



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VÝVOJ REVOLVEROVÉHO ZÁSOBNÍKU BAREVNÝCH FILTRŮ

DEVELOPMENT OF COLOR FILTER WHEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Kilián

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Hurník

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Ondřej Kilián
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jakub Hurník
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vývoj revolverového zásobníku barevných filtrů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Barevné filtry mohou umožnit zvýšení kvality snímku ve smyslu potlačení pozadí, zvýšení kontrastu nebo izolace daného objektu apod. V některých aplikacích je třeba filtry rychle automaticky měnit – k tomu může sloužit např. revolverový zásobník. Dostupné revolverové zásobníky jsou přizpůsobené pro použití v astronomii nebo neumožňují instalaci filtrů o dostatečném průměru. Konstrukce specializovaného revolverového zásobníku umožní budoucí testování vlivu spektrálně–selektivní metody na přesnost a spolehlivost pasivního optického měřicího systému pro měření horkých výkolků.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je vývoj a realizace automatického revolverového zásobníku pro 7 barevných filtrů o průměru 52 mm ke kameře ZWO ASI 1600 mm osazené objektivem Zeiss Interlock Compact.

Díličí cíle bakalářské práce:

- identifikace parametrů, rešerše možných řešení, návrh variant konstrukčního řešení,
- výběr a zpracování nejvhodnější varianty, výroba,
- integrace elektroniky,
- otestování funkčnosti a spolehlivosti v laboratorních podmínkách.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkres sestavení, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukční řešením, následnou realizací a tvorbou ovládacího softwaru revolverového zásobníku pro barevné filtry. Toto řešení je konkrétně navrhováno pro kameru ZWO ASI 1600MM, objektivy ZEISS Interlock® Compact a optické filtry firmy Schneider-Kreuznach. Tato konkrétní konfigurace kamery a objektivu neumožňuje využití dostupných výrobků na trhu.

KLÍČOVÁ SLOVA

ZWO, Zeiss, revolverový, zásobník, barevné, filtry, Schneider, Kreuznach

ABSTRACT

This bachelor thesis aims to showcase designing process of the device and control software and subsequent realisation of a filter wheel for research applications, which is designed specifically for a ZWO ASI 1600MM camera, ZEISS Interlock® Compact lenses and optic filters produced by company Schneider-Kreuznach. This configuration of camera and lenses doesn't allow use of existing products on the market.

KEYWORDS

ZWO, Zeiss, electronic, filter, wheel, Schneider, Kreuznach

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KILIÁN, Ondřej. *Vývoj revolverového zásobníku barevných filtrů*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124411>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Jakub Hurník.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Jakobovi Hurníkovi za odbornou pomoc při zpracování této bakalářské práce a zajištění výroby tohoto zařízení pro následné praktické testování.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Jakuba Hurníka. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Dostupná řešení	14
2.1.1	ZWO Astronomy cameras	14
2.1.2	Thorlabs	16
2.1.3	Ostatní firmy	18
2.2	Parametry použitých součástí	19
2.2.1	Kamera	19
2.2.2	Objektiv	20
2.2.3	Filtry	22
2.2.4	Distanční kroužek	23
2.3	Aplikace	23
2.3.1	Požadovaná aplikace	23
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	25
3.1	Analýza problému	25
3.1.1	Shmutí dostupných řešení	25
3.1.2	Formulace problému	26
3.2	Cíle práce	27
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	28
4.1	Koncept 1	28
4.2	Koncept 2	29
4.3	Koncept 3	29
4.4	Převody	30
4.4.1	Třecí převod	30
4.4.2	Ozubený převod	30
4.4.3	Přímí převod	30
4.4.4	Řemenový převod	30
4.5	Zhodnocení	30
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	31
5.1	Konstrukce zařízení	31
5.1.1	Uchycení kamery a objektivu	31

5.1.2	Zásobník	32
5.1.3	Uchycení zařízení	32
5.2	Pohon	33
5.2.1	Motor	33
5.2.2	Přenos kroutícího momentu	34
5.3	Ovládání	35
5.3.1	Hardware	35
5.3.2	Software	37
6	DISKUZE	40
7	ZÁVĚR	42
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	45
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	46
11	SEZNAM TABULEK	47
12	SEZNAM PŘÍLOH A DIGITÁLNÍCH DAT	48

1 ÚVOD

Barevné filtry se používají k odfiltrování nebo propouštění určitých vlnových délek světelného spektra, od infračerveného záření, přes viditelné spektrum až po UV záření. Převážné užití těchto filtrů lze nalézt v astronomii, v experimentální optice a v různých aplikacích počítačového vidění.

Revolverové zásobníky se využívají k rychlé výměně barevných filtrů. Výměnu lze provádět automaticky, za použití elektroniky a elektrických motorů nebo manuálně. Tento typ výměny filtrů se nejčastěji používá v astronomii. Nejpoužívanější konfigurací je umístění zásobníku s filtry mezi kameru a objektiv, což v mnoha případech není možné.

Práce se bude zabývat konstrukcí, výrobou a programování řídicího softwaru zařízení pro rychlou výměnu barevných filtrů firmy Schneider-Kreuznach. Zařízení bude využito k výzkumu, který se zabývá možnostmi měření geometrie výkovků při výrobě. Toto zařízení bude řešit nekompatibilitu dostupných konkurenčních revolverových zásobníků se zadanou konfigurací kamery ZWO ASI 1600MM a objektivů ZEISS Interlock® Compact.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Dostupná řešení

Revolverové zásobníky pro barevné filtry se dělí na dva typy, a to na ručně poháněné a elektricky poháněné. K elektricky poháněným zásobníkům lze přidat další podkategorie, které charakterizují jejich vlastnosti, jako jsou například vysokorychlostní revolverové zásobníky. Tyto zásobníky mohou být prachotěsné i světlotěsné.

2.1.1 ZWO Astronomy cameras

Revolverové zásobníky firmy ZWO jsou vyráběny ve dvou produktových řadách. Tyto zásobníky jsou vyráběny z hliníkových slitin z důvodu relativní pevnosti a zároveň nízké váhy. Manuálně poháněný revolverový zásobník (MFW) firmy ZWO je schopný pojmout až 5 filtrů o průměru 1,25" [1]. Změna pozic je prováděna z boku rotací samotného kola, které je viditelné z venku (viz. obr. 2-1).



Obr. 2-1 MFW ZWO [1]

Druhou řadou je elektronicky poháněný revolverový zásobník, který se vyrábí ve dvou modelech, a to jsou EFW 7 x 2", který je schopen pojmout 7 filtrů o průměru 2" a EFW 5 x 2", který pojme 5 filtrů o stejném průměru jako předchozí model [2]. Oba tyto modely jsou poháněny malým krokovým motorem a jsou ovládány přes USB kabel spojený s počítačem. Tím, že se jedná o výrobek stejné firmy jako je výrobce kamery uvedené v zadání práce (ZWO ASI 1600MM), lze kameru i zásobník ovládat přes software ASI Studio, kde lze nastavit všechny požadované parametry pro funkci obou zařízení zároveň, nebo lze použít kompatibilní softwary třetích stran.



Obr. 2-2 Otevřený EFW 7 x 2" ZWO [2]

V této modelové řadě zásobníků dochází k výměně pozic za pomoci třecího převodu mezi krokovým motorem a gumovým čelem kola s filtry [2]. Tedy při rotaci hřídele motoru se přenáší kroutící moment na kolo s filtry kontaktním třením (viz obr. 2-2). Řídící elektronika je zabudována v zařízení. Oba produkty jsou koncipovány tak, aby zásobníky byly situovány mezi kamerou a objektivem k zajištění světlotěsnosti systému.

2.1.2 Thorlabs

V oblasti revolverových zásobníků pro barevné filtry má firma Thorlabs několik produktových řad. Tyto produkty jsou vyráběny z kombinace hliníkových slitin a plastů. Manuálních revolverových zásobníků jsou k dispozici dvě řady, a to jsou otevřené zásobníky a světlotěsné zásobníky. Otevřené zásobníky jsou jednoduchá kola se závity pro filtry o průměrech $\frac{1}{2}$ " a 1" s kapacitou 6 nebo 12 filtrů na jedno kolo [3]. Tento typ zásobníků je velice jednoduchý a tím pádem i velice levný.



Obr. 2-3 Otevřený manuální zásobník FW1A Thorlabs [3]

Druhou řadou manuálních zásobníků jsou světlotěsné zásobníky, které fungují na stejném principu, jako předchozí řada, ale jsou umístěny v ochranném válci [4]. Rotační mechanismus je chráněn krytkou, aby žádné nechtěné světelné záření nevniklo do systému. Tento zásobník je omezen na kapacitu 6 filtrů o průměru 1".



Obr. 2-4 Světlotěsný manuální zásobník LTFW6 Thorlabs [4]

Motorizované revolverové zásobníky této firmy jsou též rozdělené do dvou produktových řad. Tyto dvě řady jsou světlotěsné motorizované revolverové zásobníky a vysokorychlostní revolverové zásobníky.



Obr. 2-5 Otevřený motorizovaný zásobník FW102C Thorlabs [5]

Světlotěsné motorizované zásobníky jsou vyráběny ve dvou modelech, a to o kapacitě 6 filtrů o průměru 1" a 12 filtrů s průměrem 1/2" [5]. Celé zařízení je poháněno krokovým motorem s kontrolerem, který je součástí produktu. Kroučící moment z krokového motoru je přenášen přes šnekové ozubení na hřídeli motoru a čelní ozubení na obvodu kola s filtry. Ovládání je zajištěno přes vlastní software firmy, který je volně dostupný ze stránek výrobce nebo ovládáním přes externí softwary jako je například LabVIEW™. Také je možné ovládat toto zřízení přes tlačítka na horním ovládacím panelu. Výměna filtrů trvá od 0,5 s až po 2,5 s, což záleží na modelu a počtu pozic, přes které se posouvá. Kontroler je integrován v zařízení.



Obr. 2-6 Vysokorychlostní zásobník FW103H Thorlabs [6]

Vysokorychlostní revolverové zásobníky firmy Thorlabs jsou složeny ze dvou základních komponentů. Prvním komponentem je samotný zásobník o kapacitě 6 filtrů s průměrem 1" [6]. Přímo na osu kola s filtry je připojen krokový motor standartu NEMA 23 ze kterého je vyveden napájecí a ovládací kabel. Druhým komponentem je externí kontroler, do jehož je zapojen krokový motor a samotný kontroler je připojen k počítači. Ovládání je možné provádět pouze softwarově, a to za použití softwaru výrobce nebo LabVIEW™. Změna jednotlivých pozic je možná mezi 55–250 ms, záleží na použitém kontrolerů. Doporučeným kontrolerem je model BSC201 Thorlabs k zajištění nejvyšší efektivity [7].



Obr. 2-7 Kontroler BSC201 Thorlabs [7]

2.1.3 Ostatní firmy

Další firmy, které stojí za zmínku jsou například Atik cameras, QHY, QSI Imaging, Orion a Starlight Xpress. Ačkoliv se jedná o jiné firmy, tak konstrukční řešení těchto zařízení je podobné s firmami ZWO Astronomy cameras a Thorlabs. Na obr. 2-8 lze vidět zásobník firmy Atik cameras ATK0176FW, která má kapacitu 7 filtrů o průměru 36 mm [8].



Obr. 2-8 Motorizovaný zásobník ATK0176FW Atik cameras [8]

2.2 Parametry použitých součástí

2.2.1 Kamera

Kamera uvedena v zadání (ZWO ASI 1600MM) je monochromatická kamera převážně určená k astronomickému fotografování [9]. Je vybavena senzorem 4/3" CMOS (17,3 x 13 mm) o rozlišení 16 Mpx s rozsahem expozice od 32 μ s do 2000 s. Nejvyšší snímková frekvence při maximálním rozlišení je 23 snímků za vteřinu při 10 Bitové hloubce barev a 14,7 snímků za vteřinu při 12 Bitové hloubce barev.



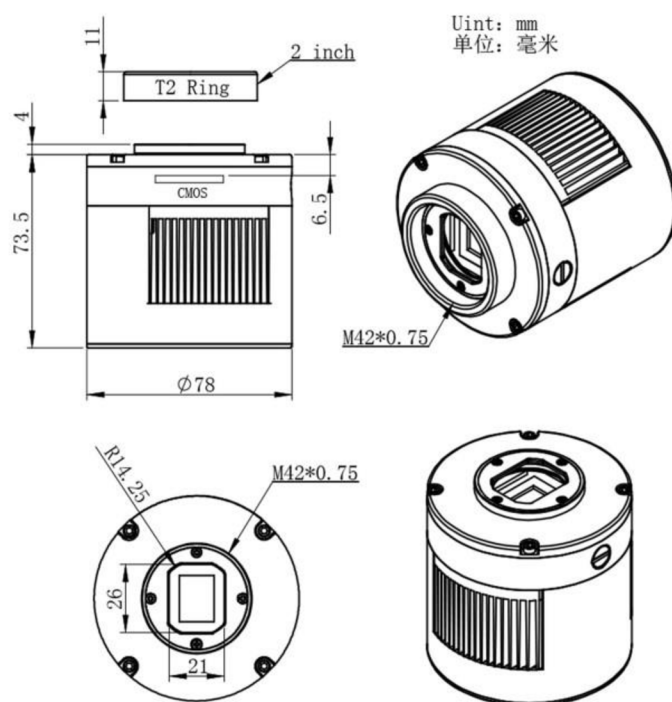
Obr. 2-9 Kamera ZWO ASI 1600MM (9)

Vstup a výstup je zajištěn pomocí jednoho USB 3.0 portu a dvou USB 2.0 portů přes které lze kameru i napájet [9]. Napájení kamery je možné i přes dedikovaný DC 12V/3A port. Ochranná schránka kamery je vyrobena z hliníku a celá kamera váží 410 g. Rozměry kamery jsou patrné z obr. 2-11. Z obrázku je také patrna vzdálenost senzoru od čela kamery 6,5 mm.



Obr. 2-10 Zadní strana kamery (9)

Chlazení senzoru je docíleno dvoustupňovým Peltierovým článkem, který umožňuje ochladit senzor kamery až o 45 °C pod teplotu okolí [9]. Vzniklé teplo je vyváděno ze systému žebrovým chladičem a ventilátorem (viz obr. 2-9, 2-10).



Obr. 2-11 Důležité rozměry kamery [9]

2.2.2 Objektiv

ZEISS Interlock® Compact je kvalitní řada objektivů pro kamery s „full frame“ senzorem (36 x 24 mm) o rozlišení až 42 Mpx [10]. Jejich celokovová konstrukce zajistí stabilitu a vysokou kvalitu fotografií. Užívají se především v metrologii, medicínských aplikacích, kontrole kvality nebo i pro policejní účely. Objektivy disponují zámky zaostření a clony, díky kterým jsou vhodné pro metrologické aplikace.



Obr. 2-12 Objektivy ZEISS Interlock® Compact [10]

Nejdůležitějším rozměrem uvedený výrobcem objektivů je „flange focal distance“ což je vzdálenost od dosedací plochy objektivu k senzoru kamery. Závity pro uchycení objektivu ke kameře (závit M42x1) a závity pro uchycení filtrů na konci objektivu (závit M52x1) jsou pro celou řadu stejné [10]. Další rozměry jsou uvedeny v tab. 2-1.

Tab. 2-1 Důležité rozměry objektivů

Model	Ohnisková vzdálenost	Max. clona	Min. pracovní vzdálenost	Max. průměr	Celková délka
Interlock Compact 2.8/21	21 mm	2,8	160 mm	74,4 mm	67 mm
Interlock Compact 2.4/25	25 mm	2,4	163 mm	74,4 mm	69,2 mm
Interlock Compact 2/35	35 mm	2,0	230 mm	74,4 mm	53,98 mm
Interlock Compact 2/50	50 mm	2,0	370 mm	74,4 mm	54 mm
Interlock Compact 2.4/85	85 mm	2,4	685 mm	74,4 mm	89,77 mm

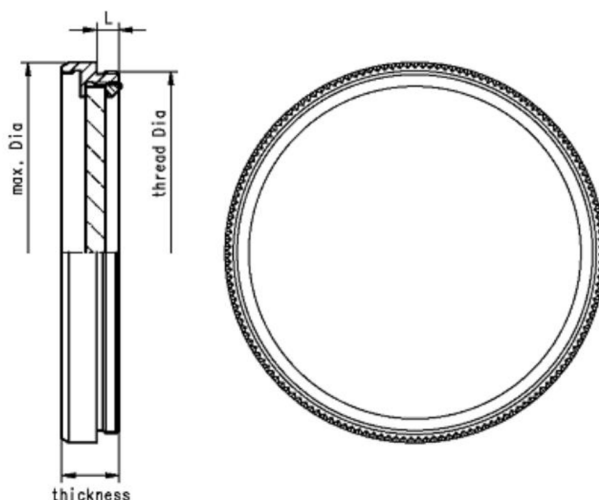
2.2.3 Filtry

Optické filtry lze nalézt v široké škále aplikací od výzkumných projektů až po rekreační fotografování. V tomto konkrétním případě se jedná o (bandpass) pásmové filtry firmy Schneider-Kreuznach, které jsou určeny k propouštění světelného záření o dané vlnové délce, a to i v infračerveném nebo UV spektru [11]. Tyto zadané filtry byly vybrány kvůli jejich vysoké kvalitě a kompatibilitě s objektivem.



Obr. 2-13 Pásmové filtry Schneider-Kreuznach [11]

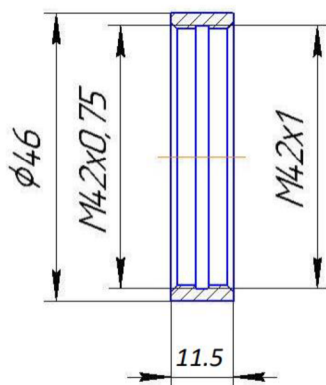
Konkrétní rozměry použitých filtrů jsou v popisku obr. 2-14. Obroučky těchto filtrů jsou vyráběny z hliníkových slitin a samotná skla jsou vyráběna ze skleněných vrstev, optických pojidel a specializovaných chemických směsí [11].



Obr. 2-14 Diagram filtru; max. Dia (max. průměr) = 54 mm; thread Dia (průměr závitu) = M52x0,75; L = 2,5 mm; thickness (tloušťka) = 7 mm [11]

2.2.4 Distanční kroužek

Distanční kroužek je součást vyrobena ústavem konstruování FSI VUT, která slouží ke spojení objektivu a kamery a k dodržení „flange focal distance“ mezi koncovou plochou objektivu a senzorem kamery. Rozměry distančního lze vidět na obrázku (viz obr. 2-15)



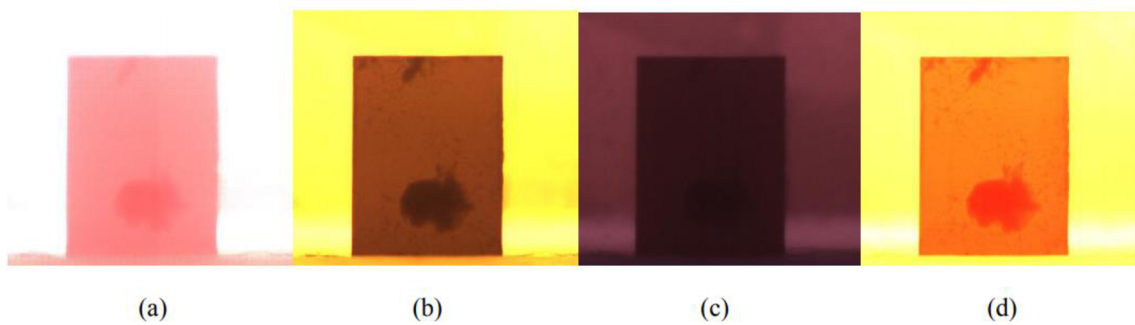
Obr. 2-15 Distanční kroužek

2.3 Aplikace

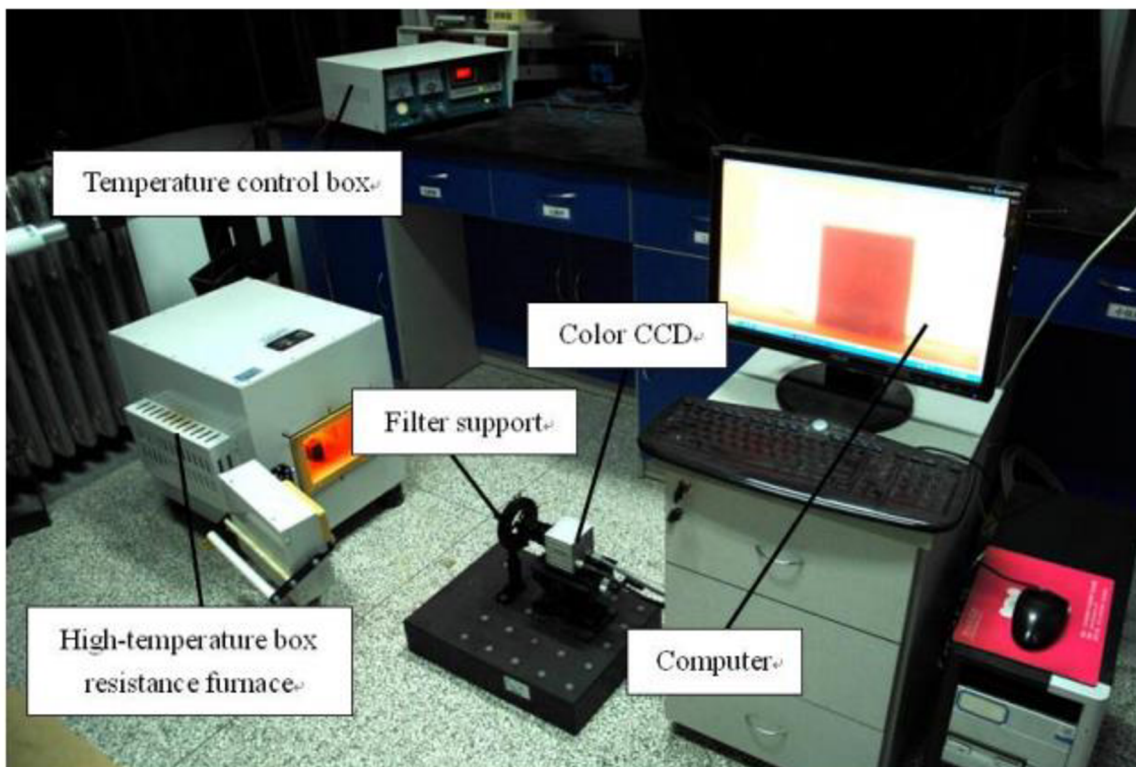
Obvyklé užití revolverových zásobníků pro barevné filtry lze nalézt v astronomii, v experimentální optice a v různých aplikacích počítačového vidění. Především jsou důležité v aplikacích, u kterých je nutná častá nebo rychlá výměna filtrů. Standardní konfigurace se skládá z kamery a objektivu, který je upevněn k externímu rámu nebo stojanu. Následně je zásobník umístěn mezi kameru a objektiv, ke kterým je buďto přímo přišroubován přes samotné závity na kameře a objektivu, nebo je připevněn přímo k rámu celého zařízení. Díky této konfiguraci lze použít co nejmenší průměry filtrů a je zajištěna světlotěsnost.

2.3.1 Požadovaná aplikace

Toto konkrétní navrhované zařízení bude použito pro výzkum možnosti měření geometrie výkovku přímo v procesu výroby. Pro tuto aplikaci se jeví jako vhodný přístup využití principu pasivní fotogrammetrie [12] [13]. Kontrast se liší v závislosti na teplotě a použitém barevném spektru [14]. Zde je zapotřebí rychlá kontinuální výměna filtrů k zjištění, při jaké vlnové délce světelného záření má výkovek nejlepší kontrast. Pro získávání těchto informací se využívá technologie počítačového vidění. Za použití algoritmu je počítač schopen detekovat hrany výkovků, pokud je dosaženo správného kontrastu (viz. obr 2-16). Příklad pořizování snímků pro tento experiment lze vidět na obrázku (viz obr. 2-17). Teplota zkoumaných výkovků se pohybuje mezi 850–1200 °C.



Obr. 2-16 Příklad použití barevných filtrů; (a) červený filtr, (b) zelený filtr, (c) modrý filtr, (d) infračervený filtr [14]



Obr. 2-17 Příklad experimentu; Temperature control box – ovladání pece, Color CCD – kamera, Filter support – držák filtrů, High-temperature box resistance furnace – Odporová pec, Computer – počítač [14]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

3.1.1 Shrnutí dostupných řešení

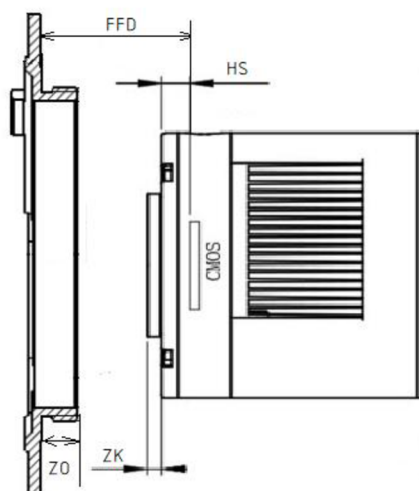
Všechna konkurenční řešení jsou v konfiguraci se zásobníkem mezi kamerou a objektivem a je použit elektrický krokový motor kvůli jeho jednoduchosti ovládání, dostupnosti a schopnosti držet jednotlivé pozice relativně jednoduše díky jeho konstrukci. Také mají podobný základní princip otáčejícího se kola s filtry na hřídeli poháněné externím zdrojem kroutícího momentu. Celá zařízení se snaží být co nejvíce symetrické z důvodu zajištění co nejmenších klopných momentů působících na upevňovací aparát. Materiál součástí u dostupných řešení je nejčastěji kombinace hliníku a plastů, kde kola s filtry jsou většinou plastové z důvodu nízké váhy, a tedy nízký setrvačný moment.

Přenos kroutícího momentu je zajištěn několika způsoby. Jeden z nich je řešení přímým spojením kola s filtry s hřídelí motoru. Toto řešení je vhodné především u vysokorychlostních zásobníků, kde je tímto způsobem zredukován počet součástí, tím i moment setrvačnosti celé soustavy. Další z možných způsobů je použití ozubených převodů, které umožňují volbu různých převodových poměrů a také zajistí synchronnost převodu. Tato vlastnost není přítomna u třecích převodů u dostupných řešení nízkorychlostních zásobníků.

3.1.2 Formulace problému

Vzhledem k požadované konfiguraci součástí není možné použít žádný konkurenční produkt, a to z několika důvodů. První důvod je omezený prostor mezi objektivem a kamerou. Započítá-li se délka závitů na kameře a objektivu a hloubka ve které je umístěn senzor v kameře, tak zbude maximální použitelný prostor pouze 3 mm do kterého se filtry nevlezou, jak je patrné z rovnice (1) a obrázku (viz. obr. 3-1). Z tohoto důvodu je konfigurace umístění zásobníku mezi kameru a objektiv nemožná. Z toho vyplývá, že zásobník musí být umístěn až za objektivem, ale musí být co nejbliž, aby nedošlo k omezení průchodu světelného záření.

$$l = FFD - HS - ZO - ZK = 18 - 6,5 - 4,45 - 4 = 3 \text{ mm} \quad (1)$$



Obr. 3-1 Diagram prostoru mezi kamerou a objektivem, l – prostor pro filtr, FFD - flange focal distance, ZO – závit objektivu, ZK – závit kamery, HS – hloubka senzoru

Druhý z důvodů jsou špatné rozměry děr v kolech pro filtry, které jsou ve všech případech příliš malé. Kvůli nutnosti umístění filtrů až za objektiv je nutné použít velké filtry. V případech kol pro 1/2", 1" a 1,25" zadané filtry nepřicházejí v úvahu. V případě kol pro 2" filtry nastává problém v uchycení kde jsou použity závity M48x0,75, ale zadané filtry mají uchycovací závit M52x0,75. Filtry M52 jsou minimální doporučené filtry pro umístění před zadané objektivy. Jedním z parametrů, který je zřejmý z konkurenčních řešení, je možnost umístit celé zařízení s objektivem i kamerou na stativ. Tato možnost značně usnadní manipulaci a polohování celého zařízení.

Materiál revolverového zásobníku, vzhledem ke konkrétní aplikaci, je nutný vyrobit z hliníku. Hliník je vhodný zejména kvůli jeho nízké hmotnosti. Taktéž je nutné zajistit prachotěsnost, odolnost vůči vyšším teplotám a základnímu mechanickému opotřebení zařízení. Rychlost výměny filtrů mezi jednotlivými pozicemi není zapotřebí příliš vysoká kvůli omezením kamery, která je schopna snímat pouze 14,7 snímků za vteřinu při maximálním rozlišení a toto je důležité, kvůli charakteru experimentů, ke kterým je toto zařízení určeno.

3.2 Cíle práce

Cíle:

- Vytvoření zařízení pro výměnu daných barevných filtrů pro daný typ kamer a objektivů pro které nelze použít konvenční řešení.
 - Vytvoření koncepčních řešení a výběr z nich.
 - Zajištění podkladů pro výrobu.
- Vytvoření ovládacího softwaru pro ovládání zařízení a kamery.
 - Zajištění cyklické funkce pro pořizování snímků.
- Testování celého systému.

Parametry:

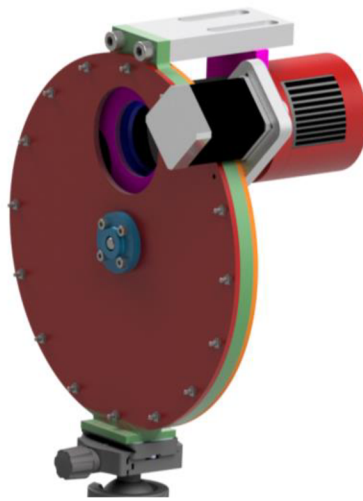
- Kapacita sedmi filtrů Schneider-Kreuznach M52x0,75
- Světlotěsnost celého zařízení
- Zajištění základní odolnosti vůči vyšším teplotám z důvodu charakteru použití zařízení
- Zajištění těsnosti zařízení proti prachu
- Kamera ZWO 1600MM
- Objektivy řady ZEISS Interlock® Compact

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Vzhledem k nutnosti umístit kolo s filtry před objektiv, rozpracované koncepty se liší pouze v umístění uchycení celého zařízení a použitého systému pro přenos kroutícího momentu pohonu. Většina použitých součástí je velice podobná mezi různými koncepty z důvodu jejich praktičnosti. Kolo s filtry je ve všech konceptech stejné.

4.1 Koncept 1

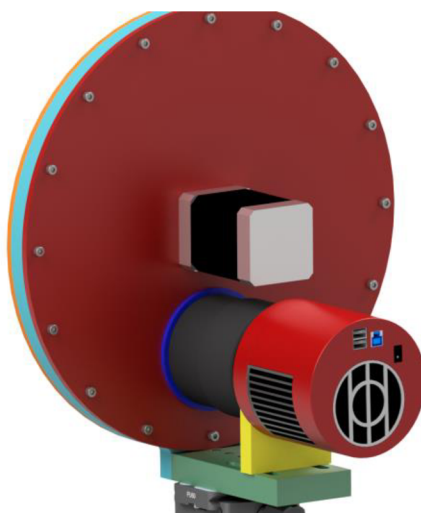
Koncept 1 je řešen tak, aby připomínal rozvržení ostatních zásobníků. Kamera s objektivem jsou připevněny k zásobníku v horní části a uchycení ke stativu je situováno v dolní části. Uchycení kamery a objektivu je provedeno přes objímku uchycenou na distančním kroužku mezi kamerou a objektivem, která drží jejich váhu. Následně je tato objímka uchycena k ližině, díky níž je možné měnit vzdálenost mezi zásobníkem a kamerou pro použití jiných objektivů různých délek. Motor je připevněn na jednu ze stěn zásobníku pomocí držáku.



Obr. 4-1 Koncept 1

4.2 Koncept 2

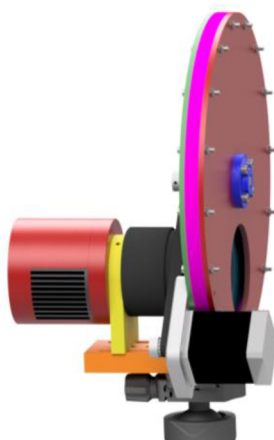
Koncept 2 je obrácený koncept 1 s pár přidávanými vylepšeními. Uchycení kamery a objektivu je řešeno stejně jako u konceptu 1 akorát vzhůru nohama. To znamená, že váha kamery a objektivu už není přenášena přes šrouby v ližině a objímce, ale na dvou dosedacích plochách mezi těmito součástmi. Uchycení ke stativu je tentokrát řešeno přímo na ližině, a to ve více možných pozicích z důvodu uchycení pod těžištěm. Kolo s filtry je v tomto konceptu přímo připevněno k hřídeli motoru. Touto konfigurací je možno podstatně snížit počet součástí.



Obr. 4-2 Koncept 2

4.3 Koncept 3

Koncept 3 kombinuje všechna pozitiva předchozích dvou variant. Uchycení kamery a objektivu je řešeno jako ve druhém konceptu. Motor je na druhou stranu upevněn stejným stylem jako v konceptu 1, pouze umístěn níže.



Obr. 4-3 Koncept 3

4.4 Převody

4.4.1 Třecí převod

Výhodou třecích převodů je jejich jednoduchost. Na druhou stranu zde není zajištěna synchronnost převodu, která je zde nutností. Příkladem tohoto převodu je revolverový zásobník firmy ZWO (viz. obr. 2-2).

4.4.2 Ozubený převod

Převody přes ozubená kola nebo mezi ozubeným kolem a šnekem jsou velice přesné při přenášení kroutícího momentu a je zajištěna synchronnost převodu, ale jsou náročné na výrobu. Příkladem tohoto převodu je zásobník firmy Thorlabs (viz. obr. 2-5).

4.4.3 Přímí převod

Jde o přímé spojení dvou hřídelů nebo součástí a hřídele. U tohoto typu převodů nelze měnit převodový poměr. Příkladem je vysokorychlostní převod firmy Thorlabs nebo koncept 2 (viz. obr. 2-6, 4-2)

4.4.4 Řemenový převod

Vzhledem k nutnosti zajištění synchronnosti převodu přichází v úvahu pouze řemenový převod s ozubeným řemenem. Tento typ převodu přináší výhody ozubeného převodu, je jednodušší na instalaci kvůli široké řadě normalizovaných součástí. Příklad tohoto převodu je vidět u konceptů 1 a 3 (viz. obr. 4-1, 4-3).

4.5 Zhodnocení

Vybraným konceptem se stal koncept 3 díky jeho efektivní konstrukci, nízkému klopnému momentu působícím na stativ a jeho rozmístění komponentů, které není tak optimální u ostatních konceptů. Řemenový převod s ozubeným řemenem byl zvolen k přenosu kroutícího momentu mezi motorem a hřídelí kola s filtry kvůli synchronnosti převodu, jednoduché instalaci a výrobě a kvůli možnosti vylepšení motoru v budoucnu, což není u konceptu 2 možné.

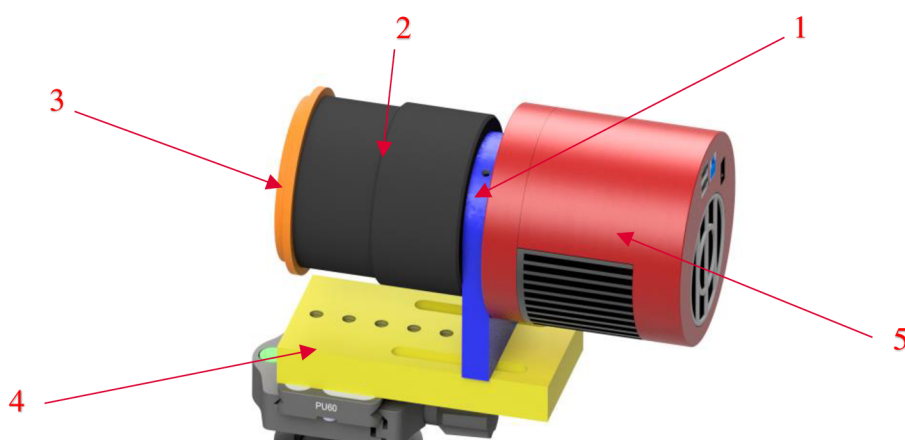
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Celé toto zařízení je složeno z několika základních podsestav, kde každá z nich splňuje určitou funkci. Toto řešení revolverového zásobníku na barevné filtry obsahuje kromě samotné konstrukce i softwarovou stránku zařízení. Veškeré normované hodnoty byly zjištěny z učebnice Základů konstruování a Výběrů z norem [15][16].

5.1 Konstrukce zařízení

5.1.1 Uchycení kamery a objektivu

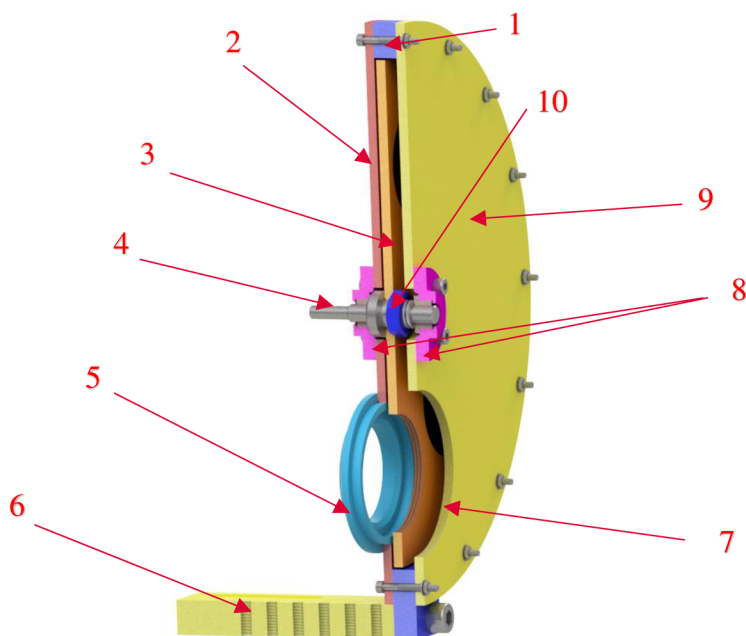
Uchycení kamery a objektivu je uskutečněno na dvou místech. Jedno z míst je držák kamery (modrá součást viz. obr. 5-1) objímající distanční kroužek, který je připevněna na ližinu za pomoci dvou šroubů M6 (žlutá součást viz. obr. 5-1), které byly zvoleny pro jejich životnost kvůli časté demontáži. Druhé z míst kroužek objektivu (oranžová součást viz. obr. 5-1), který zapadá do díry ve stěně zásobníku, kvůli zajištění světlotěsnosti. Distanční kroužek je umístěn do držáku kamery s vůlí, aby bylo možné vyrovnat malé nepřesnosti vůči zásobníku. Dva stavěcí šrouby po utažení zajistí pozici distančního kroužku, kamery a objektivu.



Obr. 5-1 Schéma uchycení kamery a objektivu, 1 – držák kamery, 2 – objektiv, 3 – kroužek objektivu, 4 – ližina, 5 - kamera

5.1.2 Zásobník

Kryt zásobníku je sestaven z několika vrstev. Centrální rám, na který jsou připevněny dvě stěny zásobníku pomocí sady šroubů s maticemi M3, a který je připevněn k ližině pomocí dvou šroubů M8 (viz. obr. 5-2). Mezi centrálním rámem a stěnami zásobníku jsou umístěny dva tenké papírové těsnění k zajištění světlotěsnosti a prachotěsnosti. Mezi těmito součástmi je jediný rovný styk bez tvarového elementu, který by zajistil světlotěsnost a prachotěsnost.



Obr. 5-2 Řez zásobníkem, 1 – sendvič, 2 – vnitřní stěna, 3 – kolo pro filtry, 4 – hřídel, 5 – kroužek objektivu, 6 – ližina, 7 – místo pro ochranný filtr, 8 – pouzdra s ložisky, 9 – vnější stěna, 10 - matice

Kolo s filtry je umístěno na centrální hřídel a zajištěno pomocí matice M12, kvůli zajištění dostatečné třecí síly, aby nedošlo k posunutí kola s filtry. Tato hřídel je následně umístěna ve dvou bronzových třecích ložiscích PSMF 081208 A51 firmy SKF, které jsou následně připevněny ke stěnám zásobníku přes příruby kvůli stavitelnosti a vyrovnání možných nepřesností výroby. Ty jsou přišroubovány přes 4 šrouby M4 každá (viz obr. 5-2). Na vnější stěně je následně umístěn ochranný filtr Haida NanoPro MC 72 mm k zajištění prachotěsnosti celého zařízení (viz. obr. 5-2 pozice 7). Přes otvor, ve kterém je umístěn tento ochranný filtr je možné provádět výměnu filtrů na kole s filtry. Na otvor druhé stěny dosedá kroužek objektivu a tím uzavírá celý zásobník. Tento celý zásobník má celkovou kapacitu 7 filtrů.

5.1.3 Uchytení zařízení

Celé zařízení je upevněno ke stativu, nebo jakékoli jiné alternativě, přes jeden ze stativových závitů 1/4-20 UNC které jsou v ližině. Těchto závitů je na ližině 6 pro optimální upevnění zařízení na stativ.

5.2 Pohon

5.2.1 Motor

Pro pohon tohoto zařízení byl zvolen krokový motor z důvodu lehké ovladatelnosti a možnosti použití pozic kroků motoru, jako pozice filtrů. Krokové motory se dělí do řad standartu NEMA podle velikosti. V tabulce lze vidět několik vybraných motorů vzhledem k jejich výkonu a dosažitelných otáček (viz. tab. 5-1). První dva motory jsou standartu NEMA 17 a třetí motor je standartu NEMA 23. Pro výpočet teoretických otáček za minutu byly použity vzorce uvedené níže. Moment setrvačnosti byl vypočítán pomocí programu Autodesk Inventor, kde filtry byly nahrazeny skleněnými disky o stejné hmotnosti. (viz. obr. 5-3). Všechny uvedené motory mají krokový úhel $\varphi=1,8^\circ$.

$$\alpha = \frac{M}{I} [\text{rad} * \text{s}^{-2}]; \varphi = \frac{2 * \pi}{200} [\text{rad}]; t = \sqrt{\frac{2 * \varphi}{\alpha}} [\text{s}]$$

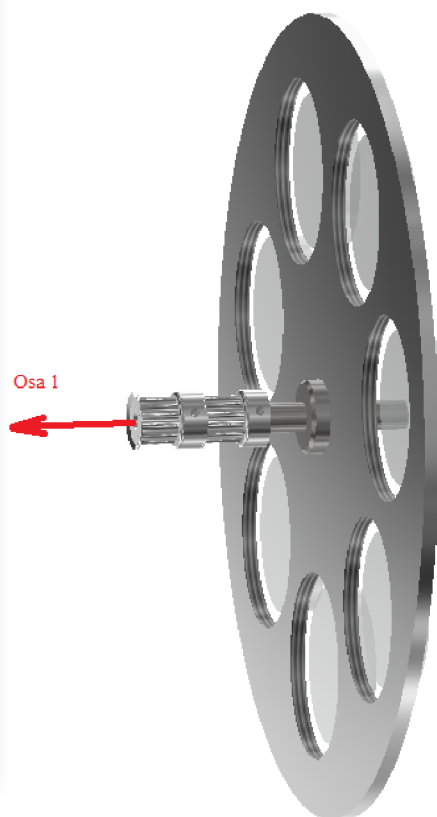
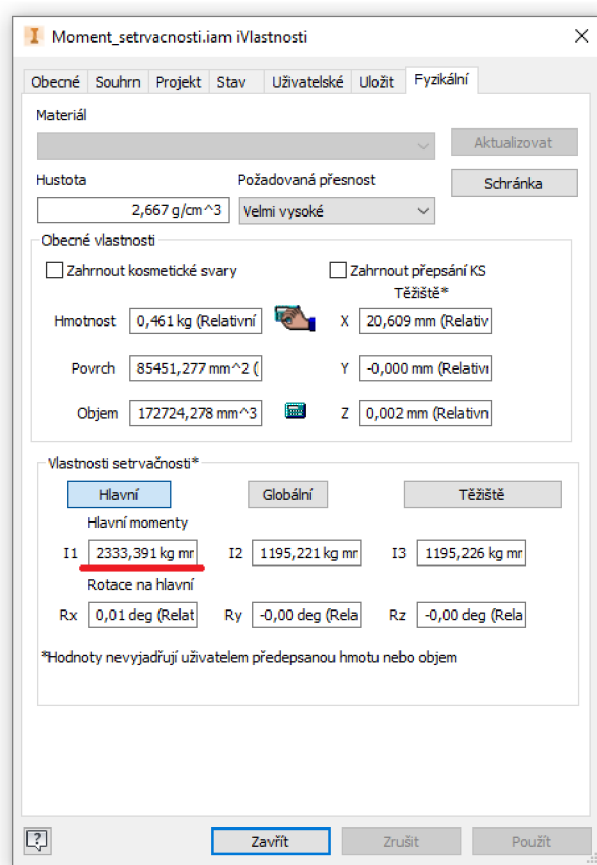
$$\omega = \frac{2 * \pi}{200 * t} [\text{rad} * \text{s}^{-1}]; n = \frac{\omega * 60}{2 * \pi} [\text{min}^{-1}]$$

$$n = \frac{60}{200 * \sqrt{\frac{4 * \pi * I}{200 * M}}} [\text{min}^{-1}]; FPS = \frac{n * 7}{60} [\text{s}^{-1}]$$

α – úhlové zrychlení, φ – úhel natočení, t – čas otočení, ω – úhlová rychlost, n – otáčky, M – krouticí moment, I – moment setrvačnosti, FPS – snímky za vteřinu [17]

Tab. 5-1 Tabulka krokových motorů

Název motoru	Statický krouticí moment [Nm]	Krouticí moment za chodu [Nm]	Teoretické otáčky za minutu	Teoretické FPS
HS 200 1716 0150	0,33	0,27	12,87	1,5
SX17-1005VLQCEF	0,56	0,43	18,54	2,16
HY 200 2226 0250	1,1	0,94	24,02	2,8



Obr. 5-3 Moment setrvačnosti

Z těchto motorů byl vybrán motor na základě jeho výkonu a dostupnosti. Uvedený kroutící moment za chodu je nejnižší hodnota v rozmezí 30-120 ot./min vyčteny z tabulek momentových charakteristik dodaných výrobcem motorů. Po konzultaci s vedoucím práce se rozhodlo o použití krokového motoru SX17-1005VLQCEF, u kterého 18,54 ot./min (2,16 snímku za vteřinu) bylo prohlášeno za dostatečné.

5.2.2 Přenos kroutícího momentu

Přenos kroutícího momentu je zajištěn pomocí ozubeného řemenu 3M-330-9 HTD ContiTech a dvou řemenic 12-3M-9 1F ContiTech. Tato konfigurace řemenu a řemenic bylo vypočteno pomocí programu ContiTech Suit 7.4 do kterého byly zadány vybrané řemenice s osovou vzdáleností a požadované otáčky a z tohoto lze vyčíst doporučená šířka a délka řemene s přenášeným výkonem (viz. obr. 5-4). Pro bezpečnost řemene byla použita vypočítaná šířka řemenu vůči zvolené šířce řemenu, jak lze vidět ve vzorci níže.

$$k_s = \frac{s}{s_{min}} = \frac{9}{5,04} = 1,79$$

s – šířka řemene, s_{min} – minimální šířka řemene, k_s – bezpečnost řemene

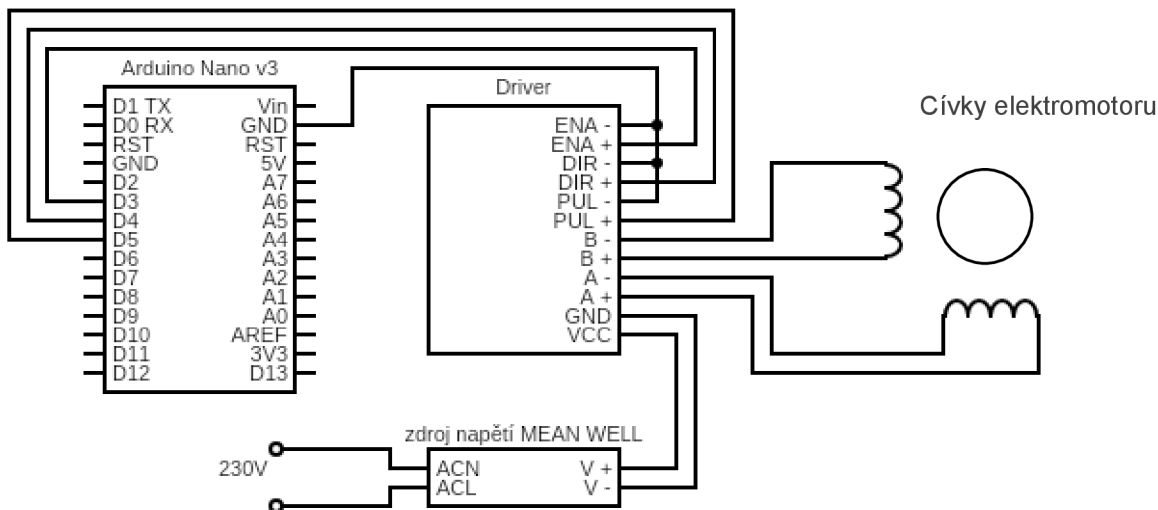
Belt			
Belt nature	Timing belt	Belt profile	HTD
Belt type	CONTI SYNCHROBELT	Tooth pitch	3M
Geometry			
Delete input fields			
Small pulley		Large pulley	
Pitch diameter	dwk 11,46 mm	Pitch diameter	dwg 11,46 mm
Number of teeth	zk 12	Number of teeth	zg 12
Speed	nk 35,19 1/min	Speed	ng 35,19 1/min
Transmission ratio	i 1,00	Required belt length	Lwgef
Centre distance	a 147,00 mm	Belt length	Lw 330,00 mm
Power			
Delete input fields			
Small pulley		Large pulley	
Torque	Mk 0,54 Nm	Torque	Mg 0,54 Nm
Transmission power	P 0,002 kW	Required belt width	bgef 9,00 mm
Given service factor	C0gef 1,00 Aid	Service condition	High shock loading
Result			
Show total result			
Calculated belt width	berr 5,04 mm	Total span tension	Fu 94,72 N
Chosen belt width	baus 9,00 mm	Total axle load	Fv 132,61 N
Overall service factor	C0er 1,36	Static belt tension	Fstat 66,31 N
Power rating	Pr 0,00 kW	Ideal value frequency	f 184,65 Hz
CONTI HTD 330 - 3M - 9 - SYNCHROBELT			

Obr. 5-4 Výpočet délky a šířky řemene

5.3 Ovládání

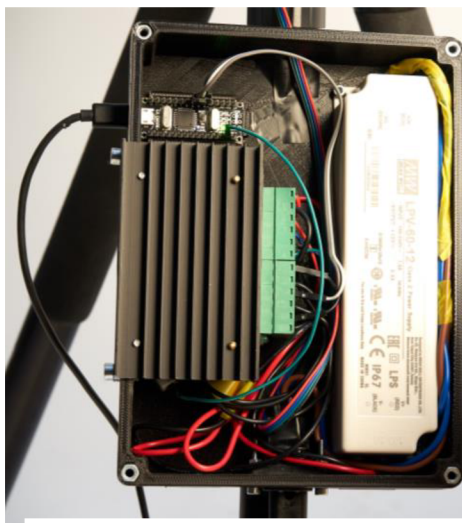
5.3.1 Hardware

Z důvodu nutnosti synchronizace snímkování s posuvy filtrů je motor a kamera ovládána z jednoho počítače. Pro ovládání elektromotoru byl použit zdroj napětí MEAN WELL 12V 18W IP67, kontroler pro krokové motory 4A TB6600 a pro ovládání tohoto kontroleru bylo použito Arduino Nano, které je připojeno přes USB k počítači. Zapojení obvodu mezi jednotlivými komponenty lze vidět na obrázku (viz. obr. 5-5). Pro ovládání kamery je zapotřebí pouze USB 3.0 kabel propojující kameru s počítačem. Všechny komponenty pro ovládání motoru jsou umístěny v plastové krabičce vytisknuté na 3D tiskárně (viz. obr. 5-6). Tato krabička má výstup s konektorem do sítě IEC 60320 C7, do kterého se zapojí kabel ze zásuvky.



Obr. 5-5 Zapojení ovládání krokového motoru

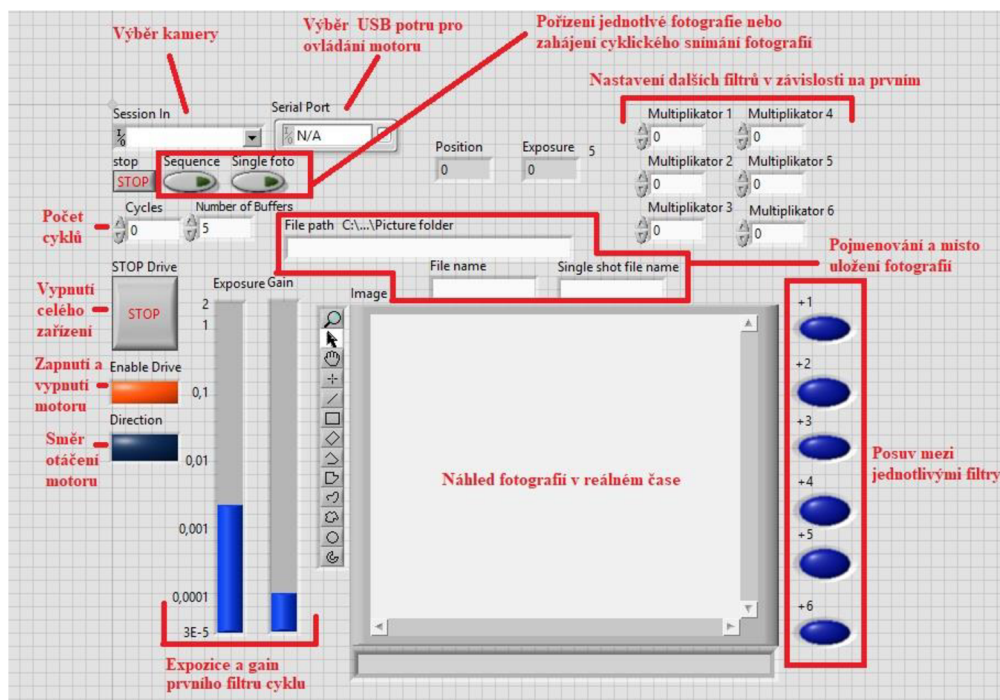
Kontroler (driver) motoru funguje ve dvou napětích, 5V je v ovládacím obvodu vycházející z Arduino Nano a 9-40V je k dispozici v obvodu, který je spojený s cívkami motoru. Pro ovládání motoru lze použít více nastavení kontroleru v oblasti procházejícího proudu, který byl zvolen na 1,7 A (maximální doporučený proud udávaný výrobcem motoru), a také je zde možnost mikro kroku což umožňuje větší přesnost zvýšením počtu možných pozic natočení hřídele motoru. Užité nastavení pro tuto konfiguraci je 800 kroků na otáčku. Toto nastavení lze provádět na 6 spínačích z boku kontroleru. Ovládací obvod má tři základní funkce a to jsou: (ENA+/-) „enable“ obvod, který zapíná „1“ a vypíná „0“ přívod proudu do motoru, (DIR +/-) směrový obvod, který ovládá směr otáčení motoru a (PUL +/-) obvod jednotlivých pulzů pro motor kde každá změna signálu z „0“ na „1“ a zpět na „0“ pootočí hřídel motoru o jeden krok. Každá z těchto funkcí má „+“ konektor připojen k digitálnímu výstupu (D3 – D5) na logické desce Arduino a „-“ konektor připojen k zemi na Arduino.



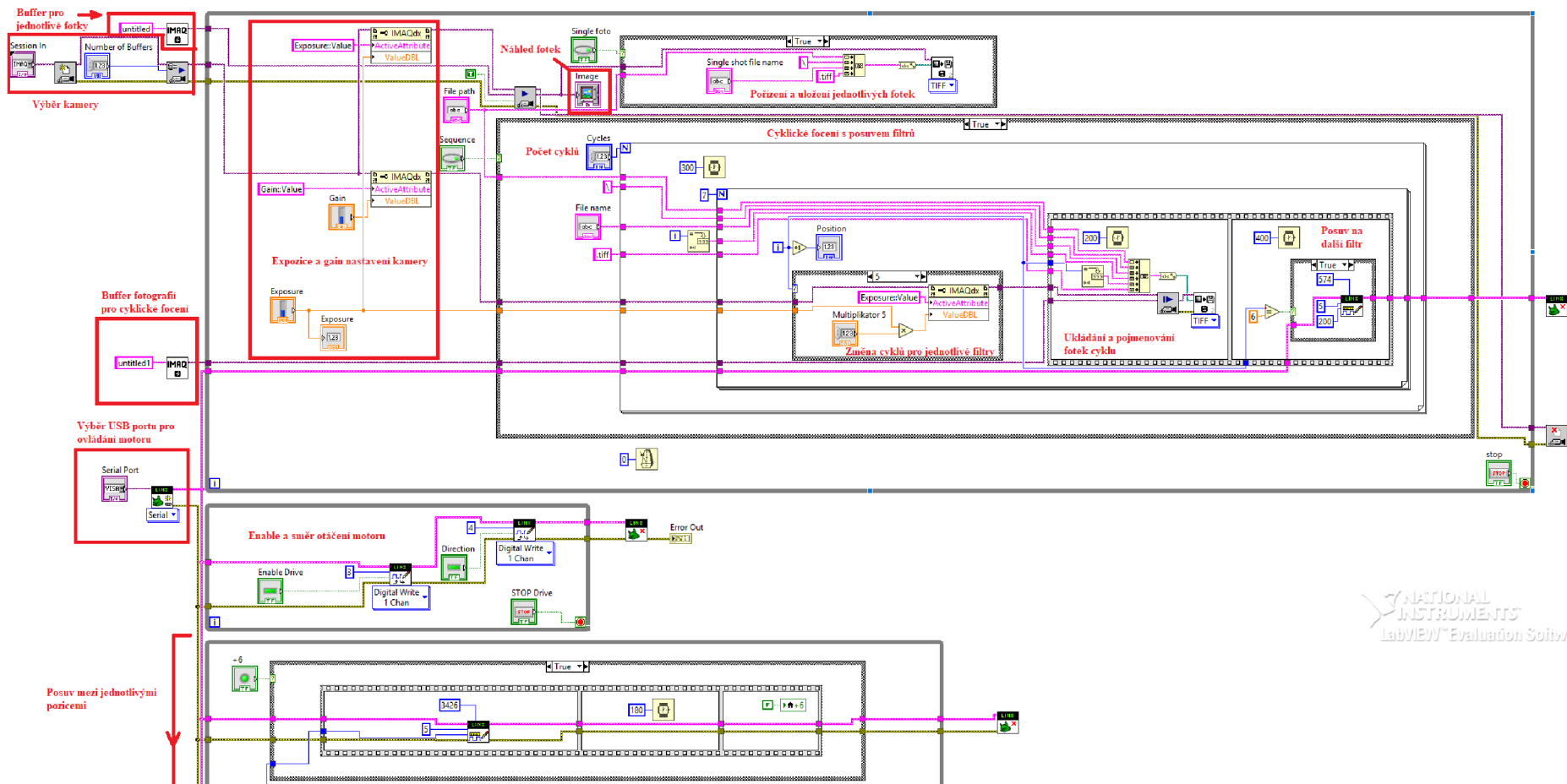
Obr. 5-6 Otevřená krabička s elektronikou

5.3.2 Software

Pro vytvoření ovládacího softwaru byl zvolen program LabVIEW™ kvůli jeho kompatibilitě s Arduinem Nano za pomoci Addonu Digilent LINX a zároveň s kamerou, kvůli jeho přívětivému a jednoduchému uživatelskému prostředí a možnosti synchronizace motoru s kamerou. Formát ve, kterém se pořízené fotografie ukládají, je .tiff. Výhodou tohoto formátu je vysoká kvalita a nulová ztráty, ale nevýhodou je jeho velikost. Popsaný diagram a uživatelské prostředí lze vidět na obrázku (viz. obr. 5-7, 5-8). Pořizovat fotografie je možné jednotlivě s výběrem požadovaného filtru, nebo cyklicky za použití všech filtrů na kole s filtry. Tyto fotografie se ukládají postupně s označením o kolikátý cyklus se jedná a jaký filtr byl zrovna použit. Nastavení expozice a gainu pro jednotlivé filtry je závislé na prvním filtru cyklu, a to přes jednotlivé multiplikátory. Tlačítko pro vypnutí a zapnutí motoru je zde z důvodu jednoduché ruční kalibrace počáteční pozice kola s filtry, aby bylo možné s tímto kole volně otáčet.



Obr. 5-7 Popsané uživatelské prostředí ovládacího programu



Obr. 5-8 Popsaný diagram programu v prostředí LabVIEW

Základní princip ovládání motoru spočívá v posílání čtvercové vlny o určité frekvenci (200 Hz, zjištěno při testování) po určitou dobu v milisekundách, která závisí na počtu pozic filtrů, o které je zapotřebí posunout kolo s filtry. Vzhledem k tomu, že kolo s filtry má 7 pozic a motor má standardně 200 kroků, nebo při použití mikro kroků bylo zvoleno 800 kroků (z možných 400, 800, 1600, 3200, 6400), jako kompromis mezi přesností a krouticím momentem. Z toho lze vidět nutnost korekce pro každou otáčku, která je započítána pro poslední posuv v cyklu skládající se ze 7 posuvů, tj. klasický posuv trvá 571 ms a korekční posuv má 574 ms. Celková doba pořízení fotografie nejvíce závisí na době expozice. Pauzy, které jsou v diagramu mezi 200-400 ms mezi jednotlivými posuvy a cykly, jsou zde kvůli době zpracování a ukládání fotografií a době potřebné pro zpracování příkazů skrze Arduino nebo kameru. Veškeré hodnoty, pro ovládání celého zařízení a kamery, vycházely z předpokládaných hodnot a následně iteračně upraveny při testování zařízení.

$$t_{otáčky} = \frac{k}{f} * 1000 [ms]; t_{posuv} = \frac{t_{otáčky}}{7} [ms]$$

k – počet kroků, f – frekvence, $t_{otáčky}$ – doba otáčky, t_{posuv} – doba posuvu

Z těchto výpočtů vyplývá že $t_{otáčky} = 4000$ ms a $t_{kroku} = 571,42$ ms. Vzhledem k tomu, že nelze použít necelé milisekundy (kvůli limitaci softwaru), byl zvolen $t_{kroku} = 571$ ms. Zde vzniká nutnost použití korekce a ta byla přidělena k poslednímu posuvu cyklu $t_{s korekcí} = 574$ ms.

$$t_{korekce} = t_{otáčky} - 7 * t_{posuvu} [ms]; t_{s korekcí} = t_{posuvu} + t_{korekce} [ms]$$

$t_{korekce}$ – doba korekce, $t_{s korekcí}$ – doba posuvu s korekcí

6 DISKUZE

Celý systém byl testován v praxi. Během testování zařízení se vyskytlo na několik problémů kvůli nedostatečného krouticímu momentu motoru, které se projevilo ztrácením kroků při akceleraci kola s filtry, ale neprojevuje se u brždění kola s filtry díky vyššímu statickému krouticímu momentu. Tento problém vznikl použitím neadekvátního výpočtového modelu pro výběr motoru, kde nebylo zahrnuto v potaz tření v kluzných ložiscích. Silnější motor, odlehčení kola s filtry nebo použití lepšího převodového poměru jsou řešení, ovšem výměnou motoru vzniká další problém kvůli jeho velikosti, kde by se musel vyměnit držák motoru a délka řemenu. Další problém je z hlediska omezení rychlosti kvůli zvolenému softwaru a jeho nakládání s dostupnými prostředky. Zde vzniká omezení při ukládání fotografií, ve zvoleném formátu, na disk, což vytváří prodlevu během, které nelze nakládat se zařízením. Toto lze vyřešit za použití lepšího ukládacího média. Celková snímková frekvence zařízení, nebereme-li v potaz expozici, která je velice variabilní v závislosti na typu filtru, byla dosažena 1,75 snímku za vteřinu oproti předpokládaným 2,16 snímkům. Reálná snímkovací frekvence s ukládáním je 1,29 snímků za vteřinu.

Ostatní konstrukční prvky splňují svou funkci dostatečně. To ale neznamená, že zde nemohou být další vylepšení, jako například odlehčení stěn zásobníku, nebo držáku kamery. Odlehčení držáku kamery by mohlo být dosaženo vybráním materiálu v masivní části držáku. Odlehčení stěn by mohlo být provedeno ztenčením nezátěžovaných částí stěny a byla ponechána pouze potřebná struktura v plné tloušťce plechu v zatěžovaných oblastech. Další vývoj by se mohlo zabývat zlepšením světlotěsnosti mezi kolem s filtry a konstrukčním rámem zařízení. Délka objektivu problémem není díky drážkám pro šrouby v ližině upevňující držák kamery, ale v případě nedostatečné délky lze vyrobit i delší. Na obrázku lze vidět celý revolverový zásobník se všemi komponenty (viz. obr. 6-1).



Obr. 6-1 Celé zařízení

Celé zařízení bylo vyrobeno soustružením a za pomoci CNC frézek. Část výroba byla provedena ve školních dílnách Ústavu konstruování, kde byla provedena i kompletace, a u externí firmy 3d-brno.cz. Díly, u kterých byla nutnost použití CNC frézek, jako stěny zařízení a kolo s filtry, kde jsou nestandartní optické závity, byly hlavním důvodem využití externí firmy.

Též některé softwarové funkce se během testování prokázali, jako nepotřebné, ale vzhledem k tomu, že je dobré mít možnost je použít, tak byly ponechány. K vylepšení přesnosti otáčení a eliminace nutnosti korekce posledního kroku cyklu lze implementovat do softwaru zpětnou vazbu za pomoci optické brány ve stěně zásobníku a vyvrtání malých děr, nebo umístění značek, ve známé pozici vůči závitovým díram v kole s filtry. Při rotaci by optická brána vyslala signál v okamžiku, kdy by narazila na díru, tím by se zastavil motor a zároveň by se spustila sekvence pro pořízení fotografie.

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala konstrukcí a vývojem revolverového zásobníku pro barevné filtry a ovládacím hardwarem a software pro jeho ovládání. Z konstrukčního hlediska byly splněny všechny cíle a parametry pro zásobník s uchycením kamery a objektivu. Toto zařízení bylo vytvořeno pro konfiguraci ZWO ASI 1600MM a objektivů ZEISS Interlock® Compact. Kapacita zařízení je 7 filtrů firmy Schneider-Kreuznach. Snímkovací frekvence byla dosažena v současné konfiguraci 1,29 snímku za vteřinu. Pro tuto aplikaci není možné na současném trhu nalézt vhodné zařízení.

Celé zařízení lze ovládat z jednoho počítače přes intuitivní uživatelské rozhraní v programu LabVIEW™ a jeho addonu Digilent LINX. Tento program se stará o chod a synchronizaci ovládání motoru zařízení a kamery za použití podpůrného hardwaru. Funkce ovládacího softwaru zahrnují jednotlivé i cyklické pořizování fotografií, nastavení expozice a gainu pro jednotlivé filtry, jednoduchý posuv mezi jednotlivými filtry a intuitivní pojmenovávání fotografií při cyklickém fotografování.

Toto zařízení bude využito pro výzkum možností měření geometrie výkovek při výrobě za pomoci pasivní fotogrammetrie.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Manual Filter Wheel (5 x 1.25"). In: Astronomy-imaging-camera [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://astronomy-imaging-camera.com/product/filter-wheel-5-position-1-25-manual>
2. ZWO EFW (5 x 2"/7 x 2"). In: Astronomy-imaging-camera [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://astronomy-imaging-camera.com/product/zwo-efw-5-x-2-or-7-x-2>
3. Manual Filter Wheels. In: Thorlabs [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1443
4. Light-Tight Filter Wheel. In: Thorlabs [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6906
5. Motorized Filter Wheels, Stepper Motor Driven. In: Thorlabs [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=988
6. Motorized Fast-Change Filter Wheel. In: Thorlabs [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2945
7. Benchtop Stepper Motor Controllers. In: Thorlabs [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1704
8. Atik EFW2.2 Electronic Filter Wheel. In: High point scientific [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.highpointscientific.com/telescope-accessories/astro-photography/filter-wheels/atik-36-mm-electronic-filter-wheel-atk0176fw>
9. ASI1600MM Pro (mono). In: Astronomy-imaging-camera [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://astronomy-imaging-camera.com/product/asi1600mm-cool>
10. ZEISS Interlock Compact Lenses. In: ZEISS [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/consumer-products/int/industrial-lenses/interlock-compact-lenses.html#features>
11. Bandpass Series. In: Schneider-Kreuznach [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://schneiderkreuznach.com/en/industrial-optics/filters-bandpass#Variants>
12. HURNÍK, Jakub, Aneta ZATOCILOVÁ, David PALOUŠEK, Peter LEHMANN, Wolfgang OSTEN a Armando ALBERTAZZI GONÇALVES. Camera calibration method of optical system for large field measurement of hot forgings in heavy industry. In: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI [online]. SPIE, 2019, 2019-6-21, s. 112- [cit. 2020-06-24]. DOI: 10.1117/12.2527693. ISBN 9781510627918. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11056/2527693/Camera-calibration-method-of-optical-system-for-large-field-measurement/10.1117/12.2527693.full>

13. ZATOČILOVÁ, Aneta, David PALOUŠEK a Jan BRANDEJS. Image-based measurement of the dimensions and of the axis straightness of hot forgings. Measurement [online]. 2016, 2016-07-22, (94), 254-264 [cit. 2020-06-24]. ISSN 0263-2241. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224116304365>
14. HAN, Sen, JiuBin TAN, Chao BI, Jianguo FANG, Di LI a Xinghua QU. Study on application of color filters in vision system of hot forgings [online]. In: . 2016-10-19, s. 1015522- [cit. 2020-06-24]. DOI: 10.1117/12.2246795. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2246795>
15. SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. Základy konstruování. Vydání šesté. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.
16. SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. Výběry z norem pro konstrukční cvičení. Vyd. 5. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-838-0.
17. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

l	prostor pro filtr
FFD	flange focal distance
ZO	závit objektivu
ZK	závit kamery
HS	hloubka senzoru
α	úhlové zrychlení
φ	úhel natočení
t	čas otočení
ω	úhlová rychlost
n	otáčky
M	krouťící moment
I	moment setrvačnosti
FPS	snímky za vteřinu
s	šířka řemene
s_{min}	minimální šířka řemene
k_s	bezpečnost řemene
k	počet kroků
f	frekvence
$t_{otáčky}$	doba otáčky
t_{posuv}	doba posuvu
$t_{korekce}$	doba korekce
$t_s \text{ korekci}$	doba posuvu s korekcí

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 MFW ZWO	14
Obr. 2-2 Otevřený EFW 7 x 2" ZWO	15
Obr. 2-3 Otevřený manuální zásobník FW1A Thorlabs	16
Obr. 2-4 Světlotěsný manuální zásobník LTFW6 Thorlabs	16
Obr. 2-5 Otevřený motorizovaný zásobník FW102C Thorlabs	17
Obr. 2-6 Vysokorychlostní zásobník FW103H Thorlabs	17
Obr. 2-7 Kontroler BSC201 Thorlabs	18
Obr. 2-8 Motorizovaný zásobník ATK0176FW Atik cameras	18
Obr. 2-9 Kamera ZWO ASI 1600MM	19
Obr. 2-10 Zadní strana kamery	19
Obr. 2-11 Důležité rozměry kamery	20
Obr. 2-12 Objektivy ZEISS Interlock® Compact	20
Obr. 2-13 Pásmové filtry Schneider-Kreuznach	22
Obr. 2-14 Diagram filtru	22
Obr. 2-15 Distanční kroužek.....	23
Obr. 3-1 Diagram prostoru mezi kamerou a objektivem	26
Obr. 4-1 Koncept 1.....	28
Obr. 4-2 Koncept 2.....	29
Obr. 4-3 Koncept 3.....	29
Obr. 5-1 Schéma uchycení kamery a objektivu.....	31
Obr. 5-2 Řez zásobníkem	32
Obr. 5-3 Moment setrvačnosti	34
Obr. 5-4 Výpočet délky a šířky řemene.....	35
Obr. 5-5 Zapojení ovládání krokového motoru	36
Obr. 5-6 Otevřená krabička s elektronikou.....	36
Obr. 5-7 Popsané uživatelské prostředí ovládacího programu.....	37
Obr. 5-8 Popsaný diagram programu v prostředí LabVIEW	38
Obr. 6-1 Celé zařízení.....	40

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Důležité rozměry objektivů	21
Tab. 5-1 Tabulka krokových motorů	33

12 SEZNAM PŘÍLOH A DIGITÁLNÍCH DAT

Přílohy

1. 19_20B_01.pdf
2. Navod_instalace_Arduino.pdf

Digitální data

1. Final_motor_and_camera_control.vi
2. Fotografická_dokumentace.zip
3. Sestava_krabicka_elektroniky.stp
4. Sestava_zarizeni.stp
5. Vypocet_remene.tdd
6. Vyrobní_data.zip