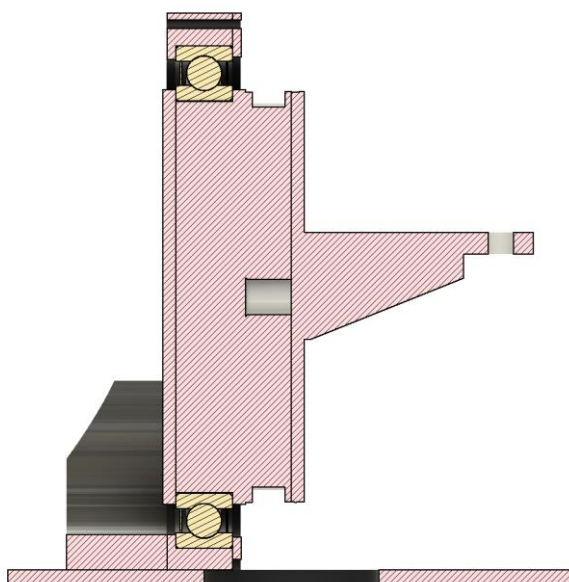
obr. 14 - řez z profilu první osy

1.4.3 druhá osa

Uložení druhé osy bylo navrženo opačným způsobem než uložení první osy, zde připadá vnější část ložiska k první ose a vnitřní část k ose druhé. Zároveň bylo uložení ložiska umístěno asymetricky tak, aby bylo možné bezproblémové provedení vodičů ze středu první osy a aby bylo možné dosáhnout dvou odlišných konfigurací – záznamové zařízení ve středu první osy (těžiště blízko středu ramena) nebo na vnější straně (umožňuje použití delších optických zařízení, u kterých by tělo podstavy a první osy omezovaly rozsah druhé osy). Dále byla přidána pevnostní vzpěra na uložení ložiska druhé osy z důvodu nízké pevnosti a pružení tohoto uložení při testování. Platforma pro upevnění zaznamenávacího zařízení byla navržena jako vyměnitelná upevněním sadou pěti šroubů bez nutnosti zásahu do pohonu osy, aby bylo v případě potřeby možné připevnit specifický držák pro konkrétní zaznamenávací zařízení. Dále byla oproti prvnímu návrhu odebrána horní část řemenice zamezující sklouznutí řemenu, jelikož zde vznikal při tisku 90° převis, na kterém bylo nutné využití podpor. Po odstranění podpor však zůstal na tomto převisu hrubý povrch, který, byť nezpůsoboval spadávání ani přeskakování řemenu, viditelně a slyšitelně způsoboval drhnutí řemenu. Náhradou je „okružní“ platformy pro připevnění sledovacího zařízení, které má stejný průměr jako původní část řemenice a plně ji tak nahrazuje.



obr. 16 - model druhé osy



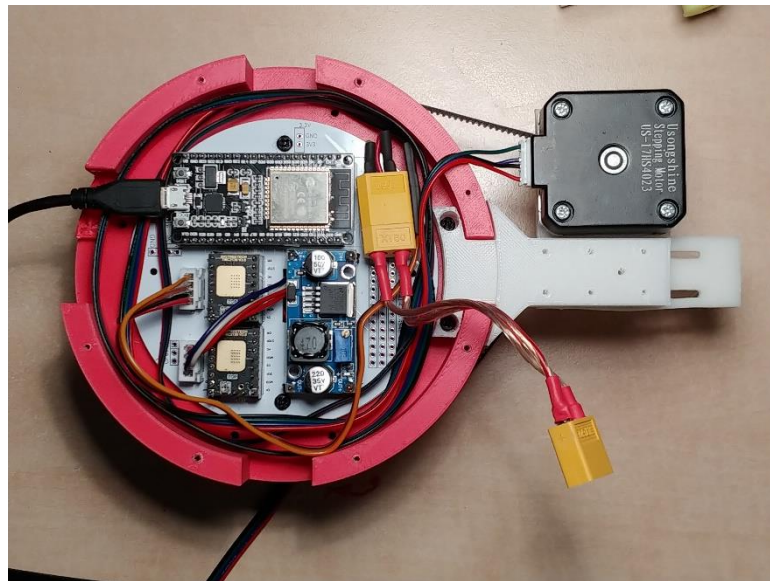
obr. 15 - řez z profilu druhé osy

1.4.4 rozsah os a koncové spínače

Již při návrhu fyzického modelu bylo uvažováno nad tím, že obě osy budou mít neomezený rozsah otáčení (např. byly využity uzavřené řemeny). Ve výsledku je toho možné dosáhnout pouze v určitých případech, kdy nebude připojené zařízení interferovat s tělem ramena.

První osa není nijak omezena, není u ní tedy potřeba nijak omezovat rozsah pohybu. V případě druhé osy by byla přítomnost a poloha koncového/koncových spínačů závislá na omezení rozsahu způsobeném připojeným zařízením. Namísto nich je využito funkce driverů krokových motorů zvané Sensorless homing, která se hojně vyskytuje u 3D tiskáren. Ta sleduje proud tekoucí jednotlivými cívkami a při jejich náhlé změně (náraz ramena do překážky), která přesáhne stanovenou mez či přeskočení kroků motoru, zastaví pohyb ramena a vrátí informaci o dosažení konce hlavnímu mikrokontroleru (4). Tím je dosaženo možnosti přizpůsobení

rozsahu pohybu reálným podmínkám v závislosti na konfiguraci, nebo manuální přizpůsobení rozsahu fyzickým zastavením ramena obsluhou.

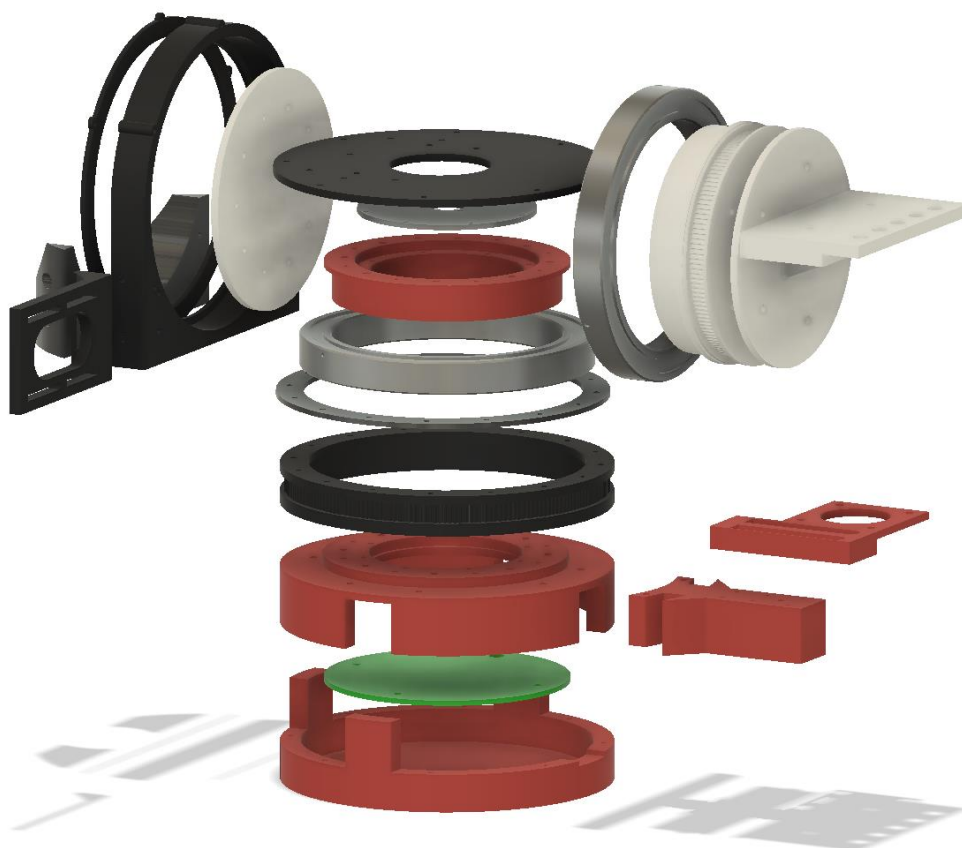


obr. 17 - výsledné uspořádání elektroniky uvnitř základny

1.4.5 parametry ramena

Převodové poměry jednotlivých os byly primárně dány velikostí větší řemenice přilehlé k dané ose – tak aby měla řemenice stejné rozměry jako zbytek osy. Řemenice motorů (primárně druhé osy) byly voleny metodou pokus omyl tak, že bylo na rameno umístěn dalekohled o hmotnosti zhruba 1 kg a bylo pozorováno, zda dojde ke přetížení motoru a ztrátě kroků či přeskočení řemenu (z hlediska toho, že těžiště upevněného objektu není ve středu rotace osy a v krajních polohách působí na motory řádově větší síla než ve středové poloze). Již první variace se ukázala jako dostatečná, byly tedy ponechány řemenice 200/20 na první ose a 140/20 na ose druhé pro výsledné převodní poměry 10:1 a 7:1. Zajímavostí je závislost mezi napnutím řemenu vs velikostí řemenice. V této kombinaci řemenic a jejich vzdálenosti došlo při testování menší řemenice zároveň ke zmenšení styčné plochy řemenu a řemenice, což ústilo v krajních případech k přeskokování řemenu a nutnost vyššího dopnutí řemenu.

Zvolené krokové motory disponují krokem o velikosti 1.8° , což by znamenalo v kombinaci s převodovými poměry rozlišení os 0.18° a 0.26° na jeden krok. Byl proto využit microstepping, který dělí kroky na menší na úkor síly motoru. Bylo zvoleno 16násobné dělení, které zvyšuje výsledné rozlišení na hodnoty 0.011° a 0.016° . V případě, že by byla síla motoru nedostatečná, lze ji zvýšit snížením microsteppingu, zvýšením proudu motorů nebo nahrazením větším motorem.



obr. 18 - rozložený pohled celé soustavy



obr. 19 - výsledná podoba ramena

2 ŘÍDÍCÍ SOFTWARE

Při volbě implementace řídicího softwaru se nabízejí 2 možnosti: tvorba vlastního software nebo využití již existujícího. Jelikož by při tvorbě vlastního řídicího software bylo využito již existujících softwarových modulů (jako knihovna pro řízení driverů...), byl by kód z většiny převzat a výslednou prací by bylo „poslepuvat“ jednotlivé části dohromady do jednoho celku. Byla tedy zvolena cesta již existujícího řídicího SW. Z hlediska výběru bylo voleno mezi open source projekty Klipper a Marlin, kde jediným zásadním rozdílem je způsob řízení – zatímco Marlin je standalone, kde se o veškeré řízení stará pouze jeden mikrokontroler, v případě Klipper jsou veškeré výpočty prováděny na výkonnějším zařízení jako raspberry pi, jejichž výsledky (pohyb os, nastavení střidy PWM) jsou následně předány řídicímu mikrokontroleru. Jako řídicí software byl tedy zvolen Marlin, který je vyvíjen primárně pro 3D tiskárny, cnc routery a lasery. Hlavní výhodou je implementace všech potřebných softwarových komponent a podpora zvoleného HW (na niž byl kladen důraz při volbě mikrokontroleru).

I přes to, že byly volené komponenty brány jako kompatibilní, vyskytl se problém při kompilaci pro mikrokontroler ESP32 ve verzi C3, který nebyl podporován starší verzí knihoven ESPTOOL, jelikož novější knihovny s podporou tohoto mikrokontroleru nejsou kompatibilní s nynější verzí Marlin. Po několikahodinové snaze o kompilaci FW byla nakonec zvolena starší verze ESP32, která byla podporována knihovnami a kompilace proběhla bezproblémově. To bohužel znamenalo nutnost vytvoření nové řídicí desky (rozměry a pinout jednotlivých vývojových PCB je rozdílný).

Původním cílem bylo využití FW Marlin s tím, že by byl rozšířen o vlastní knihovnu implementující rotační osy (s myšlenkou toho, že rotační osy ještě nejsou implementovány). K překvapení je podpora rotačních os již implementována. Zbývalo již tedy vytvořit vlastní board pinout (přidělit funkce jednotlivým IO portům) a nastavit požadované parametry (např. počet os, převodní poměry...).

2.1 ovládání ramena

Řízení ramena je řešeno přes sériové rozhraní UART, dostupné přes serial → UART převodník připojený k USB konektoru, kde byl výchozí boudrate nastaven na hodnotu 250000. Řídicí software je napsán v programovacím jazyku python, který je spuštěn na řídicím PC, komunikace mezi ramenem a PC probíhá právě přes rozhraní UART. Všechny řídicí kódy jsou dostupné na přiloženém CD. K řízení ramena jsou využity standardní příkazy firmwaru Marlin, tedy ve formátu MXXX/GXXX, následované požadovanými parametry. Např. sekvence pro inicializaci ramena a nastavení parametrů je následující:

M92 X89.8 Y63.05 – nastavení převodových poměrů X a Y os [step/°]

M204 T50 – nastavení akcelerací pohybu [°/s²]

M914 Y30 – nastavení citlivosti sensorless homingu

M203 X200 Y200 – nastavení maximální rychlosti [°/s] pohybu X a Y osy

G91 – přepnutí do módu relativní pozice

M906 X300 Y800 – nastavení maximálního proudu motory [mA]

Následně je pohyb ramena řízen příkazem **G0 Xxxx Yxxx Fxxx**, kde parametry X a Y udávají požadovanou polohu ramena a parametr F udává celkovou rychlost pohybu.

3 ZAMĚŘOVÁNÍ

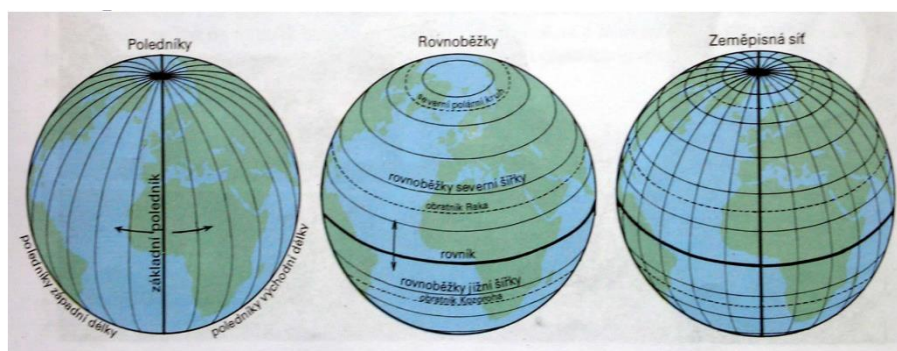
3.1 způsob zaměřování objektů

Pro zaměřování objektů se nabízí několik implementovatelných variant, a to zaměřování za pomoci známého vzhledu objektu a optického snímače s algoritmem/hlubokou neuronovou sítí schopnou rozpoznat a detekovat objekt nebo zaměřování za pomoci známé polohy objektu a ramena. První řešení má nevýhodu v nutnosti předem znát vzhled objektu, dlouhou dobu prvotního zaměření/nutností navedení ramena na přibližnou polohu objektu, kdy je nutné prvotně objekt nalézt a v celkové komplexnosti tohoto řešení, jako je nutnost zvolení správného úhlu záběru senzoru, ostření atd.

V rámci této práce bude využito známé polohy objektů a ramena z důvodu nižší komplexnosti. To řešení lze označit ze své podstaty jako robustnější, jelikož jedinými vstupními proměnnými jsou poloha ramena, poloha referenčního bodu, jež jsou konstantní, a poloha objektu.

3.1.1 výpočet hodnot pro natočení ramena

Ještě před započítáním řešení této úlohy je nutné si uvědomit, že GPS souřadnice popisují zeměpisnou délku, resp. úhel jež svírá hledaný poledník s nulovým poledníkem. To samé platí pro zeměpisnou šířku. Zajímavostí a často opomíjeným faktem (více dále) je zvyšující se rozlišení rovníků ve smyslu stupeň na jednotku délky, čím blíže jsou k jednomu z pólů.



obr. 20 - ilustrace rovníků a poledníků určujících GPS souřadnice (16)

Vezměme tedy v úvahu úlohu sledování letadla. Byť to může znít neintuitivně, jedná se o dva objekty, vyskytující se v kulových souřadnicových systémech se stejným středem. V určitých případech, kdy jsou objekty vzdáleny minimálně, lze považovat zemi za plochou a zjednodušit tím celý výpočet. Cílem je získat azimut neboli natočení první/horizontální osy a elevaci – úhel natočení druhé/vertikální osy.

3.1.2 Výpočet azimutu

Prvně byl testován výpočet s předpokladem plochosti Země. Pro výpočet byl využit vztah

$$\text{azimut} = \text{atan2}((p_{lon} - a_{lon}), (p_{lat} - a_{lat})),$$

kde p_{lon} – zeměpisná délka pozice letadla, p_{lat} – z. š. letadla, a_{lon} – z. d. ramena, p_{lat} – z. š. ramena

Tento vztah poskytuje dostatečnou přesnost pro málo vzdálené objekty, ale při testování na vzdálenějších objektech (sledování letadla vzdáleného několik desítek kilometrů) se začaly projevovat odchylky, které rostly se zvyšující se vzdáleností úhlu azimutu od světových stran. Byl proto nahrazen výpočtem, který zohledňuje zakřivení planety i trajektorie sledovaného objektu

$$\text{azimut} = \text{atan2}(\sin(p_{lat} - a_{lat}) \cdot \cos(p_{lat}) \cdot \cos(a_{lat}) \cdot \sin(p_{lat}) - \sin(a_{lat}) \cdot \cos(p_{lat}) \cdot \cos(p_{lon} - a_{lon})).$$

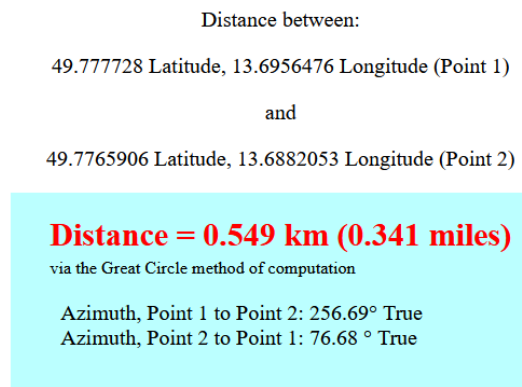
I při výpočtu azimutu touto metodou docházelo k velkým odchylkám při testování, kde úhly blízké světovým stranám nabývaly odchylek minimálních, vzdálenější úhly od světových stran nabývaly odchylek v řádu stupňů.

Tyto odchylky byly způsobeny právě změnou rozlišení, resp. snížením průměru rovnoběžek s jejich zvyšujícím se úhlem svíraným vzhledem k rovníku. Tím dochází ke snižování jejich obvodu, a ve výsledku tak na jednu jednotku délky připadá více stupňů popisujících poledníky.

Zajímavostí je, že tento jev není zohledněn v žádných testovaných online kalkulačkách či vztazích, viz. obr. 22. Pro ilustraci byly využity pozice ramena při testování a pozice radiového vysílače vzdáleného zhruba půl kilometru. Po zohlednění tohoto faktu byly odchylky eliminovány.

```
distance: 539.18 m
azimut: -76.84°
elevation: 6.77°
```

obr. 21 - správně vypočtené hodnoty zohledňující zakřivení Země



obr. 22 - online kalkulačka azimutu FCC (17)

3.1.3 výpočet elevace

Pro výpočet elevace je využit vztah

$$elevace = \sin(alt_{diff}/dist),$$

kde alt_{diff} – rozdíl výšek/vzdálenosti od středu soustavy, $dist$ – přímá vzdálenost obou objektů.

Vzdálenost $dist$ byla vypočtena převodem kulových souřadnic obou bodů do kartézských

$$x = (r_{země} + h) \cdot \sin(lat) \cdot \cos(lon),$$

$$y = (r_{země} + h) \cdot \sin(lat) \cdot \sin(lon),$$

$$z = (r_{země} + h) \cdot \cos(lat),$$

kde $r_{země}$ – poloměr Země, h – výška objektu nad Zemí, lat – zem. šířka polohy objektu, lon – zem. délka polohy objektu.

Vzdálenost je poté vypočtena jako odmocnina z kvadrátů rozdílů poloh jednotlivých os obou objektů

$$dist = \sqrt{(x_p - x_a)^2 + (y_p - y_a)^2 + (z_p - z_a)^2}.$$

3.1.4 rychlost pohybu

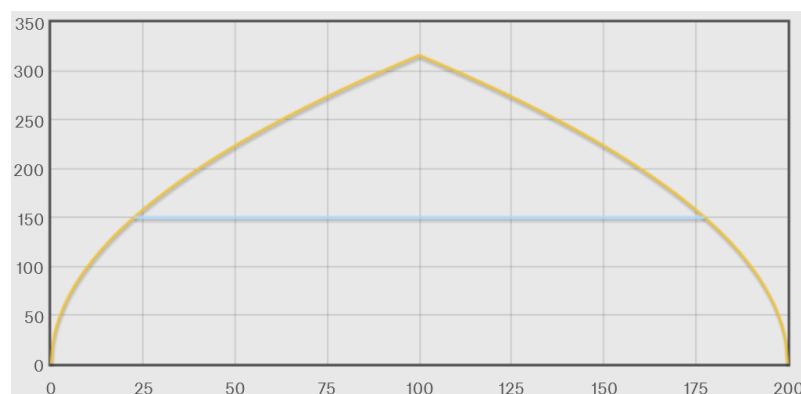
Důležitým faktorem při zaměřování pohybujících se objektů je rychlost pohybu ramena. Ta musí odpovídat rychlosti objektu tak, aby nedocházelo k jeho předbíhání či zpoždění při sledování. V tomto případě je rychlost pohybu ramena definována jako stupně/sekundu. Rychlost je tedy vypočtena vztahem

$$v = \frac{\sqrt{x_{travel}^2 + y_{travel}^2}}{t}$$

kde x_{travel} – vzdálenost pohybu ramena v x ose, y_{travel} – vzdálenost pohybu ramena v y ose

Problémem jsou však akcelerace, které jsou aplikovány při rozjezdech a zastavování ramena. Na obr. 23 je vizualizován průběh rychlosti osy, kdy při rozjezdu je aplikováno předdefinované zrychlení až po dosažení maximální rychlosti (modrá křivka). To znamená, že požadovanou rychlostí se osa pohybuje pouze zlomek času (v závislosti na velikosti zrychlení a požadované rychlosti). Výsledkem je delší doba pohybu než požadovaná a zpoždění vůči předpokládané poloze. Jelikož jsou příkazy ve firmwaru Marlin vykonávány sekvenčně, může docházet ke sčítání zpoždění. Pokud však za sebou následují pohyby ve stejném směru a rychlosti, nejsou akcelerace aplikovány a rameno pokračuje v nepřerušovaném pohybu. To je případ této úlohy. Rameno vykoná pouze jeden akcelerovaný pohyb, a to při rozjezdu, následně setrvává v konstantním pohybu, který je v případě zaměřování letadel tak pomalý, že čas strávený akcelerací je téměř nulový.

Pro případ, že by přesto došlo ke zpoždění, je příkazem **M114 R** čtena reálná poloha ramena, která je porovnána s požadovanou, kdy jako limitní hodnota rozdílu bylo zvoleno 0.01 °. Pokud tedy dojde ke zpoždění a překročení této hodnoty, je rychlost následujícího pohybu zvýšena o 5 % což se při testování ukázalo jako dostatečná hodnota pro eliminaci zpoždění, ale zároveň dostatečně nízká hodnota na to, aby nedocházelo ke zbytečnému předbíhání sledovaného objektu.



obr. 23 - reprezentace rychlosti pohybu ramena v závislosti na maximální akceleraci (18)

3.2 inicializace a kalibrace ramena

3.2.1 kalibrace pohybu

Prvotním vstupem pro kalibraci ramena byly parametry jako microstepping, počet kroků na jedno otočení motoru a převodní poměry jednotlivých os. Výsledkem byly hodnoty 88.889 step/deg a 62.222 step/deg pro X a Y osu. Při testování však bylo naraženo na odchylky při

rotacích os o 360°. Pro kalibraci tedy byly jednotlivé osy otočeny přesně desetkrát okolo své osy, čímž se znásobily velikosti chyb a iterační metodou, kdy při přesazení požadované rotace byl převodní poměr snížen a naopak, byly nalezeny reálné hodnoty převodových poměrů. Byly zjištěny hodnoty 89.8 step/deg a 63.05 step/deg pro X a Y osu. Jedná se o odchylky 1 a 1,3 % od vypočtených hodnot.

3.2.2 kalibrace ramena vůči okolí

Prvně před započítím zaměřování je nutné kalibrovat natočení ramena vůči okolnímu světu. Prvotní ideou bylo využití GPS přijímače, se kterým by byla prvně zaměřena poloha a nadmořská výška ramena, následně by byla zaměřena poloha vzdáleného bodu. Od tohoto bylo částečně upuštěno kvůli nutnosti implementace přenosového kanálu mezi ramenem a GPS přijímačem. Náhradou je zaměřování poloh mobilním telefonem s GPS nebo za pomoci map. Z těchto poloh je vypočten azimut a elevace mezi polohou ramena a kalibračním bodem.

Dalším krokem je zaměření kalibračního bodu samotným ramenem/snímácím zařízením. Toho je dosaženo manuálně vstupem z řídicího PC za pomoci kláves WASD, kdy malá písmena znamenají pootočení ramena o 0.1° a velká písmena o 1°. V tomto kroku je rameno přepnuto do relativního režimu polohy. Po zaměření a potvrzení klávesou enter je rameno přepnuto do absolutního režimu polohy a absolutní poloha ramena je nastavena na hodnoty azimutu a elevace vypočtené v předchozím kroku.

Hodnoty azimutu a elevace pro inicializační bod a pro následné zaměřování jsou vypočteny identickým kódem, čímž je eliminována nutnost přepočtu souřadnic vzhledem ke světovým stranám (azimut se obvykle uváděn od severu po směru hodinových ručiček, ve řídicím kódu odpovídá azimut východu, resp. vychází z počátků goniometrických funkcí a má chod proti směru hodinových ručiček).

3.2.3 zaměřovací soustava

Pro zaměřování objektů je využita optická soustava AURIOL Spektiv (5), která nabízí variabilní přiblížení v rozmezí 20x60 – 60x60. Tato soustava byla zvolena díky nízké ceně, upevňujícímu zařízení na mobilní telefon v balení a standardnímu způsobu upevnění známého primárně z fotoaparátů – šroubem se ¼ závitem. Jako zaznamenávací zařízení byl využit mobilní telefon LG V30.

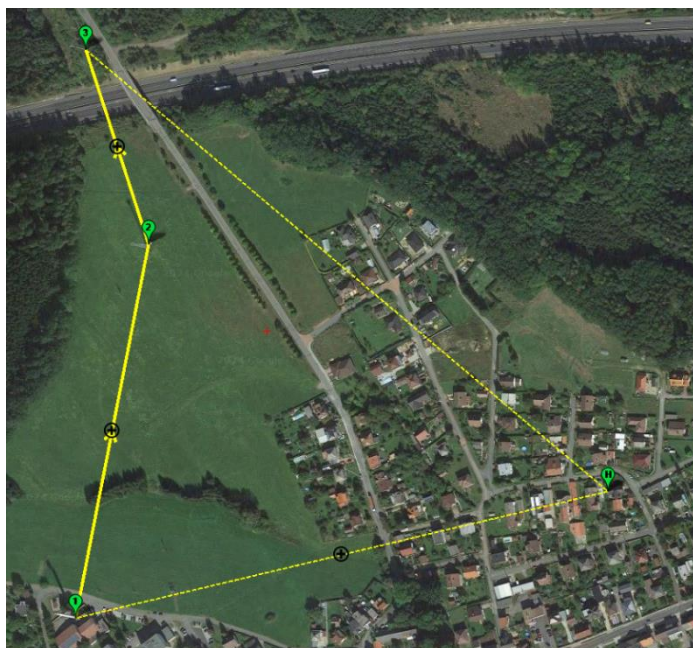


obr. 24 - objektiv AURIOL

3.2.4 zaměřování statických objektů

Prvním krokem je určení vhodného kalibračního bodu. Aby byl minimalizován vliv nepřesnosti určení polohy kalibračního bodu, je nutné, aby byl dostatečně vzdálen od ramena.

Pro testování zaměřování statických objektů bylo využito domácího okolního prostředí – z pokoje rodinného domu byl zaměřován vrchol teplárenského komínu, který sloužil jako kalibrační bod a dva vysílače, jež sloužily jako zaměřované statické body, viz obr. 25, kde bod H reprezentuje polohu ramena, bod 1 kalibrační objekt a body 2 a 3 zaměřované body.

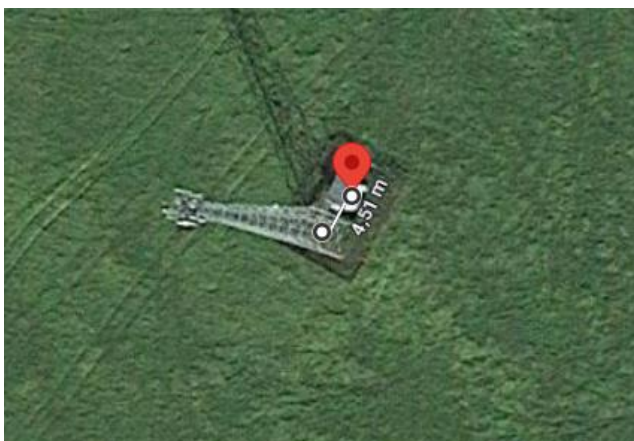


obr. 25 - zaměřované statické objekty

Poloha a nadmořská výška jednotlivých bodů byla získána z mapových podkladů (konkrétně z nástroje mission planner), následně byla ověřena zaměřením pomocí mobilního telefonu s GPS. Problémem však byl fakt, že byly zaměřovány vrcholy jednotlivých objektů, tzn. bylo nutné znát i jejich výšku. Výška kalibračního bodu byla nejprve odhadnuta podle počtu segmentů a jejich výšky na zhruba 45 m, následně byla v internetové databázi komínů nalezena udávaná výška 50 m (6). U zaměřovaných objektů nebyla nalezena jejich přesná výška, byla tedy odhadnuta opět podle počtu segmentů a jejich výšky na 30 a 20 m.

Při prvním testování a po odstranění problému se špatným výpočtem azimutu (viz. výše) se projevil problém se špatným zaměřováním požadovaných objektů. To bylo zapříčiněno jednak nepřesným určením výšky objektů, ale i jejich polohy. Byť se může zdát, že při těchto vzdálenostech (500–700 m mezi ramenem a objektem) budou odchylky minimální, opak je pravdou. Zaměření objektů za pomoci map s leteckými mapovými podklady poskytovalo pouze přibližnou polohu s přesností v řádu metrů, kdy nebyl objekt při 20x přiblížení na středu obrazu, v horším případě nebyl zaměřen vůbec. Proto bylo zaměření provedeno za pomoci mobilního telefonu s GPS. Rozdíl v přesnosti je viditelný na obr. 26, kdy je rozdíl mezi mapovými podklady a reálnou polohou zhruba 5 m.

Zajímavostí je teoretická možnost využití ramena k měření výšky objektů. Pokud by byla známa poloha, resp. vzdálenost objektu od ramena, bylo by možné manuálním zaměřením spodní a horní části určit rozdíl elevací a následně vypočítat výšku objektu.

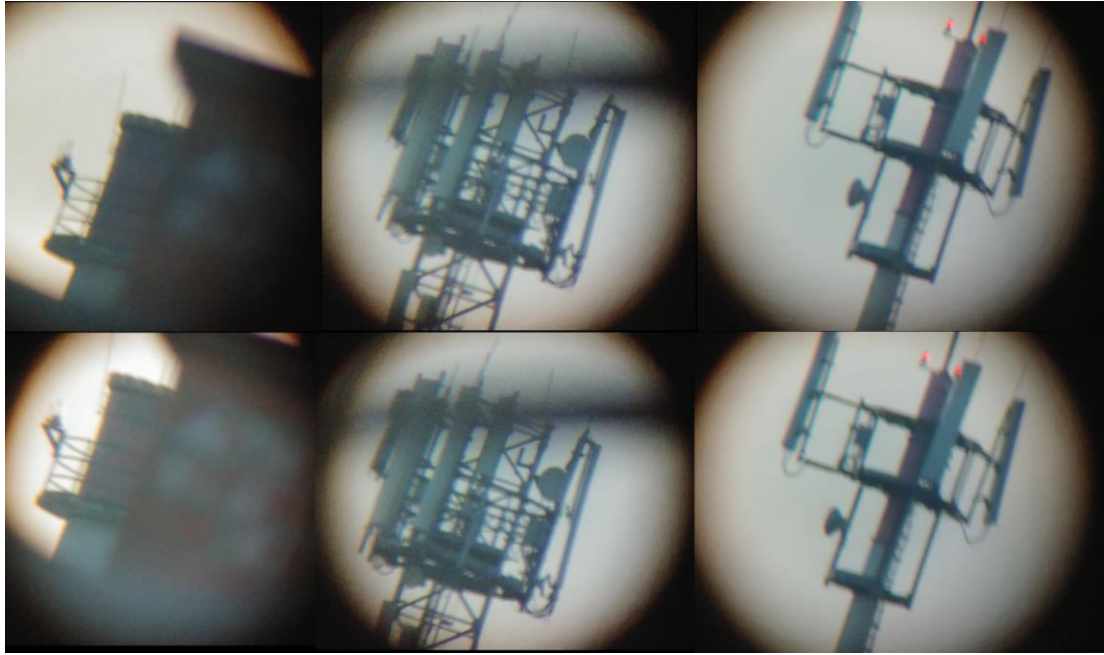


obr. 26 - přesnost zaměřování polohy objektů podle map vs GPS

3.2.5 opakovatelnost zaměření

Důležitým faktorem při zaměřování je nejen přesnost jednoho zaměření, ale i konstantnost v čase. Byl proto proveden experiment, kdy byly sekvenčně zaměřovány objekty uvedené výše. Toto měření bylo provedeno celkem 10x, kdy celou dobu bylo spuštěno nahrávání zaznamenávacího zařízení. Z videa byly následně vytvořeny snímky, kde hlavním důvodem k tomuto přístupu byla eliminace vnášení sil a vibrací do celého systému při stisku spouště pro pořízení snímku.

Na obr. 27 je porovnání první a poslední zaměřovací sekvence. Všechny snímky jsou při 60x přiblížení. Porovnáním druhého a třetího objektu je jsou viditelné lehké posuny, kde u druhého se jedná o posun ramena lehce doprava, u třetího lehce nahoru. U prvního objektu bylo dosaženo značně nižší přesnosti, kdy je obraz posunut částečně doprava (zaměřovaným objektem je komín vlevo). To může být způsobeno tím, že první objekt slouží též jako referenční bod, a v době pořízení tohoto snímku bylo rameno po manuálním zaměření. Vyšší akcelerace a rychlosti pohybu ramena při manuálním pohybu mohli vnést do konstrukce ramena a celé soustavy vyšší síly a vibrace, které mohou být např. spolu s nedostatečně dotaženými spojovacími šrouby zdrojem těchto odchylek. Dalším pravděpodobnějším zdrojem je optická stabilizace zaznamenávacího zařízení. Právě rychlé a krátké pohyby s vysokými akceleracemi (pro usnadnění zaměření jsou maximální akcelerace a rychlosti zvýšeny) při zaměřování jsou prakticky dokonale kompenzovány stabilizací obrazu, kdy je viditelné, že při pohybu o desetiny stupně nedochází okamžitě ke změně obrazu, který se až se zpožděním posune na zamýšlené místo. To je viditelné u prvního objektu, kdy kruhové oříznutí okolo obrazu je u prvního a posledního snímání posunuto.



obr. 27 - test opakovatelnosti zaměření

3.2.6 sledování pohybujících se objektů

Jako pohybující se objekty byla zvolena letadla. Jejich výhodou je ADB-S Broadcasting, který slouží primárně pro oznamování jejich poloh, sloužících k eliminaci vzájemných kolizí. V tomto případě bude využit pro jejich sledování.

3.2.7 zjištění polohy letadla

Pro zjištění polohy letadla k využití v této práci existuje několik způsobů:

1. Vlastní ADB-S přijímač/SDR
2. Veřejně dostupné sledovací služby (adbsexchange.com, flightradar24.com...)

První varianta nabízí možnost provozování sledování letadel bez přístupu k internetu. Naopak je omezena oblast, na kterou lze letadla sledovat citlivostí přijímače a velikostí/typem antény. Druhá varianta nabízí možnost sledování polohy letadla i na druhé straně planety. To je možné díky dobrovolníkům, kteří si v jejich lokalitě nainstalují přijímací modul podobný první variantě, avšak získaná data o letadlech jsou odesílána provozovatelům služby. Nevýhodou může být zpoždění propagace dat službou.

Pro sledování byla zvolena druhá varianta díky nižší náročnosti na implementaci a vyšší robustnosti řešení z hlediska spolehlivosti příjmu dat. Pro přenos dat z webové služby byl využit open source balíček `py-flightradar24` (7). Ten i přes své nevýhody (návrátové hodnoty výšky a rychlosti ve stopách a mílích za hodinu, neperiodicky zasílaná data o poloze letadla, nemožnost sledování civilních letadel) poskytuje relativně spolehlivý způsob získání potřebných dat.

3.2.8 predikce polohy letadla – aproximace z minulých poloh

Byť jsou součástí ADB-S vysílání poloha startovního a cílového letiště, není nijak definována přesná trasa, kterou letadlo poletí. `Py-flightradar24` poskytuje list předchozích poloh, nikoliv však budoucí polohu, je ji tedy nutné aproximovat.

Prvotní úvahou byla prostá lineární aproximace z posledních dvou známých poloh a periody času mezi jejich příjmem. Tato metoda se jeví jako dostačující s ohledem na to, že většina dopravních letadel vykonává většinu letu přímočarý let. Bohužel periodicitu příjmu

jednotlivých poloh se pohybovala v rozmezí 15–40 s. Tím byla jednak zavrhnuta možnost aproximace trajektorie polynomy vyšších řádů (letadlo je schopné provést manévr v rámci několika desítek sekund, tedy čase nižším, než je jedna perioda příjmu dat), ale navíc při testování docházelo k předbíhání/zpoždování sledování vůči letadlu v závislosti na časovém rozdílu předchozích poloh.

I přes to se povedlo touto metodou při 20x přiblížení částečně sledovat trajektorii letadla, viz. obr. 28. Je však viditelné, že v čase mezi jednotlivými příjmy dat o poloze docházelo ke zpoždování sledování vůči poloze letadla a tím změně jeho polohy v rámci objektivu.



obr. 28 - sledování letadla – základní aproximace polohy (20x přiblížení)

3.2.9 predikce polohy letadla – poloha + azimut + rychlost

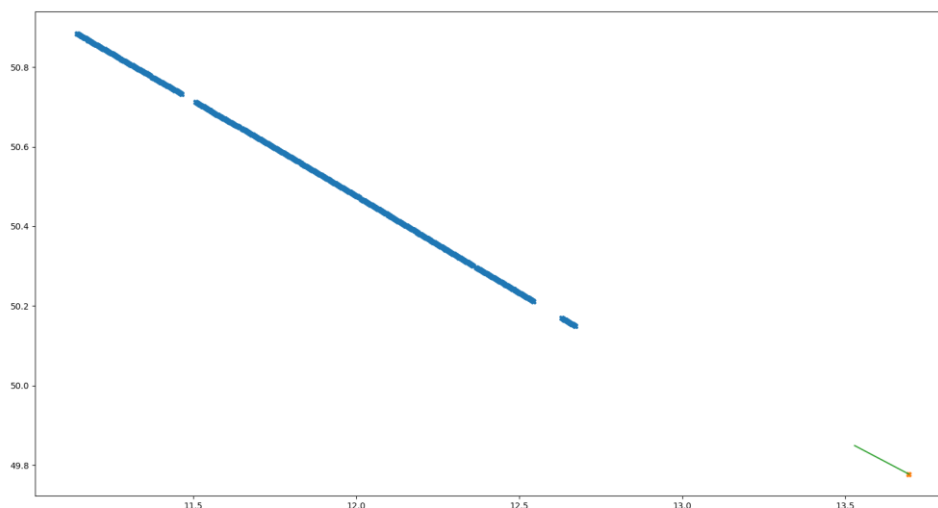
Další alternativou, jak odhadnout budoucí polohu letadla, je za pomoci poslední známé polohy, azimutu a rychlosti. Všechny tyto informace jsou obsaženy též v ADB-S přenosu. Výhodou tohoto řešení je nezávislost na periodicitě dat (samozřejmě za předpokladu, že rychlost a trajektorie letadla jsou konstantní). Další změnou oproti předchozímu řešení je rozdělení trajektorie na 1s segmenty. To znamená, že každou vteřinu je vypočtena budoucí pozice letadla na základě aktuální pozice, rychlosti a azimutu. To má následující výhody: nezávislost na periodicitě dat a ošetření specifických situací.

Pokud např. letadlo přelétalo nad ramenem nebo v blízkosti ramena a počáteční a koncová pozice pohybu byly před a za ramenem, došlo k dosažení následující pozice po co nejkratší možné trajektorii pro rameno a trajektorie ramena tak neodpovídala trajektorii letadla. Rozdělením tohoto pohybu (průměrně 30 s) na menší, 1 s trvající pohyby je tento neduh eliminován. I přes to však občasně docházelo k rozdílům mezi nově obdrženou polohou letadla a aproximovanou. Rozdíl však byl vždy ve směru trajektorie letadla, což můžou způsobovat dva faktory – změna rychlosti letadla nebo časové zpoždování ať už na straně webové služby flightradar24 nebo řídicím SW. Další přijatá poloha však často reprezentovala již správnou polohu letadla, je tedy s pravděpodobné, že k chybě docházelo buď u samotné webové služby flightradar24 nebo v knihovně py-flightradar24. Rozdíl je viditelný na obr. 29, kde první a druhý snímek jsou pořízeny při aproximaci polohy ze stejné hodnoty polohy, třetí snímek je po příjmu nových dat. Rozdíl je též viditelný na obr. 30, kde modré body reprezentují

aproximované polohy při sledování a jejich přerušení značí rozdíl poslední aproximované a nově přijaté hodnoty.



obr. 29 - sledování letadla – aproximace polohy z rychlosti a směru letadla (60x přiblížení)



obr. 30 - vizualizace sledování letadla – oranžový bod – rameno, modré body – aproximované polohy letadla

3.2.10 sledování ostatních objektů

Při sledování ostatních objektů je opět nejzásadnějším faktorem spolehlivost přenosu a přesnost zaměření. Hlavním problémem bylo zajištění spolehlivého přenosu na vyšší (>50 m) vzdálenosti. Standardní systémy jako wifi a bluetooth jsou sice jednoduché na implementaci, jejich dosah je však v řádu desítek metrů. Přenos přes internetové, resp. mobilní LTE připojení nabízí teoreticky neomezené připojení (v rámci pokrytí sítě), jeho implementace je však náročnější a dražší.

Jako nejjednodušší řešení se jeví využití telemetrické soupravy. Celý systém byl tedy sestaven z HLGRC M10 GPS modulu (8), letového počítače speedybee F405 wing (9) se systémem ardupilot (10), přijímačem FRSKY SX8, vysílačem FRSKY HORUS 10X se systémem ETHOS. Jedná se o soustavu používanou pro hobby RC létání, která poskytuje dosah až 1 km. Všechna potřebná data jsou agregována systémem ardupilot a posílána telemetrickým kanálem S.PORT do vysílače. Přijátá data jsou zpracována LUA skriptem, jež byl vytvořen úpravou yaapu telemetrického skriptu (11). Ten namísto výpisu hodnot na obrazovku přijímače odesílá data přes UART do počítače.



obr. 31 - přenosová soustava, zleva: GPS modul, letový počítač, přijímač, vysílač

Prvním neduhem této soustavy je rychlost frekvence obnovy dat o poloze, která má frekvenci 2 Hz oproti 10 Hz jíž disponuje samotný GPS přijímač. Tím je, byť v minimální míře, omezena schopnost sledování objektů s dynamickým pohybem. Dalším problémem je rozlišení samotných GPS souřadnic. Každá souřadnice má v přenosovém kanále vyhrazenou velikost 32 bitů a je navíc přenášena jako celočíselné číslo, na něž jsou souřadnice převedeny před odesláním přes telemetrický port, což ve výsledku znamená přesnost ± 2 m. Největším úskalím tohoto řešení je však nízké rozlišení výšky. Telemetrickým kanálem je přenášeno několik druhů výšek: GPS – metry nad hladinou moře, výška relativní k startovacímu bodu a výška relativní k terénu (vychází z topografické mapy nahrané na letovém počítači). GPS výška poskytuje tristně malé rozlišení – ± 10 m. To je prakticky nepoužitelné i pro velmi vzdálené objekty. Relativní výška ke startovacímu bodu je měřena barometrickým senzorem, který sleduje okolní tlak a podle něj dopočítává výšku. Nejedná se však o výšku nad úrovní moře, ale rozdíl výšky objektu od místa vzletu, resp. „ARMu“ letadla (ochrana pilota, letadla a okolí, kdy pilot musí splnit několik podmínek jako dostatečný počet satelitů, aby mu byl „odjištěn“ motor a umožněn vzlet). Výška relativní k terénu je měřena též barometrickým senzorem, ale je dopočítávána k výšce terénu, nad kterým se objekt pohybuje. Bohužel však nebylo možné získat ani jednu z těchto posledních dvou jmenovaných hodnot, obě vracely neměnnou 0 i po „ARMu“.

Testování tedy probíhalo se zafixovanou Y osou na rovném otevřeném terénu, kdy bylo dosaženo obstojné přesnosti. Zásadním problémem však byla přesnost GPS a přenosu souřadnic, kdy i při statické pozici pozorovaného objektu docházelo k ubíhání polohy a při pohybu v blízkosti ramena docházelo k velkým a prudkým pohybům v důsledku nízkého rozlišení polohových hodnot. V extrémním případě docházelo při stání v blízkosti ramena k „přeskočení“ polohy na druhou stranu ramena a jeho následné rotaci o 180° , i když měl GPS přijímač konstantní polohu.

ZÁVĚR

Prvním cílem této práce byl návrh sestavy dvouosého ramena. Již při návrhu byly voleny komponenty tak, aby bylo rameno schopné pracovat s vyšší zátěží, resp. velkými optickými zařízeními. Jako materiál a postup výroby byly zvoleny PLA a 3D tisk, kdy se tento postup jevil jako nejvýhodnější z hlediska poměru ceny, rychlosti a kvality vůči ostatním možnostem. Při testování byl nahrazen držák více zatěžovaného Y motoru dílem z ABS, jelikož docházelo k měknutí a částečné deformaci držáku. Pro pohon byly zvoleny krokové motory, jako převodové ústrojí pro zvýšení přesnosti byl zvolen řemenový převod.

Druhá část se zabývala návrhem řídicího hardware a software. Jako řídicí mikroprocesor byl zvolen modul ESP32 DEVKIT, pro řízení byly využity drivery TMC2130 a rameno je možné napájet napětím v rozsahu 6 - 35 V. Pro řízení pohybu byl zvolen opensource projekt Marlin.

Následně byl pro kalibraci ramena navrhnut systém pro inicializaci natočení ramena vůči okolí za pomoci známé polohy volitelného kalibračního bodu a polohy ramena.

Finální částí je testování zaměřování. Nejprve byly zaměřovány statické objekty, kde byla jednak testována schopnost zaměření, ale i opakovatelnost zaměření. Následně byly zaměřovány pohybující se objekty, v tomto případě dopravní letadla. Jejich poloha pro zaměření byla získána z webové služby flightradar24.com za pomoci nástroje py-flightradar24. Poslední testovanou aplikací bylo zaměřování blízkých objektů. Pro získání jejich poloh bylo využito soupravy pro modelářské létání, kdy byla telemetrickým přenosem přenášena data o poloze objektu do řídicího SW.

Návrh ramena, byť se zdál z počátku jako nejtěžší a nejnáchylnější na špatné volby při návrhu, se ve výsledku projevil jako nejjednodušší část. Velkou roli sehrálo celkové rozvržení si přibližné podoby ramena, volba použitých komponent a jejich integrace. Již před započítáním veškerých prací byly téměř jistě zvoleny komponenty. Např. uložení ložisek bylo využito též jako řemenice pro pohon osy, snižující množství potřebného materiálu pro tisk a zvyšující celkovou tuhost soustavy. Paradoxně, objektiv pro sledování objektů byl volen až po celkovém sestavení a testování ramena, kdy se mohly projevit nedostatky v návrhu a znamenat celkový redesign. Rameno však bylo navrženo dostatečně robustní a jediným prvkem, který bylo nutné změnit, bylo změna materiálu uložení motoru Y osy za ABS.

Hardware pro řízení byl volen záměrně jako modulární pro případ, že by došlo k poškození jednotlivých komponent či chybě v zapojení. Tím byl zároveň zjednodušen návrh PCB, kdy podpůrné součástky a obvody jako stepdown měniče z 5 V na 3.3 V byly již integrovány v jednotlivých modulech. Hlavním přínosem však byla eliminace nutnosti montáže SMD součástek, kdy by jejich volba, objednání a následná montáž nenabízela kromě těsné integrace komponent žádnou výhodu.

Jako jeden z největších problémů se projevila kompatibilita Marlin s novějšími vývojovými deskami ESP32. Původně byla zvolena vývojová deska na bázi mikroprocesoru ESP32 C3, jedná se však novější čip, který není podporován verzemi knihoven využitých v Marlin. Byla tedy zvolena jedna z prvotních verzí ESP32, která spolu s odlišným pinout znamenala nutnost redesignu PCB. Za zmínku též stojí thermal management řídicí desky. Hlavními zdroji tepla jsou drivery motorů, primárně Y osy. Prvotní testování probíhalo bez chladičů, viz. obr. 17, které se nakonec projevilo jako dostatečné. V případě, že by docházelo k přehřívání, drivery by automaticky snížily proud tekoucí motory tak, aby nedošlo k jejich poškození.

Následně byl testován základní pohyb. Při tom byl nalezen problém, kdy pohyb os neodpovídal požadovaným hodnotám. Příčinou byl rozdíl vypočtených a reálných převodních poměrů o 1 a 1.3 %. Iterační metodou byly nalezeny reálné hodnoty.

Dále byl napsán algoritmus pro převod dvou souřadnicových poloh na azimut a elevaci. Funkce, která byt' je popsána zhruba 20 řádky kódu, zabrala několik dní. Hlavním problémem bylo zvyšující se přesnost rovnoběžníků se zvyšující se zeměpisnou šířkou. Výchozím bodem při programování a testování byly online kalkulačky přepočtu souřadnic na azimut a elevaci, které však nebrali v potaz zvyšující se přesnost. Nepříznivým faktorem bylo též to, že odchylky od správných hodnot byly v řádu stupňů. Jako hlavní viník tedy byl nejprve prověřován pohon a jeho přesnost. Až porovnání vzdušné vzdálenosti dvou objektů v mapách a v kódu odhalilo nesrovnalosti a následné odhalení původce problému.

Zaměřování statických objektů probíhalo téměř bez problému, zároveň byla otestována opakovatelnost ramena. Po 10x provedení identické sekvence byly odchylky minimální a náhodného charakteru, čímž se potvrdila správná funkčnost ramena. Lehkou nectností byla míra oscilací při zastavení ramena, ta však byla z s největší pravděpodobností způsobena z většiny nestabilitou stolu, na kterém bylo rameno umístěno. Zajímavým faktem je též to, že i sebemenší vibrace (klepnutí do stolu, ale i hlasité auto či vrtání do zdi) se promítly do obrazu.

Dále byla zaměřována dopravní letadla, což bylo osobním cílem této práce. K tomu bylo využito služby flightradar24, která se zpětně (resp. knihovna py-flightradar24) jeví jako špatná volba. I když probíhala obnova dat na webu zhruba jednou za 10 s, v rámci knihovny byla jedna aktualizace v rozmezí 30–40 s. I s touto frekvencí by bylo možné pracovat, ve snaze o eliminaci závislosti na periodicitě dat byl namísto aproximace další polohy z předchozích pozic využít azimut a rychlost letadla. Tato metoda eliminovala i další problémy, avšak hlavní problém – nepřesné hodnoty poloh letadla neeliminovala. I přes konstantní rychlost a směr letu (alespoň podle dostupných dat) docházelo občasně k „poskočení“ polohy letadla o několik set metrů dopředu a v následující aktualizaci dat zpět.

Nakonec bylo testováno sledování ostatních objektů. V návrhu bylo využití různých způsobů přenosu polohy objektu, ale jako nejjednodušší a nejspolehlivější řešení se jevílo telemetrické rádio, které již přijímalo data z letového počítače o poloze letadla. Jediným úkolem tedy bylo přenést data do PC, resp. řídicího SW. K získání dat byl upraven LUA skript yappu telemetry, který slouží právě k zobrazení telemetrických dat na obrazovce vysílače. Přenos dat z rádia do PC probíhal s využitím debugovacího UART kanálu systému ETHOS. Získaná data však dosahovaly nízké přesnosti (jak z hlediska absolutní přesnosti, tak z hlediska numerického rozlišení), zaměřování na nízké vzdálenosti tak vykazovalo nízkou přesnost; zaměřování na vyšší vzdálenosti (>100 m) bylo v rámci azimutu přesné, elevace dosahovala tristní přesnosti kvůli nízkému rozlišení hodnot nadmořské výšky objektu.

Osobně hodnotím fyzické zpracování z hlediska funkčnosti jako téměř dokonalé, pro sledování nebyly zvoleny nejvhodnější způsoby získání poloh sledovaných objektů, i přes to bylo dosaženo obstojných výsledků.

BIBLIOGRAFIE

1. Atmel. 8-bit AVR Microcontroller. [Online] 1 2015. [Citace: 22. 4 2024.] https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf.
2. aliexpress. slipping . [Online] [Citace: 22. 4 2024.] https://www.aliexpress.com/item/32855626307.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.128.95561802Jrxfla.
3. hamkers. thingiverse.com. [Online] 26. 1 2019. [Citace: 22. 4 2024.] <https://www.thingiverse.com/thing:3383394>.
4. all3dp. all3dp. [Online] 2024. <https://all3dp.com/2/klipper-sensorless-homing-simply-explained/>.
5. Spektiv se zoomem 20–60x60 . [Online] [Citace: 15. 4 2024.] <https://www.lidl.cz/p/auriol-spektiv-se-zoomem-20-60x60/p100368519>.
6. KODA. komínová databáze. [Online] KODA, 12. 2 2009. [Citace: 4. 4 2024.] <http://koda.kominari.cz/?action=karta&cislo=0503>.
7. bagirov, alex. py-flightradar24. [Online] 16. 4 2016. [Citace: 11. 4 2024.] <https://github.com/alexbagirov/py-flightradar24>.
8. aliexpress. HGLRC M100-5883 M10 GPS Module. [Online] [Citace: 13. 4 2024.] https://www.aliexpress.com/item/1005005849660173.html?spm=a2g0o.order_detail.order_detail_item.3.3a49f19ccsZplw.
9. —. SpeedyBee F405 WING APP Fixed Wing Flight Controller. [Online] [Citace: 13. 4 2024.] https://www.aliexpress.com/item/1005005426343416.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.5.432c1802q1AFMD.
10. source, open. ardupilot. [Online] [Citace: 13. 4 2024.] <https://ardupilot.org/>.
11. Apostoli, Alessandro. github. [Online] [Citace: 13. 4 2024.] <https://github.com/yaapu/FrskyTelemetryScript/tree/master>.
12. <https://www.liqcreate.com/supportarticles/properties-fdm-sls-resin/>.
13. <https://learn.watterott.com/silentstepstick/comparison/>.
14. <https://www.aliexpress.com/i/4001114066214.html>.
15. laskakit. *laskakit*. [Online] [Citace: 16. 1 2024.] <https://www.laskakit.cz/krokovy-motor-nema-17-17hs4023-0-14nm/>.
16. doc. RNDr. Svatopluk Novák, CSc. *orientace na zemi*. [https://is.muni.cz/el/ped/podzim2007/ZS1BP_IVZ1/um/05.Orientace_na_Zemi.pdf] místo neznámé : MUNI, 2009.
17. FCC a Bickel, Dale. *Distance and Azimuths Between Two Sets of Coordinates* | *Federal Communications Commission*. Washington DC : Federal Communications Commission, 2024.
18. a.s., prusa research. RepRap Calculator. [Online] Prusa research a.s. [Citace: 22. 4 2024.] https://blog.prusa3d.com/calculator_3416/.