

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

**Obor č. 09 STROJÍRENSTVÍ, HUTNICTVÍ DOPRAVA
A PRŮMYSLOVÝ DESIGN**

Návrh ekvatoriální montáže pro astrofotografii

Ondřej Gejdoš
Kraj : Moravskoslezský

Ostrava 2023

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 09 STROJÍRENSTVÍ, HUTNICTVÍ DOPRAVA
A PRŮMYSLOVÝ DESIGN

Návrh ekvatoriální montáže pro astrofotografii

Design of equatorial mount for astrophotography

Autoři: Ondřej Gejdoš

Škola: Střední průmyslová škola chemická akad. Heyrovského,
Ostrava, Středoškolská 1, 700 30 Ostrava-Zábřeh

Kraj: Moravskoslezský

Konzultant: Mgr. Renata Milerová

Ostrava 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval/a samostatně a použil/a jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Ostravě dne 31.3.2023

Ondřej Gejdoš

Poděkování

Chtěl bych poděkovat škole za podporu a zakoupení materiálu na vývoj. Mgr. Renatě Milerové za vedení práce. Rodičům, kteří mě podpořili v mém projektu. Konradovi Cermannovi za pomoc s testováním a návrhu uchycení pro polární hledáček. Jugalovi Jesingovi za návrh plošného spoje. Mgr. Martinu Viláškoví za konzultace a umožnění prezentace montáže na Planetáriu Ostrava. A všem lidem, kteří si montáž dle mého návrhu postavili, otestovali a poskytli mi užitečnou zpětnou vazbu.

Anotace

Tato práce se zabývá návrhem, tiskem a ověřením funkčnosti ekvatoriální montáže využitelné pro astrofotografii, kterou je možno vytisknout na 3D tiskárně. Poslední prototyp montáže dosahuje kvalit, které amatérský fotograf noční oblohy jistě ocení, a je cenově dostupnější než montáže obdobnými parametry dostupné na trhu. V práci jsou popsána úskalí jednotlivých prototypů, které autor navrhl, vytiskl a vyzkoušel. Autor veřejně sdílel svůj návod na výrobu montáž. Projevený zájem svědčí o tom, že po dostupné montáži je poptávka. Navržená tištěná ekvatoriální montáž je plně funkční. Je vhodná pro amatérské astronomy i pro zájmové kroužky.

Klíčová slova

Ekvatoriální montáž; 3D tisk; Astrofotografie

Annotation

This work deals with the design, printing, and verification of the functionality of an equatorial mount suitable for astrophotography, which can be 3D printed. The latest prototype of the mount achieves quality that amateur night sky photographers will certainly appreciate and is more affordable than mounts with similar parameters available on the market. The work describes the challenges of each prototype that the author designed, printed, and tested. The author publicly shared their guide on how to make the mount. The expressed interest indicates that there is demand for an affordable mount. The proposed printed equatorial mount is fully functional and suitable for amateur astronomers and hobby groups.

Keywords

Equatorial mount; 3D printing; Astrophotography

Obsah

1	Úvod	7
2	Teoretická část	7
2.1	Co je astrofotografie	7
2.2	Vybavení pro astrofotografii	7
2.2.1	Kamera.....	7
2.2.2	Dalekohled.....	8
2.3	Astronomické montáže	9
2.3.1	Ekvatoriální montáže	9
2.3.2	Azimutální montáže.....	10
2.4	Hlavní faktory při návrhu montáže	10
2.5	Výběr převodu montáže	11
2.6	Šnekový převod	12
2.7	Řemenový převod.....	12
2.8	Ostatní typy převodů	13
2.9	Výběr pohonu montáže	13
3	Praktická část.....	15
3.1	První prototyp.....	15
3.1.1	Návrh polární osy	15
3.1.2	Návrh polárního klínku.....	16
3.1.3	Shrnutí	17
3.2	Druhý prototyp	17
3.2.1	Návrh polárního klínu.....	17
3.2.2	Návrh řemenové převodovky	18
3.2.3	Výhody a nevýhody druhého prototypu ve srovnání s prvním prototypem.....	19
3.3	Třetí prototyp.....	20
3.3.1	Elektronika.....	20
3.3.2	Výpočet rychlosti otáčení.	21
3.3.3	Testování	22
3.3.4	Shrnutí	23
3.4	Prototyp 3.5	23
3.4.1	Nevýhody a výhody.....	23

3.5	Čtvrtý prototyp	24
3.5.1	Výhody oproti prototypu 3.5	24
3.5.2	Nevýhody.....	25
3.6	Pátý prototyp	25
3.6.1	Výhody	26
3.6.2	Nevýhody.....	26
3.7	Test periodické chyby a testování montáže.....	26
3.8	Využití montáže	28
3.9	Náklady na výrobu	28
3.10	Zveřejnění návrhu a postupu výroby montáže.....	29
3.11	Postavené montáže a montáže ve výstavbě	31
3.12	Budoucnost.....	31
4	Závěr.....	33
	Slovník pojmů a zkratk	34
5	Použitá literatura.....	35
6	Seznam obrázků, tabulek a příloh	36
7	Přílohy	38

1 ÚVOD

Cílem této práce bylo navrhnout a vyrobit cenově dostupnou ekvatoriální montáž s využitím 3D tisku a výrobek srovnat s produkty dostupnými na trhu. Autor práce se zabývá astrofotografií a 3D tiskem delší dobu a v minulosti jednu montáž postavil a využil ji k astrofotografii. Tato první montáž byla autorským nápadem jiného řešitele a sloužila k získání zkušeností se stavbou 3D tištěných montáží, vyhledání slabých míst a hlubšímu poznání principu fungování montáže. Vlastní autorská práce spočívá v návrhu levnější, menší, přenosné a přitom přesné montáže.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Co je astrofotografie

Astrofotografie se zabývá fotografováním astronomických objektů. Hlavním úskalím je případný nedostatečný kontrast mezi snímaným objektem a okolím, což znamená nalézt pozorovací místo s nízkým světelným znečištěním. A hlavně nasnímat objekt tak, abychom jej udrželi v zorném poli a dosáhli dostatečně dlouhého expozičního času, aniž by došlo k rozmazání obrazu.

Většina montáží není schopna udržet objekt v zorném poli bez toho, že by se obraz rozmazal. I kdyby montáž byla schopna udržet objekt v zorném poli po dostatečně dlouhou dobu, mohlo by dojít k přeexponování snímku kvůli světelnému znečištění. Proto se nejprve se pořídí několik fotografií s krátkými expozičními časy, a tyto se následně pomocí vhodného softwaru (Deepsky Stacker, Siril) spojí do jedné finální fotografie.

2.2 Vybavení pro astrofotografii

2.2.1 Kamera

Pro astrofotografii se v dnešní době používají CCD nebo CMOS senzory, které jsou součástí digitálních fotoaparátů. Analogové fotoaparáty, které využívaly fotografický film, ani desky s fotografickou emulzí se v dnešní době již nepoužívají. Při fotografování noční oblohy se nejčastěji používají chlazené astronomické (CCD) kamery nebo digitální zrcadlovky. V této práci byl používán pro astrofotografii digitální zrcadlový fotoaparát Canon 500D.



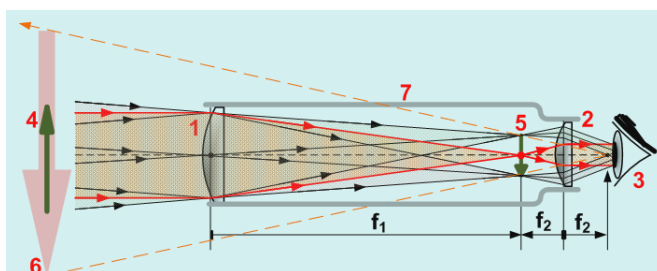
Obrázek 1 Zrcadlovka Canon 500D



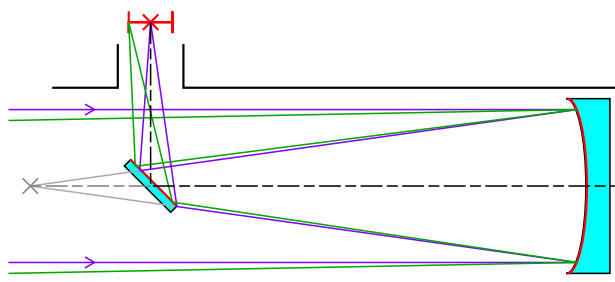
Obrázek 2 Astronomická kamera ZWO ASI 183MM

2.2.2 Dalekohled

Dalekohledy slouží ke zvětšování zorného úhlu, pod kterým objekty pozorujeme. Rozlišujeme dva typy dalekohledů. Čočkové (refraktory), které využívají lomu světla na optických čočkách, a zrcadlové (reflektory), které využívají odrazu světla na kulových nebo parabolických zrcadlech. Pro astrofotografii je důležité, aby čočky dalekohledu vykazovaly co nejméně optických vad a co největší světelnost.

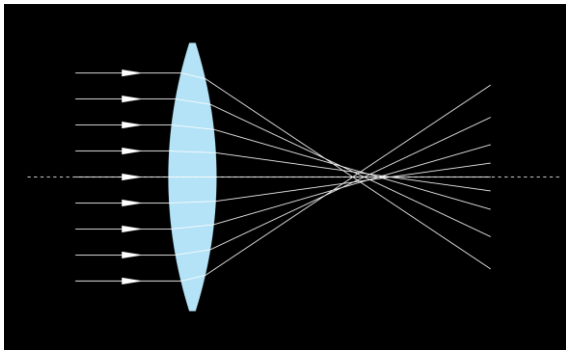


Obrázek 1 Schéma čočkového dalekohledu (refraktoru)

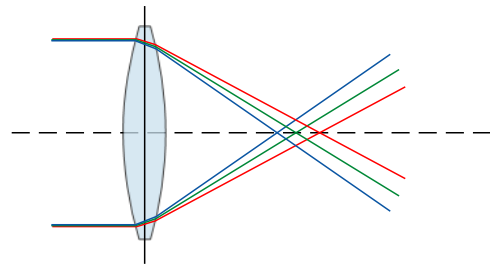


Obrázek 2 Schéma Newtonova dalekohledu (reflektoru)

Čočky dalekohledů mohou vykazovat chromatickou aberaci. Kvůli rozdílnému indexu lomu se jednotlivé vlnové délky světla nelámou do téhož bodu (dalekohled nezaostří na jeden bod) a okraje hodně kontrastních objektů jsou barevné. Sférickou aberací mohou trpět jak refraktory, tak reflektory. Způsobuje ji to, že se světlo láme na okrajích čočky více než poblíž optické osy. Projevuje se tím, že není možné zaostřit dalekohled.



Obrázek 3 Vznik sférické aberace



Obrázek 4 Vznik chromatické aberace

2.3 Astronomické montáže

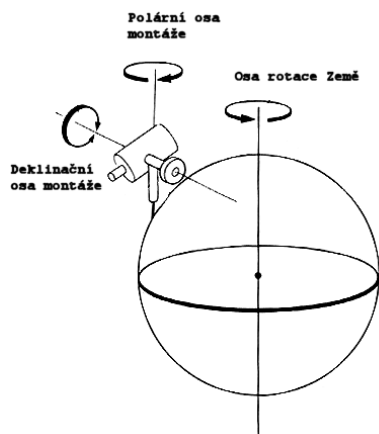
Hlavním cílem astronomické montáže je udržet daný astronomický objekt v zorném poli bez toho, že by se objekt v zorném poli pohyboval. Jinak by došlo k rozmazání obrazu daného astronomického objektu.

2.3.1 Ekvatoriální montáže

Ekvatoriální montáže mají dvě osy polární (též hodinová) a deklinační. Polární osa je rovnoběžná s osou otáčení Země (severní nebo jižní pól). Na severní polokouli ukazuje přibližný směr severního pólu Polárka (je vzdálená méně než 1° od severního pólu). To znamená, že polární osa svírá v místě pozorování úhel, který je shodný se zeměpisnou šířkou. Deklinační osa slouží k nastavení dalekohledu vůči polární ose. Rychlost otáčení polární osy je jedna otočka za 23 h 56 min, což zajistí, že dalekohled bude přibližně sledovat daný astronomický objekt. Jsou-li v montáži mechanické chyby, může docházet k tomu, že fotografovaný objekt není úplně přesně sledován. Důležité je, aby převody montáže měly co nejmenší vůli a periodickou chybu a byly „co nejvíce tuhé“. Pro určování polohy objektů na obloze se používá u ekvatoriálních montáží systém rektascenze a deklinace.

Rektascenze je úhel, který svírá rovina procházející světovými póly a nebeským tělesem s rovinou procházející světovými póly a jarním bodem. Udává se v hodinách, minutách a sekundách. Zkratka: RA, symbol je α .

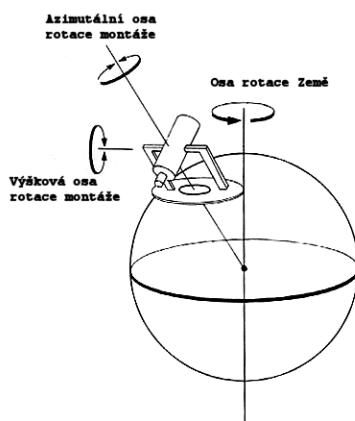
Deklinace je úhel, který svírá hvězda s nebeským rovníkem. Uvádí se ve stupních od $+90^\circ$ na severní polokouli po -90° na jižní polokouli.



Obrázek 5 Princip paralaktické montáže

2.3.2 Azimutální montáže

Azimutální montáže mají dvě osy a ani jedna z nich není namířená na zemskou osu. Jedna osa je v rovině (azimutu) a její osa míří směrem do nadhlavníku. Druhá osa je na ní kolmá a na ní se nastavuje výška (altitude). Protože ani jedna z os není rovnoběžná se zemskou osou, je s azimutální montáží pro amatéra velmi obtížné sledovat daný astronomický objekt, neboť je třeba mít na každé z těch os nastavenou jinou rychlost otáčení. Tento typ montáže se používá hlavně u velkých dalekohledů, které jsou naváděny složitějšími systémy. U amatérských astronomů je rozšířena také Dobsonova montáž.



Obrázek 6 Princip azimutální montáže

2.4 Hlavní faktory při návrhu montáže

Cílem práce bylo vyrobit montáž co nejlevněji s pomocí součástek, které jsou běžně dostupné, a aby se všechny díly, které nelze koupit, daly vytisknout na 3D tiskárně. Montáž bude mít pohon pouze v polární ose. Pohyb v této ose slouží ke kompenzaci otáčení Země. Pohyb v deklinační ose slouží pouze k zamíření dalekohledu na daný objekt. Deklinační osu nebude potřeba motorizovat, protože nebudeme provádět

pointaci a automatické navádění (go-to). Pro astrofotografii na kratších ohniscích to není úplně potřebné. Jedním z kritérií výroby montáže je vyrobit montáž co nejjednodušší a nejlevnější, proto pohyb v deklinační ose bude prováděn s využitím kulové hlavy nebo pomocí nemotorizované deklinační osy, která je ale v porovnání s kulovou hlavou dražší (zakoupit ji lze na stránkách <https://www.amazon.com/SkyWatcher-S20560-Adventurer-Telescope-Accessory/dp/B01D40FZTS>).

2.5 Výběr převodu montáže

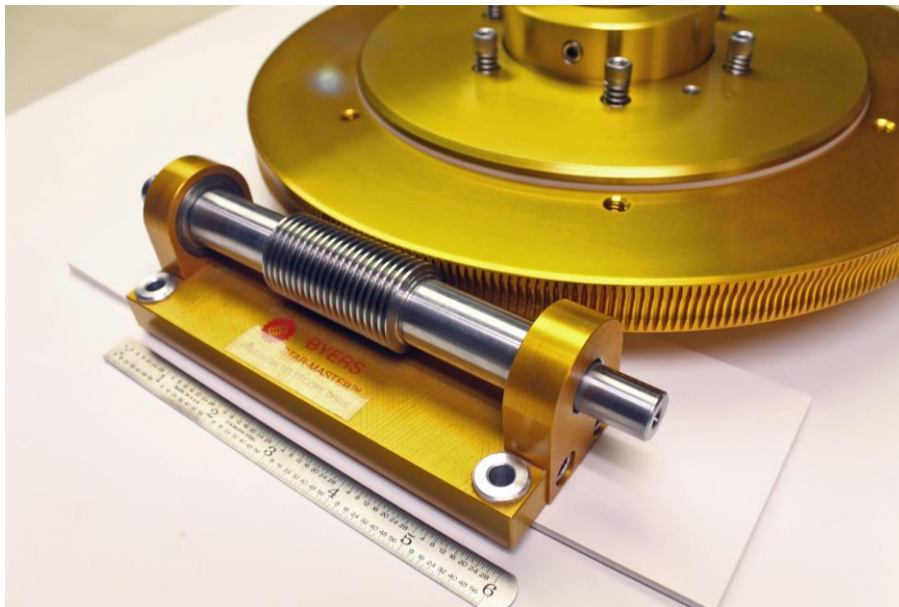
U výběru vhodného převodu montáže je potřeba zvážit několik věcí. Tuhost samotného převodu je důležitá, protože nám říká, jak moc může montáž odolat bočním silám. V případě malé tuhosti převodu může závan větru způsobit rozmazání snímku. Převod montáže taky musí být schopen dělat velice malé kroky, které se jeví jako plynulý pohyb. Jemnosti převodu u montáže se říká “jitter” (výraz autor převzal z webových stránek [3], protože nenašel vhodný český ekvivalent) a je charakterizována amplitudou a frekvencí.

Periodická chyba je chyba, která je způsobena převodem a způsobuje, že v průběhu delšího sledování objektu se nám tento astronomický objekt bude posouvat z jedné strany pozorovacího pole na druhou a zpátky, a to periodicky, například každých pár minut, což má za následek u delších expozic a delších ohniskových vzdáleností rozmazání sledovaného objektu. Periodická chyba nemusí být velký problém u montáží, pokud mají dostatečně jemný převod. Potom se dá periodická chyba eliminovat naváděním a korekcí periodické chyby pomocí enkoderu, atd. Tyto metody jsou pro běžného uživatele drahé, proto se autor práce rozhodl jít u montáže jinou cestou. Zajistit, aby periodická chyba byla volbou vhodného převodu co nejmenší a aby drahé metody korekce nemusel používat.

Dalším faktorem při výběru převodu montáže je vůle. Vůle je způsobená tím, že dvě ozubená kola do sebe perfektně nezapadají (mají malou mezeru mezi zuby), což způsobuje, že když motor začne otáčet prvním kolem, nějakou dobu trvá, než se začne další ozubené kolo pohybovat. Když má montáž velkou vůli, může to způsobit, že při používání go-to se pozorovaný objekt nedostane doprostřed zorného pole. Tento faktor u návrhu této montáže není moc důležitý (montáž nepoužívá go-to), ale bylo by vhodné využít převodu, který nemá žádnou vůli, např. řemen, třecí převod, aby bylo možné v budoucnu přidat další vylepšení např. přidání motorizované deklinační osy.[10] Protože motor není schopen dosáhnout dokonale jemného a velice pomalého pohybu (0,0007 RPM) je potřeba použít převody které by umožnily, aby se motor mohl otáčet rychleji a nemusel mít tak velký točivý moment. Velký převodový poměr eliminuje malé nepřesnosti v otáčení motoru.

2.6 Šnekový převod

Šnekový převod bývá celkem často používán v montážích kvůli jeho velkému převodovému poměru. Výhodou šnekového převodu je schopnost v malém prostoru dosáhnout velkého převodového poměru (Převodový poměr vyjadřuje vztah mezi otáčkami vstupního a výstupního prvku při použití daného převodu.) s dostatečnou tuhostí. Jeho periodická chyba je docela malá, ale frekvence této periodické chyby je celkem velká (jedna perioda trvá řádově pár minut). To nevadí u větších montáží, které používají pointace. Jedná se o metodu korekce mechanických chyb montáže pomocí pointační kamery, která sleduje pohyb hvězdy a když zachytí pohyb hvězdy způsobený mechanickými chybami montáže, provede korekci této chyby). Bez pointace by se sledovaný objekt posouval ze strany na stranu v docela krátkém čase. Nevýhodou kvalitního šnekového převodu je vysoká cena výroby. Další nevýhodou je nemožnost vytisknout přesný převod na fdm 3D tiskárně. U některých montáží bývá problém s tím, že mazivo, které je používáno na promazání šnekového převodu může v zimě zamrznout.



Obrázek 7 Šnekový převod

2.7 Řemenový převod

Řemenový převod je celkem málo používaný a většinou se používá až u dražších montáží. Mezi výrobce, kteří používají řemeny, patří Avalon instruments a Open astro tech. Řemenový převod má tu výhodu, že má ve srovnání se šnekovým převodem malou periodickou chybu a taky to, že perioda periodické chyby je větší než u šnekového převodu. Menší periodická chyba a delší perioda s menší frekvencí způsobují, že pohyb hvězd v zorném poli je menší a nedochází k tak velkému rozmazání obrazu. To znamená, že může být použita delší expozice. Mezi další výhody patří to, že řemeny nemají žádnou vůli[3].

Mezi nevýhody řemenového převodu patří, že je méně tuhý a má menší převodový poměr než šnekový převod což znamená, že na dosažení stejného převodového poměru je potřeba více prostoru.

Tuhost řemenového převodu se dá zvýšit:

- Použitím řemenů se skelnými nebo ocelovými vlákny
- Zkrácením vzdálenosti řemenic od sebe, čímž se zkrátí délka řemene. Tím se dosáhne větší tuhosti převodu, protože nebude docházet k natahování řemene v nepodepřené části.

2.8 Ostatní typy převodů

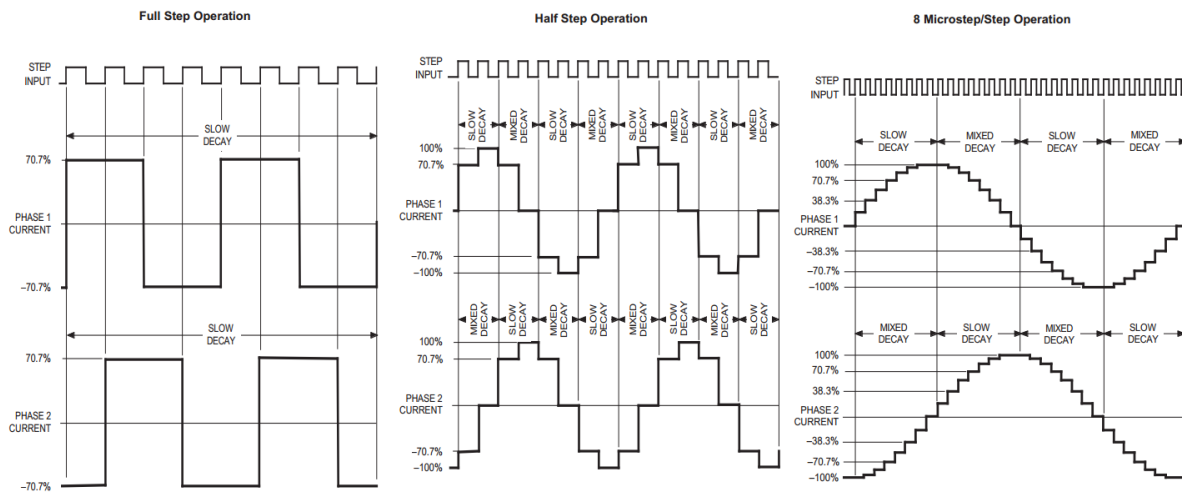
Mezi další převody, které stojí za zmínku, patří harmonická převodovka a třecí převod. Třecí převod funguje na principu válečku, který je přitlačen na dalekohledovou osu. Výhodou třecího převodu je, že má malou periodickou chybu a jeho tuhost je dost velká a taky nemá žádnou vůli. Jeho převodový poměr je docela vysoký. Převážně se používá až u dražších montáží, protože je náročný na výrobu. Povrch převodu musí mít kvalitní úpravu. Mezi nevýhody patří to, že může proklouznout. Pro použití při stavbě navrhované montáže se nehodí, protože se nedá vytisknout na 3D tiskárně.

Harmonická převodovka má tu výhodu, že je schopna dosáhnout velkého převodového poměru v malém prostoru. Její efektivita je vyšší než u šnekového převodu. Periodická chyba tohoto převodu je střední (20 úhlových vteřin u montáže am5 [4]), ale její perioda je mnohonásobně delší než u šnekového převodu. Její hlavní výhodou je, že není potřeba používat protizávaží (zatížení montáže neovlivní výrazně její chod) a nemá žádnou vůli. Harmonickou převodovku lze vytisknout na 3D tiskárně, ale přesnost takového převodu je diskutabilní.

2.9 Výběr pohonu montáže

Pro pohon montáže byl použit krokový motor, protože je dostupný, levný, přesný a má nízkou spotřebu energie. Krokový motor potřebuje ke svému běhu ovladač krokového motoru, který mu posílá pulzy, a mikrokontroler, který posílá instrukce do ovladače krokového motoru. Krokový motor by měl mít co nejmenší úhel kroku, aby se dosáhlo co největší přesnosti. Ovladač krokového motoru posílá pulsy do krokového motoru, kterými ho ovládá. Ovladač krokového motoru by měl umět mikrokrokování, které umožní dosáhnout lepší plynulosti pohybu. Mikrokrokování funguje na tom principu, že vezme 1 krok (krokového motoru) a rozdělí ho na více malých kroků, čímž se dosáhne větší plynulosti pohybu. Některé ovladače krokového motoru zvládají mikrokrokování lépe než jiné. Rozhodujícím činitelem je počet mikrokroků, na který mohou rozdělít jeden krok krokového motoru. Čím více mikrokroků mohou udělat, tím je pohyb

plynulejší, ale může dojít k tomu, že některé mikrokroky budou vynechány kvůli menšímu točivému momentu. Což je na závadu při zapnutí chodu motoru, ale v průběhu focení to nevadí, protože montáž se pohybuje konstantní rychlostí a nezastavuje se. Mikrokontroler by měl být schopen posílat signály do řadiče krokového motoru a většina mikrokontrolerů je tohoto schopna.



Obrázek 8 Mikrokrokování - napravo chod bez mikrokroků a nalevo s mikrokrokováním

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 První prototyp

U prvního prototypu se autor seznamoval se základy navrhování a fungováním montáží.

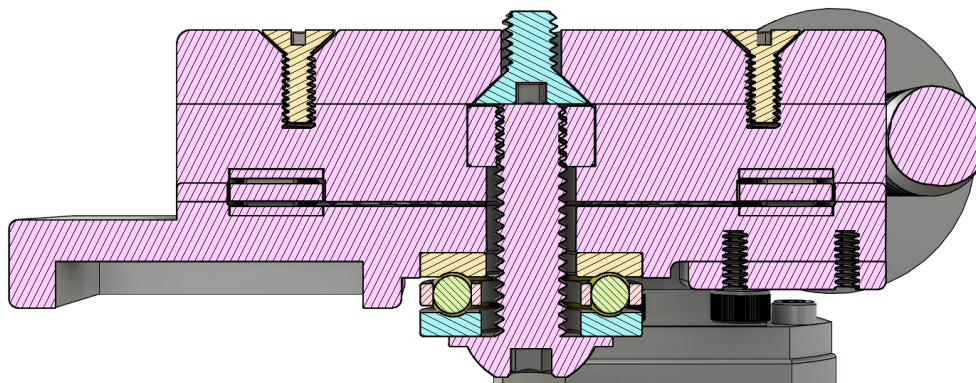


Obrázek 9 První vytištěný prototyp

3.1.1 Návrh polární osy

První návrh polární osy nebyl funkční díky několika chybným rozhodnutím.

- Byly použity dva šnekové převody, které na sebe navazovaly. V té době autor nedokázal posoudit nejdůležitější parametry při výběru správného převodu pro pohon montáže. Na základě rešerší bylo rozhodnuto využít šnekový převod. Hlavní důvody nové volby byly: velký převodový poměr a možnost tisku šnekového převodu na 3D tiskárně. Navržený šnekový převod nefungoval, protože šnek nedoléhal dostatečně na šnekové kolo a kvůli nedostatečné přesnosti vytisknutého šneku a šnekového kola. Nedoléhání šneka by se dalo vyřešit tím, že by byl na pružině, která by ho tlačila ke šnekovému kolu.
- Použití nevhodného typu ložiska. Použita byla dvě axiální ložiska, která jsou dobrá pro velké axiální zatížení, ale ne pro radiální. V té době autor nedostatečně promyslel podíl radiálního zatížení. Zvažoval, že v polární ose je jen axiální zatížení, ale ve skutečnosti jde o kombinaci axiálního i radiálního zatížení. Důsledkem bylo, že se celá vrchní část posouvala na tu stranu, kde byl umístěn fotoaparát.



Obrázek 10 Řez polární osou

- Používání vytištěných závitů namísto závitových vložek. Vytisknuté závitky fungují dobře, pokud se do nich šroubek zašroubuje pouze jednou. Při opakovaném použití mají tendenci se uvolnit.

3.1.2 Návrh polárního klínu

První navržený polární klín byl plně 3D tisknutelný. Jediné netištěné součástky byly šrouby. Pro nastavení výšky byl použit šnekový převod, protože zamezí zpětnému chodu. Pro nastavení azimutu byl taky použit šnekový převod. Šnek u azimutu špatně doléhal na šnekové kolo, a to se projevovalo velkou vůlí. Vytisknuté ložisko v azimutu mělo taky velkou vůlí. Při nastavování výšky se při větším zatížení celá konstrukce prohýbala, což mělo za následek, že tuhost klínu byla velice malá. Při zkoušce zatížení se ulomila celá část, která měla nastavovat výšku.



Obrázek 11 První prototyp polárního klínu 1 nastavení azimut, 2 nastavení výšky

3.1.3 Shrnutí

První prototyp sice nebyl funkční, ale poskytl mnoho podnětů na vylepšení následujících prototypů.

3.2 Druhý prototyp

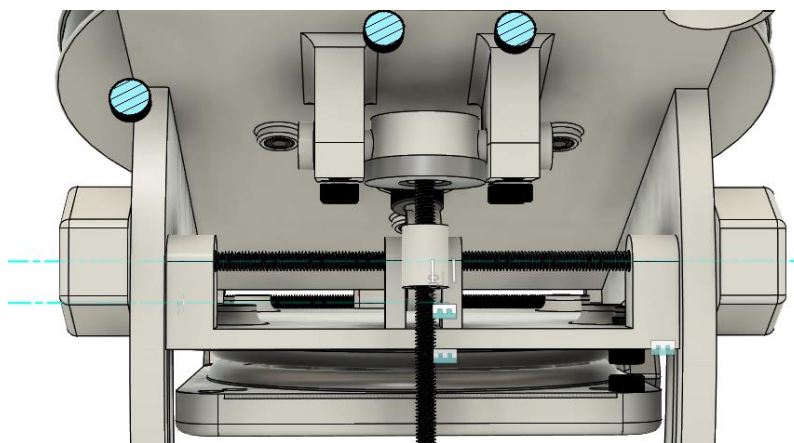
U druhého prototypu se autor rozhodl, že zakomponuje polární klín a polární osu do jedné konstrukce, aby ušetřil prostor, zjednodušil používání, zvětšil tuhost a zjednodušil sestavení montáže. Zásadní změnou u této montáže je použití řemenů místo šnekového převodu protože:

- nejsou tak náchylné na výrobní nepřesnosti jako šnekový převod,
- řemenový převod byl předtím úspěšně použit na 3D tištěných montážích s dobrými výsledky, např. Open Astro Mount,
- na rozdíl od šnekového převodu je jednodušší řemenový převod napnout než přitlačit šneka u šnekového převodu.

3.2.1 Návrh polárního klínu

U polárního klínu bylo rozhodnuto použít vlastní návrh, stabilnější než u prvního prototypu. Přesto měl ještě několik chyb.

- Byly použity moc tenké díly, což způsobovalo, že se polární klín prohýbal.
- U nastavení azimutu bylo použito ložisko pro otočné točny a šnekový převod, které měly velkou vůli.
- U nastavení výšky byla použita 3 mm závitová tyč, která měla malé stoupání závitu, což způsobovalo, že nastavení výšky trvalo dlouhou dobu.
- Uložení ložiska, které pohybovalo s výškou polární osy, bylo volné.
- Pant, který spojoval základnu a polární osu, byl slabý a měl tendence se ohýbat.
- Boční držáky, které měly zpevnit polární klín, byly moc dlouhé a při vyšších zeměpisných šířkách měly tendenci narazit do stativu.



Obrázek 12 Nastavování výšky

3.2.2 Návrh řemenové převodovky

U řemenové převodovky bylo rozhodnuto použít více řemenových převodů, aby se dosáhlo většího převodového poměru. Autor se inspiroval řemenovou převodovkou z montáže Open Astro Mount. Vytvořená řemenová převodovka má 3 redukční převody s celkovým převodovým poměrem 101,25. U tohoto prototypu byla hnací řemenice vytisknuta na 3D tiskárně.

Nevýhodou tištěné hnací řemenice je prokluzování na hřídeli.

Výhody

- Lze ji vytisknout na 3D tiskárně.
- U větších velikostí je cena výroby mnohonásobně menší než u dostupných řemenic na trhu.
- Lze použít jakoukoliv velikost řemenice.

Výpočet převodového poměru i :

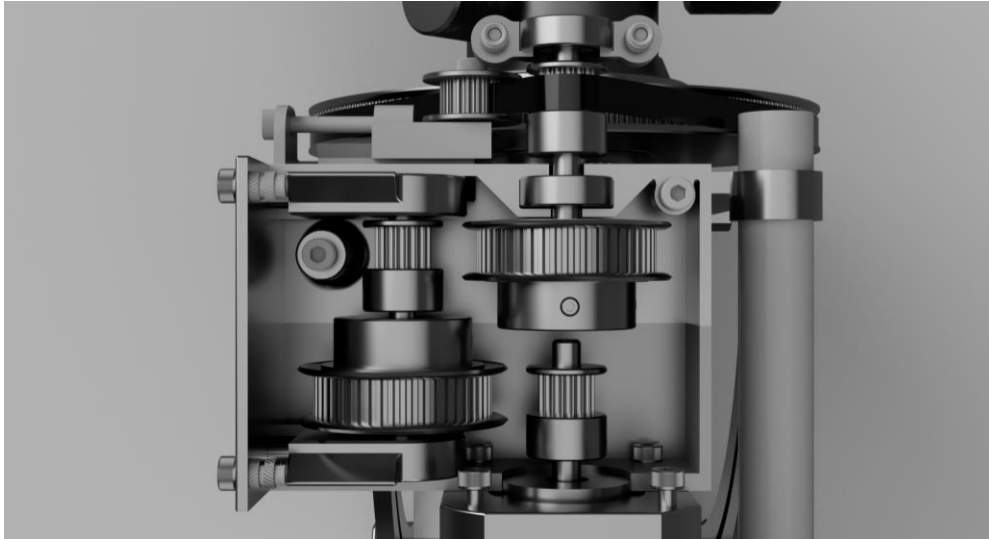
řemenice s 48 zuby $n_1 = 48$, řemenice s 16 zuby $n_2 = 16$, řemenice s 48 zuby $n_3 = 48$,
3Dtištěná řemenice se 180 zuby $n_4 = 180$

$$i = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{n_3}{n_2} \cdot \frac{n_4}{n_2}$$

$$i = \frac{48}{16} \cdot \frac{48}{16} \cdot \frac{180}{16}$$

$$i = 101,25$$

Převodový poměr převodu je 101,25.



Obrázek 13 Návrh řemenové převodovky

3.2.3 Výhody a nevýhody druhého prototypu ve srovnání s prvním prototypem

- Polární klín byl tužší a umožňoval přesnější ustavení montáže.
- Byl použit lepší řemenový převod.
- Jednalo o verzi, která nebyla plně funkční.
- Ložiska na polární ose byla malá, což způsobovalo, že celá polární osa byla hodně nestabilní.



Obrázek 14 Druhý prototyp

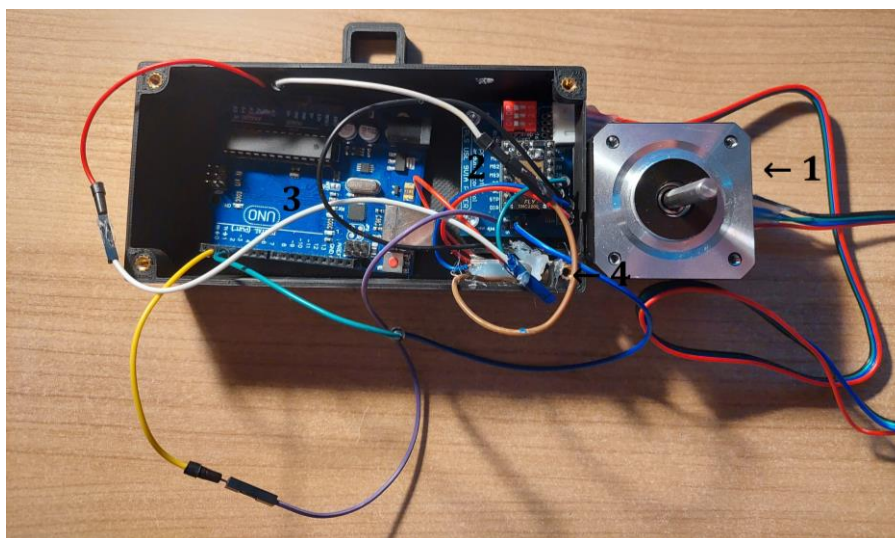
3.3 Třetí prototyp

U třetího prototypu byly opraveny chyby druhého prototypu.

- Bylo navrženo lepšího uchycení převodovky, ve kterém je jedna čtvrtina převodovky integrovaná do hlavního dílu montáže. Převodovka je nyní rozdělená na čtyři části, které lze teď bez problému složit.
- Byly použity kovové řemenice namísto plastových. Plastové řemenice měly tendenci prokluzovat. Třetí prototyp používá kovové řemenice, které jsou sice dražší, ale neprokluzují.
- Bylo vylepšeno uložení ložiska, které nastavovalo výšku montáže tak, aby bylo méně volné.
- Použití M5 závitové tyče u nastavování výšky namísto M3 závitové tyče. M5 má vyšší stoupání což znamená, že nastavení výšky trvá kratší dobu.
- Byl vylepšen přední pant, který je teď tužší.

3.3.1 Elektronika

Pro pohon druhého prototypu byl původně užit driver LV8829 který měl nízkou cenu a zároveň umožňoval používat 1/128 mikrokrokování. Z důvodu nefunkčnosti driveru LV8829 bylo rozhodnuto přejít na dražší driver TMC2208, který umožňoval použít přesnější mikrokrokování 1/256 namísto 1/128. Pro ovládání montáže byl použit mikrokontroler Arduino uno, pro který byl napsán software, který posílá každých 66,48 ms puls do krokového motoru, čímž se dosáhne siderální rychlosti (siderální rychlost je jedna otočka za 23 h 56 min 4 s) otáčení polární osy.



Obrázek 15 Pohon - 1 Krokový motor (0,9°), 2 Driver tmc2208, 3 Arduino uno, 4 Step up modu

3.3.2 Výpočet rychlosti otáčení.

Driver TMC2208 umožňuje nastavit jen 1/16 mikrokroků a automaticky je interpretuje na 1/256 mikrokroků. Ve výpočtu se proto používá 1/16 mikrokroků (i když bylo popsáno, že používá 1/256 mikrokrokování).

A = čas siderálního dne v (ms) = 86164000 ms

X = čas pulsu (ms)

P = počet kroků krokového motoru = 400

M = mikrokrokování nastavené na řadiči krokového motoru = 16

i = převodový poměr = 101,25

$$X = \frac{A}{2 \cdot P \cdot M \cdot i}$$

$$X = 66,48 \text{ ms}$$

Následně byl napsán program v Arduino ide který posílal impulzy do motoru každých 66,48 ms. Ukázka softwaru na kontrolu montáže je níže, kód lze dohledat i na adrese <https://github.com/OndraGejdos/OG-star-tracker/blob/main/Firmware/firmware%20simple%20for%20arduino%20nano%20and%200.9%20C2%B0%20stepper%20.ino.ino>

```
1  const int EN=2;           //ENABLE PIN
2  const int Step=3;        // STEP PIN
3  const int dir=4;        // DIRECTION PIN
4  void setup()
5  {
6  pinMode(EN,OUTPUT);     // ENABLE AS OUTPUT
7  pinMode(dir,OUTPUT);   // DIRECTION AS OUTPUT
8  pinMode(Step,OUTPUT);  // STEP AS OUTPUT
9  digitalWrite(dir,HIGH);
10 }
11 void loop()
12 {
13
14
15 digitalWrite(dir,HIGH);
16 digitalWrite(Step,HIGH); // STEP HIGH
17 delay(67.31 );          // WAIT
18 digitalWrite(Step,LOW); // STEP LOW
19 delay(67,31);           // WAIT
20
21
22 }
```

Obrázek 16 Ukázka softwaru na kontrolu montáže

3.3.3 Testování

Při ustavování montáže bylo objeveno několik chyb

1. Dolní axiální ložisko mělo velkou vůli.
2. Boční půlkruhy narážely do stativu.
3. Bylo použito malé ložisko u velké řemenice, která měla 180 zubů. Důsledkem byl pohyb řemenice do stran.
4. Montáž byla málo tuhá, což bylo způsobeno tím, že byly použity tenké části. Montáž tak byla schopna unést méně vybavení.



Obrázek 17 První úspěšný test

Přesto se podařilo vyfotit 30s expozice bez rozmazání hvězd.



Obrázek 18 První snímek získaný fotoaparátem Lumix fz1000 30 s 240 mm (35 mm ekvivalent) na tištěné montáži

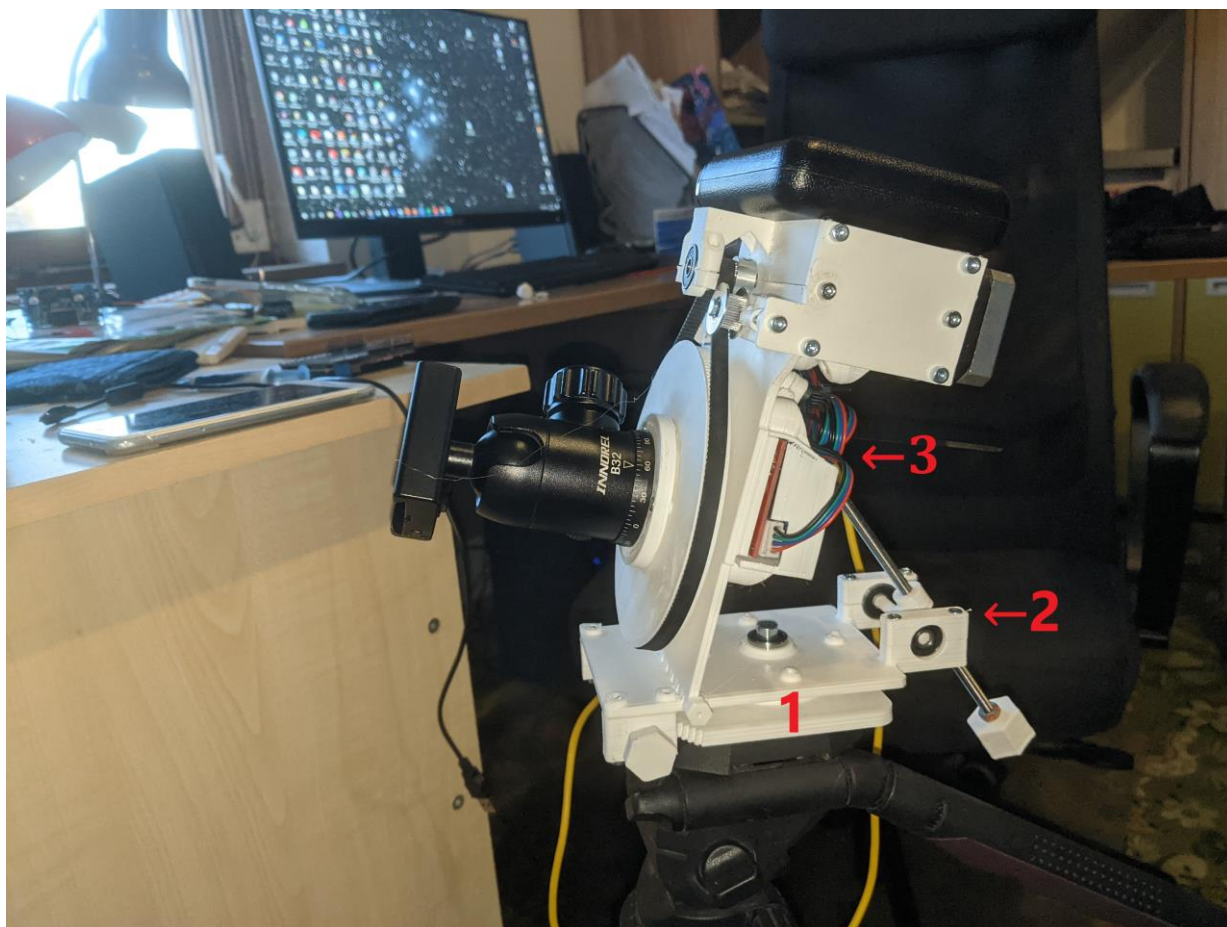
3.3.4 Shrnutí

Třetí prototyp byl funkční a poskytl plno podnětů pro návrhu dalšího prototypu.

3.4 Prototyp 3.5

U tohoto prototypu došlo k několika změnám.

1. U nastavení azimutu bylo použito radiální ložisko namísto axiálního
2. Elektronika byla umístěna pod polární klín
3. Bylo vylepšeno umístění nastavování výšky
4. Byly odstraněny boční půlkruhy



Obrázek 19 Prototyp 3.5 - 1 vylepšené ložisko v azimutu, 2 vylepšené nastavování výšky, 3 umístění elektroniky pod polární klín

3.4.1 Nevýhody a výhody

Astrofotografům, kteří žijí ve větších zeměpisných šířkách, by mohla elektronika umístěná pod polární klín vadit. Nové vylepšené uchycení ložiska fungovalo lépe než u minulého prototypu, bylo ale málo podepřené a tudíž hodně náchylné ke zlomení. Použité ložisko v nastavování azimutu bylo malé a nedávalo dostatečnou podporu

základně, proto se při zatížení celá montáž prohýbala. Odstranění bočních půlkruhů mělo za následek to, že nenarážely do stativu, ale zároveň se snížila tuhost montáže.

Tento prototyp měl několik zásadních vylepšení, a zároveň i několik nedostatků, které bylo třeba vylepšit v další verzi.

3.5 Čtvrtý prototyp

Oproti prototypu 3.5 bylo uděláno několik dalších vylepšení.

1. Zesílení základny a polární osy tím, že byla udělána širší.
2. Byla použita větší ložiska, aby se dosáhlo větší stability
3. Bylo vyztuženo nastavení výšky.
4. Elektronika byla umístěna do boxu vedle montáže pro větší rozsah pro použití ve větších zeměpisných šířkách.



Obrázek 20 Čtvrtý prototyp - 1 Box na elektroniku, 2 Vylepšení nastavování výšky, 3A Vylepšené ložisko v azimutu, 4 Vylepšené ložisko v polární ose

3.5.1 Výhody oproti prototypu 3.5

- Celkovým zesílením a použitím větších ložisek bylo dosaženo vyšší tuhosti montáže, což umožňuje, aby unesla větší zátěž.
- Odklonění elektroniky zjednoduší její použití ve vyšších zeměpisných šířkách.

3.5.2 Nevýhody

- Použitý šnekový převod u nastavení azimutu měl velkou vůli, což mělo za následek nestabilitu montáže ve větru.
- Vrchní část polárního klínu byla málo podepřená a celá vrchní konstrukce se hýbala.



Obrázek 21 Velká mlhovina v souhvězdí Orion vyfocená fotoaparátem Canon 500D a tair 3s 30(s)x120, na prototypu 4

3.6 Pátý prototyp

Pátý prototyp vykazuje několik zlepšení oproti čtvrtému prototypu.

- Zpětně byly přidělaný boční půlkruhy pro zlepšení celkové tuhosti, tentokrát ale na vrchní část montáže.
- Bylo vyztuženo nastavení výšky.
- Bylo vylepšeno nastavování azimutu použitím dvou šrouby naproti sobě namísto šnekového převodu.
- Tolerance dílů byly vyladěny tak, aby bylo možno montáž lépe poskládat a byla robustnější.



Obrázek 22 Prototyp5 - 1 Vylepšené nastavování azimutu 2 Přidané boční půlkruhy

3.6.1 Výhody

- Díky bočním půlkruhům je montáž tužší.
- Nastavení azimutu je pevnější.

3.6.2 Nevýhody

- Je potřeba tisknout jiné typy základěn pro různé zeměpisné šířky. Půlkruhy by mohly bránit pohybu a vhodnému nastavení fotoaparátu na montáži, tím by byly namáhány a mohly by se mechanicky poškodit.

3.7 Test periodické chyby a testování montáže

Pro zjištění periodické chyby se montáž záměrně neustavila a byl vyfocen 5min snímek, s jehož pomocí se zjistila periodická chyba [5]. Tato metoda není moc přesná, ale ukáže přibližnou periodickou chybu. Nejprve je potřeba vypočítat image scale pomocí vzorce

$206 \cdot \text{velikost pixelu} \div \text{ohnisková vzdálenost dalekohledu}$

ohnisková vzdálenost dalekohledu = 300mm

velikost pixelu kamery = 4,68

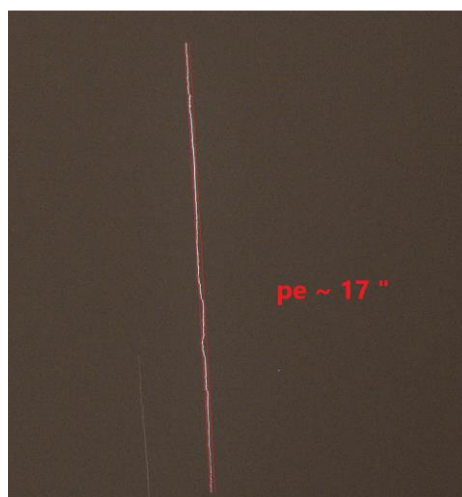
$$\text{image scale} = 206 \cdot 4,68 \div 300$$

image scale = 3,2 úhlových vteřin/pixel

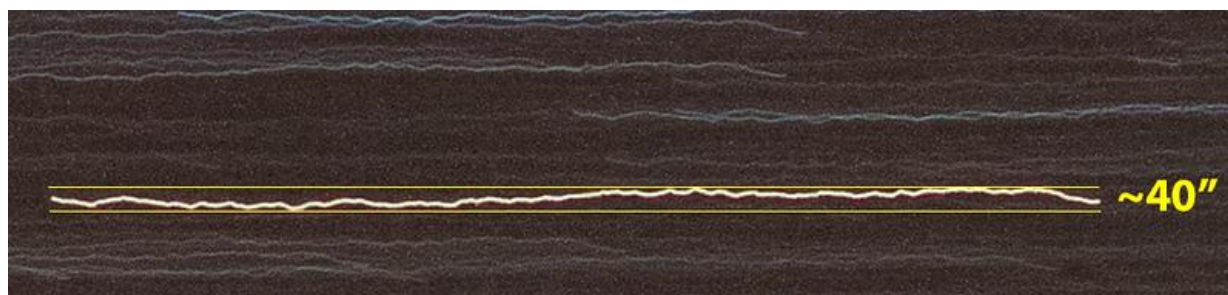
Následně byla ze snímku zjištěna velikost periodické chyby v pixelech a tato hodnota byla vynásobena image scale a získala se hodnota periodické chyby za dobu 5 min, která je kolem 30 úhlových vteřin u mé montáže. Toto měření provedl i Konrad Cermann, který si montáž vytiskl. Vyšla mu periodická chyba 17 úhlových vteřin. Výsledek je lepší než u komerční montáže star adventurer 2i, která stojí několikanásobek ceny této montáže. Z obrázků lze usoudit, že chyba této montáže je více plynulá než u montáže star adventurer 2i. Její periodická chyba je 40 úhlových vteřin.



Obrázek 23 Test periodické chyby montáže



Obrázek 24 Test periodické chyby změřený Konardem Cermannem

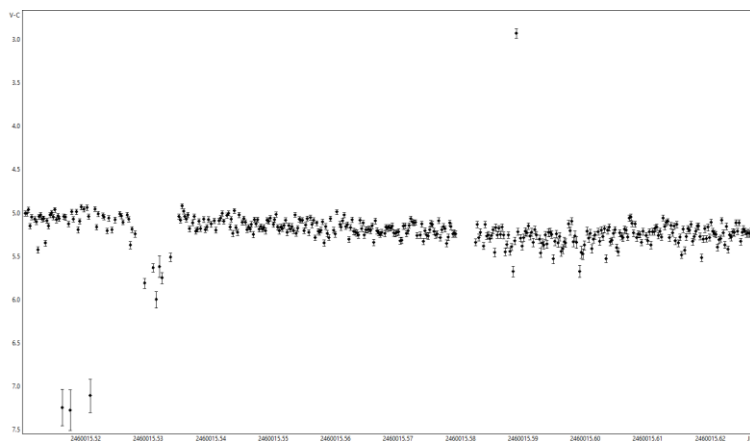


Obrázek 25 Test periodické chyby montáže star adventurer 2i

Při testování montáže bylo vyzkoušeno, jakou ohniskovou vzdálenost je montáž schopna zvládnout bez rozmazávání hvězd. Na 600mm ohniskové vzdálenosti a image scale 1,27 úhlových vteřin na pixel byla schopna dosáhnout až 60s expozic bez rozmazání hvězd. Ale to nelze doporučit, protože přibližně 1/3 snímků je potom rozmazaných. Testy viz Příloha 1 a 2.

3.8 Využití montáže

Montáž se dá využít k astrofotografii a k fotometrii proměnných hvězd. Fotometrie proměnných hvězd měří změnu intenzity záření dané hvězdy v čase. Metodika pořizování fotografií proměnných hvězd ani pracování měření není předmětem této práce.



Obrázek 26 Měření proměnné hvězdy s Nikon z50 250mm (autor Konard Cermann)



Obrázek 27 Orion vyfocený na prototypu 5 montáže

3.9 Náklady na výrobu

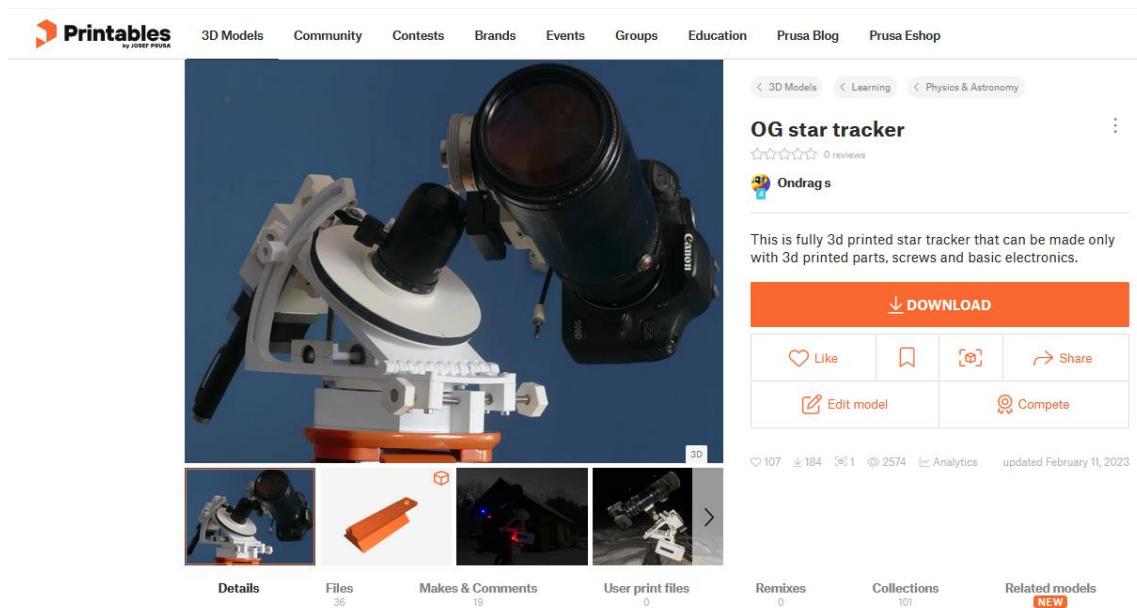
Montáž je určena hlavně skupině lidí, kteří chtějí začít s astrofotografií, ale nemají dostatek peněz na komerční montáže. Z toho důvodu byla snaha udržet cenu co nejnižší. Cena materiálu je v česku 2068 Kč což je o 9332 méně než ekvivalentní montáž Ipotron SkyTracker Pro se stejným vybavením a funkcemi.

Tabulka 1 Výpočet ceny prototypu 5

Díl	Počet	Cena za 1 ks	Cena celková
Ložisko 61806	2	20	40
Ložisko 625	11	13,5	148
Driver tmc2209	1	150	150
Krokový motor 0,9°	1	400	400
Řemenice 48z	2	168	336
Řemenice 16z	3	39	117
Řemen 400mm	1	49	49
Řemen 122mm	2	29	58
Break out board	1	20	20
Step Up modul	1	25	25
Arduino nano	1	325	325
Filament 600g	1	350	350
Šroubky	1	50	50
Cena celkem			2068 Kč

3.10 Zveřejnění návrhu a postupu výroby montáže

V duchu dalších open source montáží jako je Open Astro tracker byla montáž vydána na printables.com. K montáži je připraven videomanuál na její postavení (<https://www.youtube.com/watch?v=pRuXy7Ffp4g>) a návod na poskládání elektroniky. Zároveň byly vydány všechny 3D modely na 3D tisk a taky dokumentace na poskládání elektroniky. Od publikace videa na Printables dosáhla 184 stáhnutí a více než 2500 zobrazení. Autor se rozhodl, že založí komunitu na discordu, dnes má 73 členů. Manuály na postavení byl jednoduše pochopitelné a mnoho lidí bylo schopno montáž postavit bez další pomoci.



Obrázek 30 Stránka vydání montáže na printables

Montáž byla mediálně prezentována, byly o ní napsány dva články a reakce na ni byly velice pozitivní.

Tabulka 2 Zmínky o montáži na webech

Web	Název článku	Datum zveřejnění	Adresa
arduino.com	A 3D-printable, Arduino-controlled star tracker great for astrophotography	19.1.2023	https://blog.arduino.cc/2023/01/19/a-3d-printable-arduino-controlled-star-tracker-great-for-astrophotography/
geeky-gadgets.com	DIY star tracker built using Arduino Uno	20.1.2023	https://www.geeky-gadgets.com/star-tracker-20-01-2023/

Montáž byla rovněž s kladnými ohlasy prezentována v rámci astronomického kurzu na Planetáriu Ostrava.



Obrázek 31 Presentace montáže na planetáriu

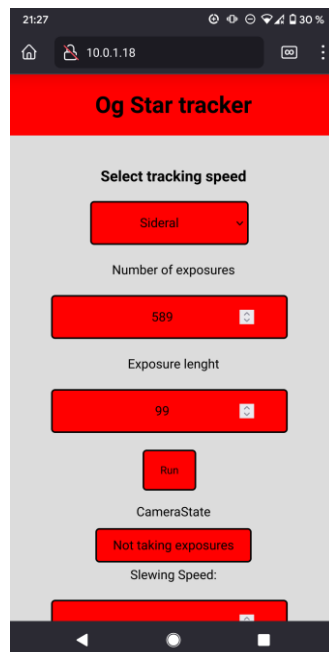
3.11 Postavené montáže a montáže ve výstavbě

Návrh montáže zaujal celkem velký počet astrofografů s touhou vyzkoušet 3D tisk a vyrobit si svou montáž. Dle ohlasů si už minimálně sedm lidí montáž dle tohoto návrhu postavilo. Minimálně dalších sedm lidí si montáž staví nebo si na ní shání komponenty. A existuje určitě několik dalších lidí, kteří si montáž staví, nebo si ji postavili, aniž své zkušenosti sdíleli. Údaje o počtu postavených montáží a montáží ve výstavbě jsou pravděpodobně podhodnocené.

3.12 Budoucnost

Autor plánuje navrhnout deklinační vylepšení, které by umožnilo plno funkci navíc jako je go-to a pointace.

Další plánované vylepšení, které je momentálně ve vývoji, je ovládaní montáže přes wifi. Pro toto vylepšení se využívá esp32 jako mikrokontrolér. Montáž bude možno ovládat přes webové rozhraní. Webové rozhraní je funkční, ale nedaří se zprovoznit krokový motor přes ovládaný přes esp32.



Obrázek 32 Návrh webového rozhraní pro ovládání montáže

Vlastní ovládací deska montáže. Je momentálně v vývoji a pracuje na ní Jugalov Jesingov z Indie. Ovládací deska bude umožňovat ovládání montáže v režimu jedné osy a bude vylepšitelná, takže když do ní uživatel nahraje nový firmware (OnstepX), umožní ovládání deklinačního vylepšení a zároveň polární osu, což umožní použití dalších nových funkcí jako je go-to a pointace. Zároveň umožní ovládání montáže přes wifi a počítač. Také je možno použít ji jako měřič intervalů k zrcadlovce.

4 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo navrhnout malou přenosnou montáž, kterou bude moci amatérský astrofotograf vytisknout na 3D tiskárně za použití manuálů uvedených v práci a na webu (<https://www.printables.com/model/348574-og-star-tracker>). K tomu by mělo pomoci video, nahrané na (<https://www.youtube.com/watch?v=pRuXy7Ffp4g>).

Montáž dle tohoto návrhu sestrojilo 6 amatérských astronomů, kteří poskytli vhodnou zpětnou vazbu. Montáž je výrazně levnější než komerční montáž move shoot move která stojí na [15] 7120 Kč a zároveň má vyšší přesnost (na základě recenzí).

Nelze pominout ani přínos pro zpřístupnění astrofografie širšímu spektru nadšených astronomů amatérů, protože umožňuje širšímu množství lidí, kteří se zajímají o astrofotografii, montáž si postavit a vyzkoušet, protože za ni nemusí utrácet vysoké částky. To také umožní více lidem dostat se k astrofotografii nebo astronomii.

Stavba montáže svépomocí by mohla rozvinout zájem některých dospívajících o smysluplné využití 3D tisku a mohla by být též vhodnou náplň některých zájmových kroužků.

Celkově se podařilo splnit kritéria stanovená při návrhu montáže. Stavba a návrh montáže autora osobně hodně naučila o 3D tisku a poskytla mu cennou zkušenost s navrhováním montáží a testováním jejich funkčnosti.

Slovník pojmů a zkratek

FDM = Fused Deposition Modeling

RPM = otáčky za minutu

Driver = řadič krokového motoru

5 POUŽITÁ LITERATURA

1. Astrofotografie. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Astrophotography>
2. DrBob, Pitel. Chromatická aberace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2008 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_telescope
3. MELSHEIMER, Frank. Comparing Telescope Drive Technologies [online]. Longmont, Colorado, USA [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.dfmengineering.com/news_telescope_gearing.html
4. Astronomy-imaging-camera [online]. 2023 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://astronomy-imaging-camera.com/product/zwo-am5-harmonic-equatorial-mount>
5. HART, Phil. Phil Hart [online]. 1n. 1. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://philhart.com/star-adventurer-2i>
6. Stepper Motor Accuracy. Onstep wiki [online]. 1.10.2020 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://onstep.groups.io/g/main/wiki/16270>
7. Základy optických přístrojů 4 (Montáže). Přístrojová a optická sekce české astronomické společnosti [online]. 6.6.2013 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <http://posec.astro.cz/index.php/clanky/teorie/21-optbasic/28-zaklady-opticky-ch-pristroju-montaze>
9. Newtonian telescope. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Newtonian_telescope
10. Backlash in Telescope Mounts. The Blog Formerly Known as McWiki [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <http://themcdonalds.net/backlash-in-telescope-mounts/>
11. Byers Gears [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://byers.company/GearsPrecision.php>
12. ZWO MONO Cooled Astro Camera ASI 183 MM Pro. NOVEDALEKOHLEDY [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://www.novedalekohledy.cz/catalog/photo/camera/view/zwo_mono_cooled_astro_camera_asi_183_mm_pro_sensor_d_15_9_mm_ASI183MMPRO/

13. Sférická aberace. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sf%C3%A9rick%C3%A1_aberace
14. Stepper Motors. MAS.865 2018 How to Make Something that Makes (almost) Anything [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://fab.cba.mit.edu/classes/865.18/motion/steppers/index.html>
15. OG star tracker. *Printables* [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.printables.com/model/348574-og-star-tracker>

6 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH

Obrázek 1 Zrcadlovka Canon 500D	8
Obrázek 3 Schéma čočkového dalekohledu (refraktoru).....	8
Obrázek 4 Schéma Newtonova dalekohledu (reflektoru).....	8
Obrázek 6 Vznik chromatické aberace	9
Obrázek 5 Vznik sférické aberace	9
Obrázek 7 Princip paralaktické montáže	10
Obrázek 8 Princip azimutální montáže	10
Obrázek 9 Šnekový převod.....	12
Obrázek 10 Mikrokrokování - napravo chod bez mikrokroků a nalevo s mikrokrokováním	14
Obrázek 11 První vytištěný prototyp	15
Obrázek 12 Řez polární osou.....	16
Obrázek 13 První prototyp polárního klínu 1 nastavení azimut, 2 nastavení výšky	16
Obrázek 14 Nastavování výšky	18
Obrázek 15 Návrh řemenové převodovky	19
Obrázek 16 Druhý prototyp	19
Obrázek 17 Pohon - 1 Krokový motor (0,9°), 2 Driver tmc2208, 3 Arduino uno, 4 Step up modu.....	20
Obrázek 18 Ukázka softwaru na kontrolu montáže.....	21
Obrázek 20 První snímek získaný fotoaparátem Lumix fz1000 30 s 240 mm (35 mm ekvivalent) na tištěné montáži	22
Obrázek 19 První úspěšný test.....	22
Obrázek 21 Prototyp 3.5 - 1 vylepšené ložisko v azimutu, 2 vylepšené nastavování výšky, 3 umístění elektroniky pod polární klín	23
Obrázek 22 Čtvrtý prototyp - 1 Box na elektroniku, 2 Vylepšení nastavování výšky, 3A Vylepšené ložisko v azimutu, 4 Vylepšené ložisko v polární ose	24
Obrázek 23 Velká mlhovina v souhvězdí Orion vyfocená fotoaparátem Canon 500D a tair 3s 30(s)x120, na prototypu 4	25

Obrázek 24 Prototyp5 - 1 Vylepšené nastavování azimutu 2 Přidané boční půlkruhy ...	26
Obrázek 27 Test periodické chyby montáže star adventurer 2i.....	27
Obrázek 25 Test periodické chyby montáže.....	27
Obrázek 26 Test periodické chyby změřený Konardem Cermannem	27
Obrázek 28 Měření proměnné hvězdy s Nikon z50 250mm (autor Konard Cermann) .	28
Obrázek 29 Orion vyfocený na prototypu 5 montáže.....	28
Obrázek 30 Stránka vydání montáže na printables.....	31
Obrázek 31 Prezentace montáže na planetáriu.....	31
Obrázek 32 Návrh webového rozhraní pro ovládání montáže.....	31
Tabulka 1 Výpočet ceny prototypu 5.....	28
Tabulka 2 Zmínky o montáži na webech.....	30
Příloha 1 Výřez ze snímku pořizého na 300mm 120s tair 3s a canon 500D.....	36
Příloha 2 Výřez ze 60s snímku pořizený na 600mm Canon M100.....	36
Příloha 3 Obvod navržený Jugalovem Jesingovem.....	36

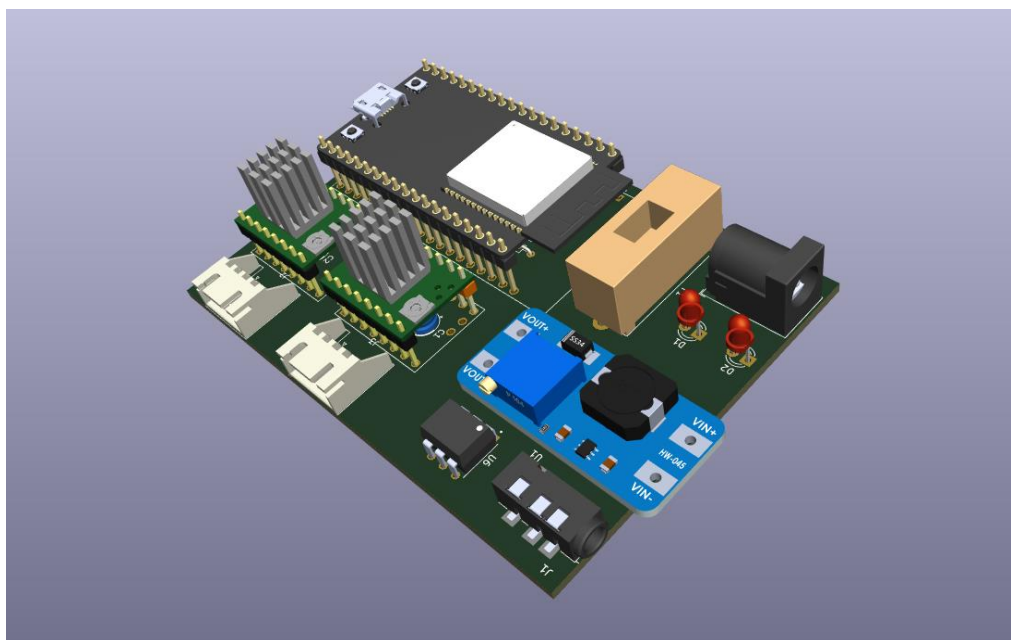
7 PŘÍLOHY



Příloha 1 Výřez ze snímku pořízeného na 300mm 120s tair 3s a canon 500D



Příloha 3 Výřez ze 60s snímku pořízený na 600mm Canon M100



Příloha 3 Obvod navržený Jugalovem Jesingovem