

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTRONIKY
A INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Univerzální osvětlovací stanoviště

Autor práce: Bc. David Fencel

Vedoucí práce: Ing. Radek Holota, Ph.D.

2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. David FENCL**
Osobní číslo: **E19N0056P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Téma práce: **Univerzální osvětlovací stanoviště**
Zadávající katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

Návrh osvětlovacího stanoviště s možností změny geometrie osvětlení a počítačem řízeným pohybem polohy snímací kamery.

1. Navrhněte konstrukci osvětlovacího stanoviště, které umožní osvětlení snímaného objektu pod různými úhly v kombinaci s počítačem řízeným polohovatelným umístěním kamery.
2. Diskutujte vhodnost využití dostupných LED osvětlovačů u navrženého stanoviště, případně navrhněte vlastní konstrukci.
3. Navrhněte a zkonstruuje řídicí jednotku pro pohony kamery.
4. Vytvořte program pro řízení celého osvětlovacího stanoviště pomocí PC.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:


1. Hornberg, A. and Jahr, I. (2017). Lighting in Machine Vision. In Handbook of Machine and Computer Vision, A. Hornberg (Ed.). doi:10.1002/9783527413409.ch3
2. CCS INC. 2017 General Catalog of LED Lighting for Machine Vision Applications [online]. 2017 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.ccs-grp.com/ebook/catalogpdf/ccsgeneralcatalog.pdf>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Radek Holota, Ph.D.**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na vytvoření funkční konstrukce, jež umožní počítačově řízený pohyb kamery a zároveň změnu geometrie osvětlení společně s jeho regulací. Práce obsahuje popis různých geometrií osvětlení a základní přehled osvětlovačů na trhu.

V praktické části pak lze nalézt popis konstrukce na jejím 3D modelu, popis použité elektroniky a softwaru potřebného k jejímu řízení. Na závěr jsou zde uvedeny finanční náklady na práci.

Klíčová slova

Osvětlení, Lineární pohyb, Rotační pohyb, Osvětlovací systém, Osvětlovač

Abstract

This master thesis is focused on creating functional construction, which will provide a computer controlled movement of camera simultaneously with changing the geometry of lighting and its regulation. The thesis contains a description of various geometries of lighting and basic survey of available lighters.

In the realization part, there is a description of the construction shown at its 3D model, a description of used electronics and the software necessary for its control. Lastly, there is provided financial cost of this work.

Keywords

Lighting, Linear movement, Rotational movement, Lighting system, Illuminator

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 25.5.2021

Bc. David Fencl

.....


podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Radku Holotovi Ph.D. za profesionální rady a připomínky při četných konzultacích a za celkové vedení práce.

Obsah

Seznam obrázků	VIII
Seznam tabulek	IX
Seznam symbolů a zkratk	X
1 Úvod	1
2 Geometrie osvětlení	2
2.1 Zadní osvětlení	2
2.2 Přední osvětlení s jasným obrazovým polem	3
2.2.1 Difuzní	3
2.2.2 Směrové	4
2.3 Přední osvětlení s temným zorným polem	5
3 Přehled osvětlovačů na trhu	6
3.1 Prstencové osvětlovače	6
3.2 Přímé sloupcové osvětlovače	7
3.3 Zadní osvětlovače	7
3.4 Bodové osvětlovače	8
3.5 Ploché uniformní osvětlovače	8
3.6 Kopulové osvětlovače	8
3.7 Liniové osvětlovače	9
3.8 Koaxiální osvětlovače	9
3.9 SWIR osvětlovače	9
3.10 Osvětlovač s temným zorným polem	10

4	Vlastní realizace	11
4.1	Mechanická konstrukce	11
4.1.1	Pohyb kamery v první ose	12
4.1.2	Pohyb kamery v druhé ose	13
4.1.3	Rameno osvětlovače	17
4.2	Elektronika	19
4.2.1	Blokové schéma	19
4.2.2	Zdroj 24V	20
4.2.3	Krokové motory	20
4.2.4	Koncové spínače	22
4.2.5	Zdroj světla	23
4.2.6	Vývojové kity	23
4.2.7	Ovladač osvětlení	25
4.3	Software	26
4.3.1	Struktura zpráv a příkazů	26
4.3.2	Vývojový diagram	29
4.3.3	Uživatelská aplikace	31
4.4	Finanční náklady	33
5	Závěr	35
6	Zdroje	37
6.1	Seznam literatury a informačních zdrojů	37
7	Přílohy	40

Seznam obrázků

2.1	Princip zadního osvětlení, převzato z [2]	3
2.2	Nasvícení červeným a modrým světlem, převzato z [5]	3
2.3	Princip kopulového osvětlovače, převzato z [2]	4
2.4	Princip on-axis osvětlovače, převzato z [2]	4
2.5	Princip směrového osvětlovače, převzato z [2]	5
2.6	Princip osvětlovače s temným zorným polem, převzato z [2]	5
3.1	Prstencový osvětlovač, převzato z [12]	6
3.2	Sloupcový osvětlovač, převzato z [12]	7
3.3	Zadní osvětlovač, převzato z [12]	7
3.4	Bodový osvětlovač, převzato z [12]	8
3.5	Plochý uniformní osvětlovač, převzato z [13]	8
3.6	Kopulový osvětlovač, převzato z [12]	9
3.7	Liniový osvětlovač, převzato z [12]	9
3.8	Osvětlovač s temným zorným polem, převzato z [12]	10
4.1	Návrh osvětlovače z roku 2016, převzato z [1]	11
4.2	Posun v první ose, přední pohled	12
4.3	Posun v první ose, zadní pohled	13
4.4	Posun v druhé ose, první možnost	14
4.5	Posun v druhé ose, druhá možnost	15
4.6	Posun v druhé ose, druhá možnost, řez pojízdným dílem	16
4.7	Pomocné kolo, původní návrh	16
4.8	Pomocné kolo, konečný návrh	16
4.9	Osvětlovací rameno, pohled zepředu	17
4.10	Osvětlovací rameno, pohled z boku	18

4.11	Blokové schéma	19
4.12	Zdroj 24 V, převzato z [14]	20
4.13	Krokový motor 42BYGH802U, převzato z [17]	21
4.14	Krokový motor 0.56 Nm, převzato z [18]	21
4.15	Koncový spínač OKY3918, převzato z [20]	22
4.16	Připojení spínačů na mikroprocesor	22
4.17	RGB LED pásek 24RGB12014, převzato z [15]	23
4.18	Bílý LED pásek 24EFI22, převzato z [16]	23
4.19	Vývojový kit NUCLEO-F411RE, převzato z [8]	24
4.20	Modul X-NUCLEO-IHM02A1, převzato z [9]	24
4.21	Ovladač osvětlení RGBW-RF40B, převzato z [21]	25
4.22	Ovladač osvětlení PD3-3024-3-EI, převzato z [23]	25
4.23	Tabulka příkazů z technického listu, převzato z [22]	27
4.24	Popis příkazu GoTo z technického listu, převzato z [22]	28
4.25	Popis zprávy pro příkaz GoTo	28
4.26	Vývojový diagram	29
4.27	Uživatelská aplikace	31
7.1	Fotografie osy y s popisem umístění spínačů	40
7.2	Fotografie osy x s popisem umístění spínačů	41
7.3	Fotografie osvětlovače	41
7.4	Fotografie osvětlovače - přední pohled	42
7.5	Fotografie osvětlovače - boční pohled	42

Seznam tabulek

4.1	Tabulka finančních nákladů na nakoupené součásti	33
4.2	Tabulka součástí získaných z katedry	34

Seznam symbolů a zkratek

CS	chip select, výběr čipu
LED	Light emitting diode, elektroluminiscenční dioda
MCU	microcontroller unit, mikropočítač
PC	personal computer, osobní počítač
PWM	Pulse Width Modulation, pulzně šířková modulace
RF	radio frequency, radio frekveční
SPI	Serial Peripheral Interface, sériové periferní rozhraní
SWIR	Short wave infrared, krátkovlnné infračervené
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter, univerzální asynchronní přijímač-vysílač

1. Úvod

V současné době dochází k prudkému rozvoji systémů počítačového případně strojového vidění. Pro úspěšnou aplikaci je nutné získat co nejkvalitnější vstupní optickou informaci. Jedním ze stěžejních kroků ke kvalitnímu nasnímání obrazu je vhodný typ případně geometrie osvětlení. Příkladem může být systém optické inspekce. Za sledovaný objekt lze považovat například plošný spoj, u kterého budeme zjišťovat přítomnost zkratů nebo jiných poruch. Můžeme také sledovat přítomnost součástek a jejich správnou orientaci či zapájení. Obecně platí, že podle toho, co chceme sledovat, musíme přizpůsobit osvětlení. V této práci jsou uvedeny různé druhy geometrie osvětlení, následované základním přehledem osvětlovačů na trhu.

V praktické části pak dojde k návrhu vlastního osvětlovacího zařízení. Jsou zde popsány požadavky na ovladatelnost kamery i osvětlení. Následně je popsán konstrukční návrh. Ten je popsán na snímcích 3D modelu, jelikož byla celá tato konstrukční část vymodelována, než byla realizována.

Práce se dále věnuje elektronice potřebné ke správné funkci zařízení, vzniklým problémům a jejich řešení. Důležitou součástí je dále řídicí software mikroprocesoru, který zajišťuje správnou funkci i určitou odolnost zařízení vůči špatným příkazům uživatele. Právě pro uživatele je pak určena část s aplikací, jež mu umožní větší komfort při používání zařízení. Závěrem jsou zde uvedeny finanční nároky na stanoviště.

2. Geometrie osvětlení

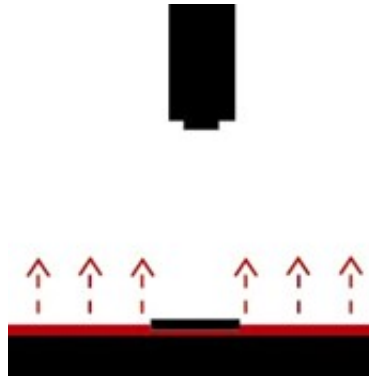
V oborech jako je počítačové případně strojové vidění je kvalita osvětlení klíčovým parametrem. Toto osvětlení je definováno parametry, jako jsou geometrie a struktura osvětlení, vlnová délka světla nebo použitá filtrace. Kromě těchto parametrů je výsledek dále ovlivněn prostředím, ve kterém dochází k inspekci, a vlastnostmi objektu, který je nasvícen. Tyto vlastnosti mohou být tvar, velikost, barva nebo jeho povrchová úprava. Pro kvalitní inspekci je třeba dodržet maximální kontrast v částech, které chceme sledovat, a minimální kontrast v okolí.[2]

Geometrie osvětlení se dělí na tyto tři základní části:

1. Zadní osvětlení
2. Přední osvětlení s jasným obrazovým polem
3. Přední osvětlení s tmavým zorným polem

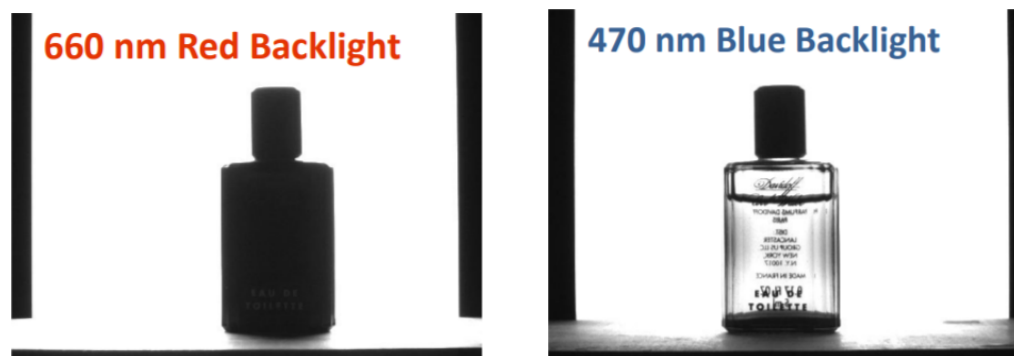
2.1 Zadní osvětlení

Zadní osvětlení nasvěcuje požadovaný objekt zezadu. Jak zobrazuje obrázek 2.1, zdroj světla v podstatě svítí směrem do kamery. Výsledkem je vznik siluety, tedy tmavý obrys se světlým okolím, nasvícovaného objektu. To je vhodné především k detekci hran. Nicméně dochází ke ztrátě povrchového detailu. Zadní osvětlení se používá pro sledování přítomnosti děr a mezer, orientace a umístění součástí nebo měření rozměrů. [2][3][4]



Obrázek 2.1: Princip zadního osvětlení, převzato z [2]

Výsledné zobrazení také závisí na vlnové délce použitého světla. Většinou se používá monochromatické světlo. Vyšší vlnové délky nemusí být schopny projít určitými materiály. Tento případ ukazuje obrázek 2.2 pro červené a modré světlo.[2][5]



Obrázek 2.2: Nasvícení červeným a modrým světlem, převzato z [5]

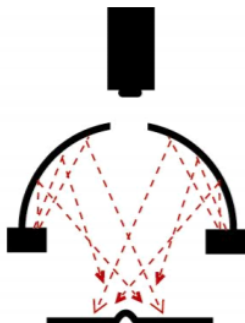
2.2 Přední osvětlení s jasným obrazovým polem

2.2.1 Difuzní

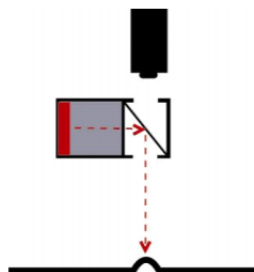
Difuzní osvětlení je určeno pro vzorky lesklé, zrcadlové a vzorky se smíšenou reflektivitou. Výsledné nasvícení je rovnoměrné a vícesměrové. Difuzního charakteru dosahujeme buď kvalitními difuzory nebo speciálním provedením osvětlovačů, jako jsou kopulové nebo on-axis(co-axial).[2][4]

Kopulové osvětlení se někdy nazývá bezestínové. Princip je zobrazen na obrázku 2.3. Umožňuje nasvítit požadovaný objekt rovnoměrně rozptýleným světlem. Rozptýlené světlo vzniká odrazem na vnitřní straně osvětlovače. Nasvícovaný prvek může být

zahnutý či zrcadlový, toho se využívá v automobilovém průmyslu. Aby bylo nasvícení efektivní, je třeba zajistit dostatečně malou vzdálenost od nasvíceného objektu.[2][4][6]



Obrázek 2.3: Princip kopulového osvětlovače, převzato z [2]

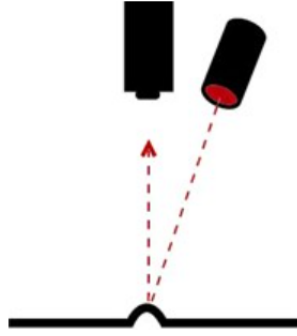


Obrázek 2.4: Princip on-axis osvětlovače, převzato z [2]

On-axis nebo co-axial osvětlení je určeno pro zvýraznění textur nebo výstupků. Ve výsledku jsou zobrazeny prvky kolmé k optické ose kamery, ostatní části jsou tmavé. Princip osvětlení ukazuje obrázek 2.4. Záře ze zdroje prochází přes zrcadlo, kde dochází k odrazu a výsledné světlo směřuje kolmo k nasvícovanému objektu. Světlo odražené od objektu potom putuje stejnou cestou do kamery. Nevýhodou tohoto uspořádání je, že světlo dopadající do kamery má pouze čtvrtinovou intenzitu oproti světlu ze zdroje. Pro efektivní nasvícení je tedy potřeba výkonný zdroj záření a sledovaný objekt dobře odražející světlo. Další nevýhodou může představovat relativně vyšší cena a omezené zorné pole. Objekt by dále měl být plochý a je možné použít i průhledné obaly. Způsob on-axis se používá pro měření, inspekci nebo detekci mechanických závad.[2][4][6][7]

2.2.2 Směrové

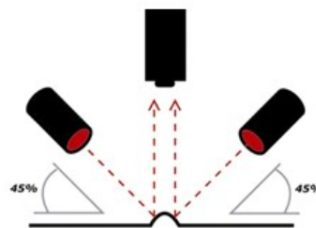
Směrová geometrie osvětlení se používá nejčastěji. Světlo je vyzařováno z bodového zdroje. Přitom je důležité, aby kamera směřovala kolmo k ploše detailu, který chceme, aby byl ve výsledku jasný. Obecně se směrové uspořádání používá ke zvýraznění povrchového detailu. Nevýhodou může být nízká efektivita osvětlení při nasvícení odrazových ploch.[2][7]



Obrázek 2.5: Princip směrového osvětlovače, převzato z [2]

2.3 Přední osvětlení s temným zorným polem

Osvětlení s temným zorným polem znamená, že osvětlení je vůči objektu natočené pod nízkým úhlem, což způsobí vyniknutí prvků jako jsou škrábance, otisky nebo zářezy. Tyto prvky se na snímku z kamery objeví světlé, zatímco zbytek objektu bude tmavý, protože se světlo odráží mimo objektiv. Pokud budou mít sledované prvky ostré hrany, potom jejich zobrazení bude užší, než kdyby měly hrany oblé. Tento způsob uspořádání je citlivý na znečištění objektu v podobě prachu, špíny nebo vláken. Znečištění je pak ve výsledku zobrazeno stejně jako hledané prvky. U povrchů s členitější strukturou dochází ke snížení kontrastu. Princip osvětlení ukazuje obrázek 2.6. Osvětlovače mohou být kruhové, lineární nebo směrové. U kruhového osvětlovače se s jeho průměrem mění výsledné zobrazení. Úzký kruhový osvětlovač způsobí úzké zobrazení hledaného prvku. U širokého osvětlovače je situace opačná. Pro efektivní nasvícení je třeba, aby osvětlovač byl dostatečně blízko objektu. Vlnová délka také ovlivňuje výsledek, a to tak, že kratší vlnová délka je vhodnější. Modré světlo tedy bude vhodnější než červené. Obecně se osvětlení temným zorným polem používá k inspekci povrchu.[2][4][6][7]



Obrázek 2.6: Princip osvětlovače s temným zorným polem, převzato z [2]

3. Přehled osvětlovačů na trhu

Jako zdroj světla lze použít halogenové výbojky či zářivky, nicméně dnes se nejčastěji používají LED diody. U nich je důležitá především životnost a stálá svítivost v čase. Většina osvětlovačů se vyrábí ve variantách s různými vlnovými délkami, nejčastěji jsou použity bílá, modrá, zelená, červená a infračervená oblast. Osvětlovače jsou nejčastěji napájeny ze zdroje 24 V. Producenti osvětlovačů často také vyrábějí napájecí zdroje a sofistikované řídicí jednotky. Správně vybrané osvětlení umožňuje stabilní a opakovatelné výsledky. [11][12]

3.1 Prstencové osvětlovače

Prstencové osvětlovače umožňují dobrý kontrast a osvětlení bez stínu. Jak už napovídá jejich tvar, jsou vhodné pro kruhové objekty. Jsou určeny spíše pro objekty matné, jelikož na reflexních částech vznikají zrcadlové odlesky. Jejich zavedení je velmi jednoduché, protože obsahují uprostřed otvor, do kterého se vloží kamera. Existují také varianty s nízkým úhlem natočení pro detekci škrábanců či poškození. Takový druh je pak určen pro umístění blízko sledovaného objektu. Varianta s nízkým úhlem natočení existuje také obdélníková. Obrázek 3.1 zobrazuje prstencový osvětlovač.[11][12]



Obrázek 3.1: Prstencový osvětlovač, převzato z [12]

3.2 Přímé sloupcové osvětlovače

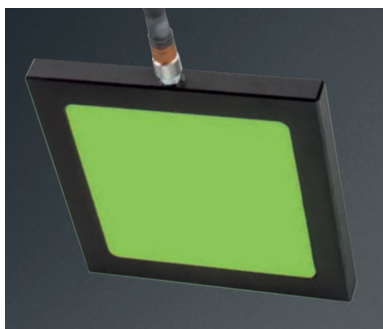
Sloupcové osvětlovače je možné umístit různě natočené, takže vznikne osvětlení se světlym nebo s temným zorným polem. Správné natočení může odstranit nežádoucí zrcadlové odlesky. Výsledná oblast je pak rovnoměrně nasvícená. Jejich použití je univerzální. Lze je využít například pro sledování čárových nebo 2D kódů, odhalování defektů a chybějících částí nebo pro přidání kontrastu u matných povrchů. Sloupcový osvětlovač je zobrazen na obrázku 3.2. [11][12]



Obrázek 3.2: Sloupcový osvětlovač, převzato z [12]

3.3 Zadní osvětlovače

Zadní osvětlovače jsou vhodné pro kontrolu povrchů, detekci otvorů, trhlin nebo pro měření rozměrů objektu. Také je možné je využít pro nasvícení průsvitných objektů. Zadní osvětlovač je zobrazen na obrázku 3.3.[11][12]



Obrázek 3.3: Zadní osvětlovač, převzato z [12]

3.4 Bodové osvětlovače

Bodový osvětlovač je vhodný pro nasvícení vzdálených objektů nebo rychle probíhajícími procesy. Je možné ho také využít pro sledování čárových či jiných 2D kódů. Sledovaný povrch by měl být matný. Bodový osvětlovač je zobrazen na obrázku 3.4.[11][12]



Obrázek 3.4: Bodový osvětlovač, převzato z [12]

3.5 Ploché uniformní osvětlovače

Ploché osvětlovače jsou vhodné pro rovnoměrné osvětlení velkých předmětů s reflexivním povrchem. Nasvícovaným objektem může být například deska plošných spojů. Jejich implementace je jednoduchá, jelikož obsahují uprostřed otvor pro umístění kamery. Používají se často tam, kde kvůli nedostatku prostoru nelze použít kopulové osvětlovače. Plochý osvětlovač je zobrazen na obrázku 3.5.[11][12]



Obrázek 3.5: Plochý uniformní osvětlovač, převzato z [13]

3.6 Kopulové osvětlovače

Kopulové osvětlovače jsou vhodné pro 3D předměty s lesklým povrchem. Lze tak detekovat praskliny či jiné povrchové vady. Umožňují dobrou inspekci členitých povrchů. Kopulový osvětlovač je zobrazen na obrázku 3.6.[11][12]



Obrázek 3.6: Kopulový osvětlovač, převzato z [12]

3.7 Liniové osvětlovače

Liniové osvětlovače jsou určeny především pro řádkové kamery. Mají dlouhou životnost a dodávají stabilní svit. Některé varianty umožňují regulovat světelný tok pomocí cylindrické čočky. Liniový osvětlovač je zobrazen na obrázku 3.7.[11][12]



Obrázek 3.7: Liniový osvětlovač, převzato z [12]

3.8 Koaxiální osvětlovače

Koaxiální osvětlovače obsahují polopropustné zrcadlo a umožňují tak osvětlení v ose objektivu. Osvětlení může být pulzní nebo spojitě. [11][12]

3.9 SWIR osvětlovače

Osvětlovače v pásmu SWIR se používají například pro inspekci desek plošných spojů nebo kontrolu kvality. Pásmo SWIR se nachází na rozhraní viditelného a tepelného zobrazení, což přináší výhodu například v možnosti kvalitního zobrazení i přes sklo.[11][12]

3.10 Osvětlovač s temným zorným polem

Tento typ osvětlovače se používá například při inspekci reliéfů nebo gravírovaných povrchů. Osvětlovač může být speciálně určený pro tento druh osvětlení nebo je možné použít některý z výše zmíněných a vhodně ho umístit tak, aby plnil stejnou funkci. Na obrázku 3.8 je zobrazen osvětlovač , který je možné použít pro jasné i temné zorné pole.[11][12]



Obrázek 3.8: Osvětlovač s temným zorným polem, převzato z [12]

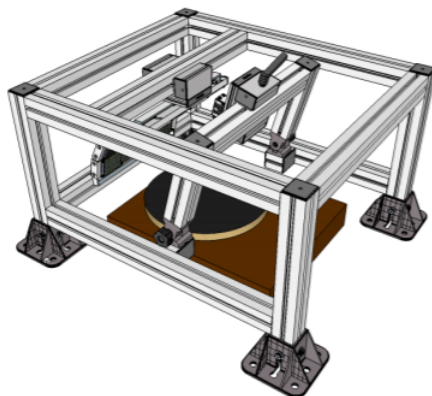
4. Vlastní realizace

4.1 Mechanická konstrukce

Při návrhu mechanické konstrukce bylo přihlíženo zejména k těmto požadavkům:

1. Zařízení bude umožňovat pohyb kamery ve dvou osách, jenž bude řízen z PC.
2. Zařízení bude obsahovat rameno s regulovatelným osvětlením.
3. Zařízení bude dostatečně velké pro vložení gramofonu.

Jako základ konstrukce posloužila práce Jana Giebla z roku 2016 [1]. V práci byl uveden návrh s pevně umístěným osvětlením a nastavitelným ramenem s kamerou. Velikost celého návrhu byla dostatečná pro velikost gramofonu. Nosná část byla v návrhu vytvořena z hliníkových profilů. 3D model návrhu je zobrazen na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Návrh osvětlovače z roku 2016, převzato z [1]

U některých částí výše uvedeného návrhu byla změněna koncepce již při prvotní úvaze. Bylo rozhodnuto, že kamera bude z otočného ramena přemístěna na pohyblivou součást nad hliníkovou konstrukcí a naopak osvětlení bude přemístěno na otočné rameno. Otáčením ramena bude tak možné docílit různé geometrie osvětlení. Kamera

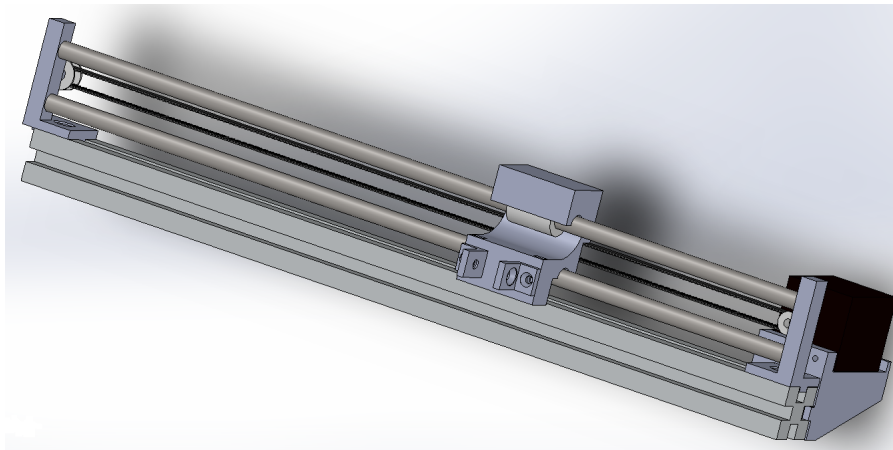
bude vždy směřovat kolmo dolů. Ve výše zobrazeném návrhu by osvětlovač omezoval rozsah pohybu kamery. Tento problém zde odpadne.

Pro realizaci nosné konstrukce byly využity hliníkové profily o rozměrech 30x30 mm, jenž byly nařezány tak, že po sestavení vzniklo stanoviště o výšce 30 cm, šířce 51 cm a hloubce 56 cm. Pro sestavení byly navrženy úhelníky, které byly následně vytištěny na 3D tiskárně. Návrh úhelníků a součástí v následujících kapitolách byl vytvořen v softwaru SolidWorks.

4.1.1 Pohyb kamery v první ose

Pro lineární pohyb se nejčastěji používají dva principy. První obsahuje hlazené vodící tyče, po kterých je posouván díl opírající se o lineární ložiska. V tomto případě je tažení většinou zajištěno pomocí řemenu. Druhý princip obsahuje trapézovou tyč, na níž je umístěna matice. Matice je vložena do dílu, který chceme posouvat tak, aby se matice nemohla otáčet. Otáčením trapézové tyče pak dochází k posunu požadovaného dílu.

Pro posun v první ose byl zvolen první princip, protože jeho výsledná cena byla mírně nižší a při posunu u něj dochází k menšímu tření. Výsledný 3D model je zobrazen na obrázcích 4.2 a 4.3.

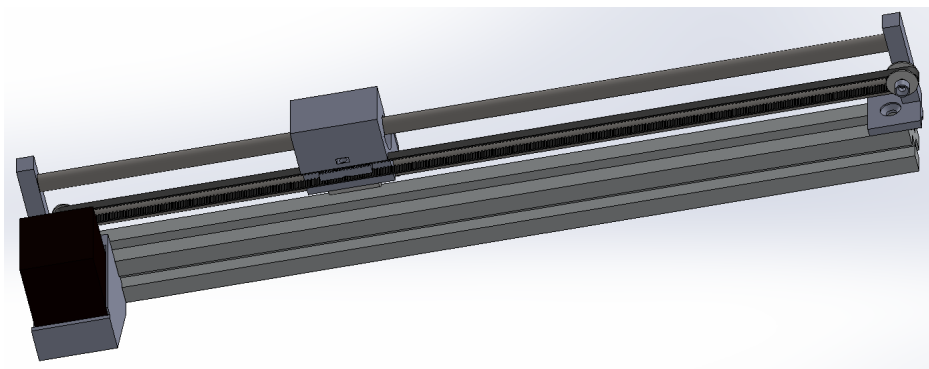


Obrázek 4.2: Posun v první ose, přední pohled

Pohyb probíhá na dvou hlazených tyčích. V základu by stačila jedna, nicméně posuvný díl by bylo potřeba opřít, aby se netočil. Opěrnou částí by mohl být spodní profil, ale zvýšilo by se tím tření, proto byly zvoleny dvě tyče. Na tyčích jsou umístěna lineární ložiska a na nich je uchycen posuvný díl. Z předního pohledu jsou ještě zřejmé dva

úchyty na posuvném dílu. Mezi tyto úchyty se připevní profil 20x20 mm, jenž bude sloužit pro uchycení kamery s možností jejího výškového nastavení. Celá posouvací sestava je umístěna na hliníkový profil 30x30 mm s 8 mm drážkou.

Zadní pohled je zobrazen na obrázku 4.3. Z tohoto pohledu je vidět tažný řemen. Řemen není smyčka, ale jeho konce jsou spojeny pod posuvným dílem. Konce jsou přitlačeny k posuvnému dílu součástí, jež kopíruje strukturu zubů. Pro pevné uchycení je v posuvném dílu mezerka pro matici M4 a v přitlačné části díra pro odpovídající šroub. Na pravé straně obrázku je možné vidět držák tyčí a kladky. Kladka je nasazena na držák a přitisknuta pomocným dílem. Ložisko, které kladka obsahuje, je tak stlačeno mezi dva díly. Kladka samotná se točí pouze na něm a netře se tak o stěny. V levé části obrázku je umístěn krokový motor sedící na držáku. Motor má na hřídeli připevněnou řemenici.



Obrázek 4.3: Posun v první ose, zadní pohled

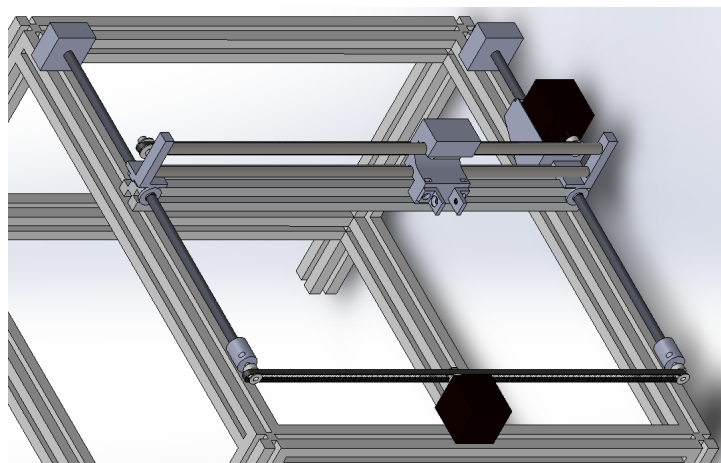
Při vlastním sestavování se ukázalo, že kladka sedí na držáku dostatečně dobře, takže přitlačný díl nebyl použit. Dále byl vytvořen díl pro zafixování posuvného dílu na ložiskách, jelikož při prvních testech nesesedl díl pevně a vznikaly tak vibrace. Pro další použití byla první osa označena jako osa x.

4.1.2 Pohyb kamery v druhé ose

Pro druhou osu byly uvažovány dva principy. První princip opět obsahoval pohyb pomocí trapézové tyče. Druhý princip potom vycházel z online dostupného návrhu [10], který obsahuje pohyb pomocí řemene a pomocných kol.

První možnost

Jako první možnost byl uvažován posuv pomocí trapézových tyčí. Princip je zobrazen na obrázku 4.4. Je zde vidět použití dvou tyčí, jejichž matice jsou umístěny do profilu, na kterém je upevněn posun v první ose. Tyče jsou na jednom konci napojeny přes pružnou spojku na hladkou tyč. Na této tyči jsou potom řemenice. Přes řemenice je připevněn řemen. V polovině vzdálenosti mezi tyčemi je další řemenice, ke které je již připevněn krokový motor. Trapézové tyče jsou na druhé straně umístěny do držáků. Tento princip má několik nevýhod. Profil pro první osu se v tomto případě tře o základní konstrukci. To by mohlo být vyřešeno umístěním do vyšší polohy, ale v tom případě by celá posouvaná hmotnost ležela na maticích, respektive trápézových tyčích, a mohlo by dojít k jejich ohnutí. To by mohlo způsobit zastavení pohybu a poškození motoru. Řešení problému si lze představit při použití dvou motorů a odstranění řemenu. Zde by bylo potřeba řídit motory synchronně a to velmi přesně, jinak by došlo ke stejnému problému.

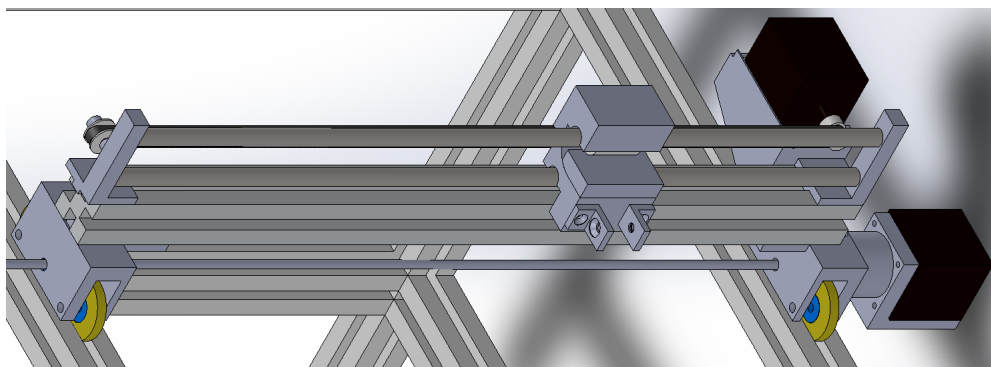


Obrázek 4.4: Posun v druhé ose, první možnost

Tento princip se začal ukazovat jako finančně náročnější a po promyšlení dalších variant od něj bylo upuštěno, proto např. nejsou v držácích umístěna ložiska. Druhá možnost na rozdíl od první některými výše popsány problémy netrpí, i když se může zdát konstrukčně složitější.

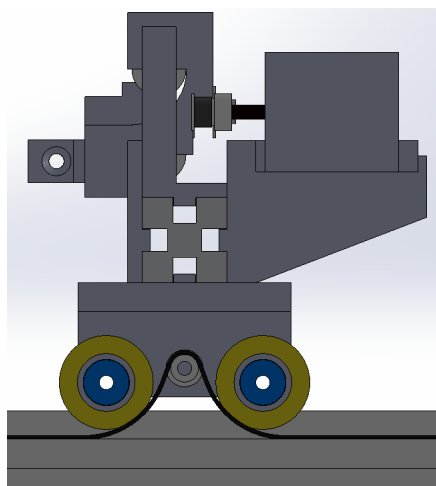
Druhá možnost

Princip fungování druhé možnosti je zobrazen na obrázku 4.5. Pro druhou možnost byly vytvořeny dva pojízdné díly. Na rozdíl od online návrhu byla pomocná kola umístěna pouze na horní straně profilu. V obrázku jsou kola zvýrazněna žlutou barvou. Do vnitřku kol byla umístěna ložiska, v obrázku zvýrazněná modrou barvou. Kola samotná nejsou poháněna. V pravé části obrázku můžete vidět krokový motor připojený k jednomu z pojízdných dílů. Tento pojízdný díl dále obsahuje širší část, v níž je umístěna pružná spojka pro napojení hřídele motoru na tyč o průměru 5 mm. Touto tyčí jsou oba pojízdné díly propojeny. Pojízdné díly také obsahují díry pro šrouby, aby byla sestava pro pohyb v první ose pevně uchycena.



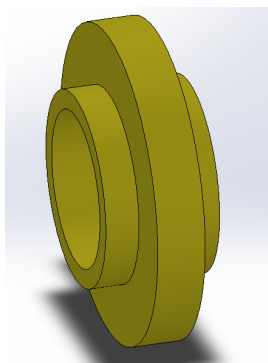
Obrázek 4.5: Posun v druhé ose, druhá možnost

Na obrázku 4.6 dále vystvětlím princip pohybu. Obrázek představuje řez pojízdným dílem. Uprostřed dílu mezi pomocnými koly je možné vidět tyč o průměru 5 mm, na které je umístěna řemenice. Řemenice se nachází v obou pojízdných dílech a je na ní navlečen řemen. Otáčením tyče, respektive řemenice, pak dochází k pohybu. Účelem pomocných kol je přitlačovat řemen k hliníkovému profilu a zároveň poskytovat oporu pro celou sestavu.

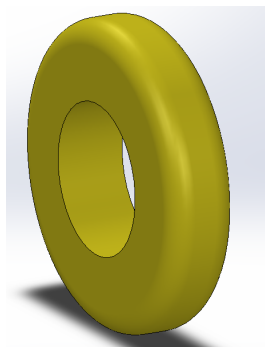


Obrázek 4.6: Posun v druhé ose, druhá možnost, řez pojízdným dílem

Po vyzkoušení tohoto sestavení se objevil konstrukční problém, který znemožňoval plynulý posun. Jak je znázorněno na obrázku 4.6, pomocná kola mají přesah do drážky profilu. Tato kola a ložiska v nich byla původně umístěna na krátké části tyče o průměru 5 mm. Ukázalo se však, že ložiska na tyči nesedí pevně a při pohybu se viklají. To ve výsledku způsobilo natočení pomocných kol a jejich zadření v drážce. První část řešení tohoto problému spočívala v nahrazení tyče šroubem M5 a zafixováním ložiska pomocí matic a podložek. Toto bohužel nestačilo a kola se dále zablokovávala v drážce. Proto byl navržen jiný typ pomocného kola. Porovnání návrhů je zobrazeno na obrázcích 4.7 a 4.8. Oproti původnímu návrhu není kolo opřeno o plochu profilu, ale pohybuje se po hranách drážky. Tím je zabráněno zadření kola. Hrozilo zde nebezpečí, že kolo bude vyjždět z drážky, ale konstrukce je dostatečně zatížena a kola tak v drážkách drží. Pro další použití byla druhá osa označena jako osa y.



Obrázek 4.7: Pomocné kolo, původní návrh

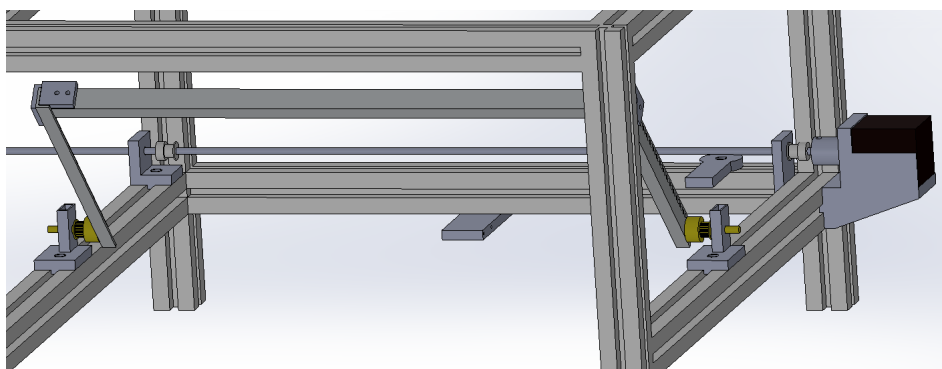


Obrázek 4.8: Pomocné kolo, konečný návrh

4.1.3 Rameno osvětlovače

Pro rameno osvětlovače bylo nejdříve uvažováno použití dvou motorů. Na každou stranu ramena by byl připevněn jeden, ale od toho způsobu bylo brzy upuštěno kvůli obavám z možných problémů. Motory by bylo potřeba řídit přesně synchronně, aby nedošlo k ohnutí ramena. Navíc se dále ukázalo, že jeden motor má dostatečný moment na to, aby otáčel ramenem.

Návrh, který byl nakonec realizován, je vidět na obrázku 4.9. Otáčení je tedy zajištěno černě zvýrazněným krokovým motorem na obrázku vpravo. Tento motor je přes pružnou spojku připojen na tyč o průměru 5 mm. Na tyči jsou umístěny dvě řemenice a tyč samotná je uložena ve dvou ložiskách.

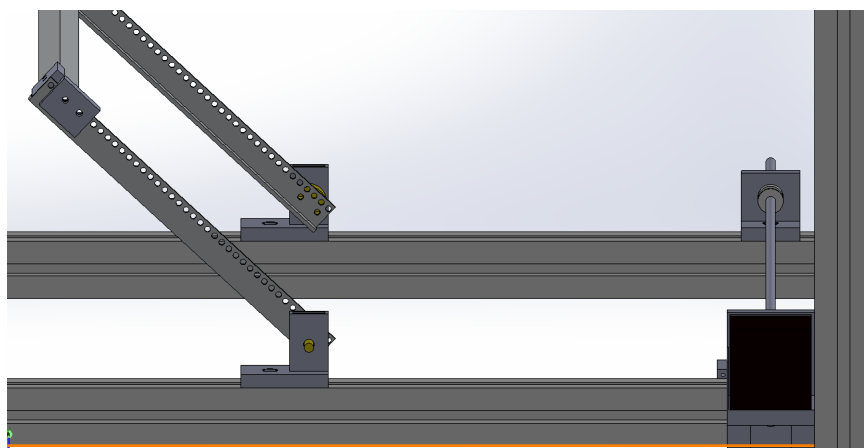


Obrázek 4.9: Osvětlovací rameno, pohled zepředu

Rameno je složeno ze tří hliníkových profilů. Boční profily mají tvar písmene "L" a jsou v nich po celé délce předvrtané otvory pro šrouby M3. Otvory je možné vidět na obrázku 4.10. Prostřední profil má tvar pravoúhlého "U". Tento tvar umožňuje do drážky přilepit různé druhy LED pásků. Prostředních profilů bylo vytvořeno více a je tedy možné je vyměňovat. Také je možné na ně připevnit difuzor. Prostřední profil je s bočními spojen pomocí spojovacích dílů, které umožňují rameno posouvat a měnit tak vzdálenost osvětlení od objektu. Boční profily jsou připevněny na 3D tištěné řemenice. Každá řemenice obsahuje hřídel, která je vložena do ložisek. Výsledná rotace ramena je zajištěna upnutím smyčky řemenu mezi řemenice na tyči a řemenice připevněné k ramenu. Řemeny mají délku 494 mm.

V obrázku 4.9 je na zadním profilu možné vidět další dva díly. Díl připevněný shora slouží jako podpora pro rameno ve chvíli, kdy stanoviště není používáno. Díl umístěný pod profilem slouží k upevnění koncového spínače. Podobné díly byly vy-

tvořeny i pro pohyb v obou osách kamery.

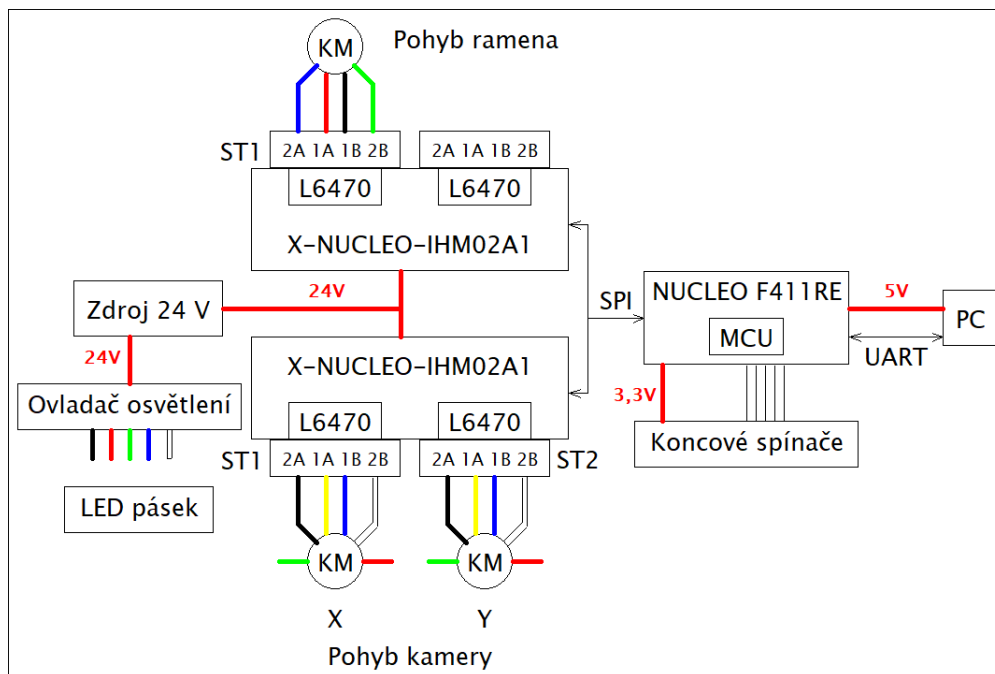


Obrázek 4.10: Osvětlovací rameno, pohled z boku

Výsledné otáčení ramena je hodně závislé na napnutí řemenů. Jejich dopínání souvisí se vzdáleností mezi tyčí a držáky s řemenicemi. Pokud je řemen špatně napnutý, dochází k prokluzování řemenic, což ve výsledku způsobí, že požadovaná pozice neodpovídá skutečnosti. Problém by mohl být vyřešen použitím větších řemenic s větším počtem zubů. S rostoucí velikostí řemenic se ale snižuje vzdálenost mezi držáky a tyčí, takže by pak bylo potřeba zkrátit boční části ramena. Jiný způsob, jak vyřešit tento problém, představuje použití mechanického napínače řemene, který by se připevnil na vodorovný profil.

4.2 Elektronika

4.2.1 Blokové schéma



Obrázek 4.11: Blokové schéma

Na obrázku 4.11 je zobrazeno blokové schéma. V pravé části je zobrazen blok osobního počítače, jenž zajišťuje napájecí napětí 5 V pro vývojový kit s mikropočítačem. Z osobního počítače je možné posílat zprávy do mikropočítače přes UART. Z vývojového kitu je napájeno pět koncových spínačů napětím 3,3 V. Spínače jsou následně zavedeny na vstupy vývojového kitu. Na vývojový kit jsou dále napojeny dva rozšiřující moduly obsahující budiče bipolárních krokových motorů. Každý modul obsahuje dva budiče L6470. Komunikace mezi mikropočítačem a těmito budiči je zajištěna pomocí SPI. Na spodní modul jsou napojeny dva unipolární motory zajišťující pohyb kamery. Je zde doplněno barevné označení vodičů a jejich následné zapojení. Na horní modul je potom připojen jeden bipolární motor pro otáčení osvětlovacího ramena. Oba moduly s budiči motorů jsou napájeny zdrojem 24 V. Ten zároveň napájí ovladač osvětlení, který má barevně oddělené výstupy. Na tyto výstupy je pak možné připojit různé LED pásy.

4.2.2 Zdroj 24V

Původně byl uvažován jen zdroj 12 V. Ukázalo se však, že 12 V je pro konkrétní zapojení motorů málo a motor neměl dostatečný točivý moment. Proto došlo k výměně za zdroj 24 V. Konkrétně se jednalo o zdroj TLPZ-24-150 určený pro LED pásky o celkovém výkonu 150 W. Zdroj mimo jiné obsahuje pojistky proti zkratu a přetížení. Jeho výstup je možné manuálně upravit v rozsahu $\pm 2,4$ V. Zdroj je zobrazen na obrázku 4.12.[14]



Obrázek 4.12: Zdroj 24 V, převzato z [14]

4.2.3 Krokové motory

U krokových motorů vznikl problém špatnou volbou typu motoru. Krokové motory mohou být unipolárního nebo bipolárního typu. Unipolární typ má dvě vinutí s vyvedeným středem. To znamená, že z motoru vychází šest vodičů. Bipolární motor středy nemá vyvedené a má tedy jen čtyři vodiče. Tato skutečnost mi při výběru nebyla známa. Vybíral jsem tedy motory podle ceny, točivého momentu a napětí uvedeného výrobcem.

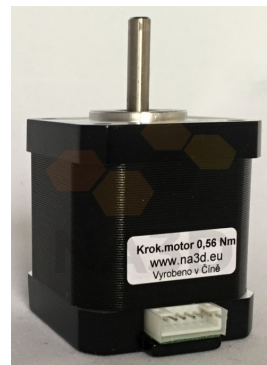
Pro pohyb kamery byly tedy vybrány dva unipolární motory 42BYGH802U. Motor je zobrazen na obrázku 4.13. Některé internetové zdroje, např. [19], uvádějí, že je možné provozovat unipolární motory na bipolárních budičích tak, že se pouze vynechá střed cívky. Tento fakt se mi nepodařilo potvrdit. V tomto zapojení motor pouze vibroval a neotáčel se. Byl zde také problém v tom, že barevné označení vodičů neodpovídalo označení v technickém listu. Tento problém byl vyřešen změřením odporů mezi jednotlivými vodiči. Motor se povedlo rozpohybovat zapojením pouze poloviny vinutí. Nicméně

při vyšších rychlostech začalo opět docházet k významným vibracím, až se motor opět přestal otáčet. Mírného zlepšení bylo dosaženo změnou způsobu buzení. Bylo přepnuto ze 128 mikrokroků na plný krok.

Tento problém se nakonec povedlo vyřešit vyšším napětím. Unipolární motor 42BYGH802U má katalogové napětí 12 V. Nicméně, jak opět uvádějí některé internetové zdroje, katalogové napětí u krokových motorů není zcela relevantní pro jejich pohyb. Udávané napětí pouze umožní průchod udávaného proudu cívkami podle jejich odporu. Tento stav odpovídá katalogovému momentu pro udržení rotoru na místě, tedy pro zabránění pohybu. Pro otáčení rotoru samotného, a hlavně potom zatíženého rotoru, je potřeba napětí podstatně vyšší. Proto byl zdroj 12 V nahrazen zdrojem 24 V. Po této změně bylo dosaženo výrazně vyšších rychlostí. Bylo možné přepnout zpět na 128 mikrokroků, což snížilo vibrace. Je zde potřeba poznamenat, že provozování na vyšším napětí umožní tok vyššího proudu a tedy vyšší oteplení motoru. Nicméně i při střídavém provozu v řádu několika hodin byla teplota motoru jen mírně vyšší.



Obrázek 4.13: Krokový motor 42BYGH802U, převzato z [17]

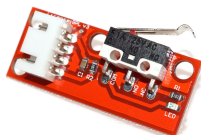


Obrázek 4.14: Krokový motor 0.56 Nm, převzato z [18]

Po vyřešení problémů s motory pro pohyb kamery byl dokoupen ještě motor pro pohyb ramena. Zde byl již vybrán správně bipolární typ. Opět se motor vybíral podle ceny, ale zde také hlavně podle točivého momentu. Bylo důležité, aby byl moment co nejvyšší a byla tak zajištěna správná funkce. Vybrán byl nakonec motor s točivým momentem 0.56 Nm [18]. Motor je zobrazen na obrázku 4.14. Bylo zde uvažováno i s případným ozubeným převodem, pokud by moment motoru nestačil na otáčení ramena. Pro tento účel byly vymodelovány různé velikosti řemenic připevněných k bočním částem ramena. Jejich využití nakonec nebylo potřeba, jelikož motor měl dostatečný moment.

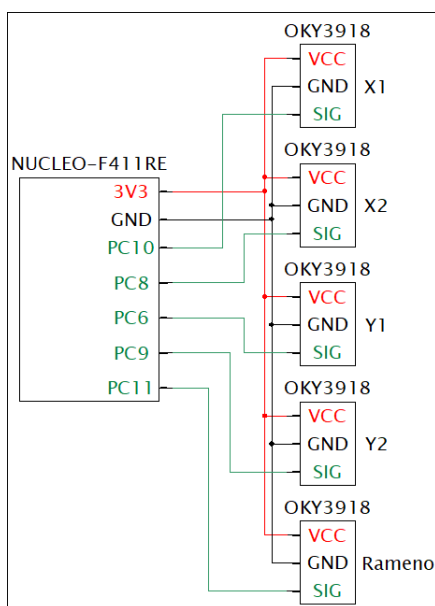
4.2.4 Koncové spínače

Pro funkci zastavení motorů na konci pojezdové dráhy byly dokoupeny koncové spínače OKY3918. Spínač je zobrazen na obrázku 4.15. Pro upevnění spínačů byly vytvořeny 3D modely přídržných dílů, které byly následně vytištěny. Spínače se k těmto dílům připevnilly pomocí vrutů.



Obrázek 4.15: Koncový spínač OKY3918, převzato z [20]

Pro možnosti čtení stavu spínačů z mikroprocesoru bylo potřeba spínače rozlišit. Na obrázku 4.16 je zobrazeno připojení spínačů k vývojovému kitu s procesorem. Jak bylo dříve zmíněno, první osa byla označena jako osa x a druhá osa jako osa y. Podstatné je, že spínač označený jako X1 představuje pozici 0 pro osu x. U osy y totéž platí pro spínač Y2. Spínače jsou napájeny z vývojového kitu napětím 3,3 V. Jak ukazuje obrázek, spínače jsou připojeny k mikroprocesoru přes piny C 6, 8, 9, 10 a 11.



Obrázek 4.16: Připojení spínačů na mikroprocesor

4.2.5 Zdroj světla

Jako zdroj světla byly zvoleny LED pásy, které je možné přilepit do hliníkového profilu, jak bylo uvedeno v kapitole 4.1.3. Konstrukcí je tak zajištěna možnost vyměňovat profily s různými páskami. Konkrétně byly zakoupeny dva pásy s LED diodami. První pásek obsahuje RGB diody a jeho označení je 24RGB12014. Tento pásek má napájecí napětí 24 V a příkon 14,4 W/m. Na jeden metr obsahuje pásek 120 diod a je možné ho dělit po každých 5 cm. Světelný tok pak dosahuje až 800 lm/m. Druhý pásek je osazen bílými diodami a jeho označení je 24EFI22. Tento pásek je opět napájený 24 V, ale má větší příkon, a to 22 W/m. Na jeden metr pásek obsahuje 224 diod a je možné ho dělit po každých 3,571 cm. Pásek se dodává ve třech variantách podle teploty výsledné barvy. U všech variant přesahuje světelný tok 3000 lm/m.[15][16]



Obrázek 4.17: RGB LED pásek 24RGB12014, převzato z [15]



Obrázek 4.18: Bílý LED pásek 24EFI22, převzato z [16]

V případě, že by zde byl požadavek na použití běžně prodávaných osvětlovačů, jsou možnosti i kvůli umístění kamery značně omezené. Z dostupných osvětlovačů na trhu by přicházel v úvahu liniový nebo sloupcový osvětlovač. Hotový osvětlovač by se mohl upevnit k profilu ramena, nicméně by mohly nastat určité konstrukční problémy kvůli délce osvětlovače a pak také kvůli jeho hloubce. Kromě těchto typů by připadal v úvahu také bodový osvětlovač.

4.2.6 Vývojové kity

NUCLEO-F411RE

Vývojový kit NUCLEO-F411RE ze série NUCLEO-64 od společnosti STM32 umožňuje uživateli flexibilně zkoušet nové koncepty a je určen především pro tvorbu prototypů. Kit obsahuje procesor STM32F411RE umožňující různé kombinace výkonu a spotřeby energie. Na plošném spoji jsou umístěny Arduino a Morpho konektory, kterými je

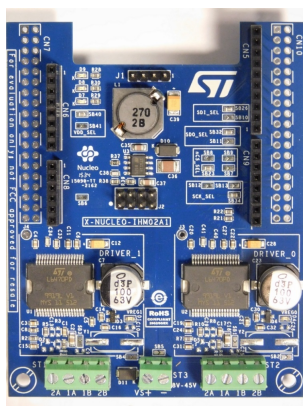
možné zařízení snadno rozšířit o širokou nabídku modulů. K zařízení je přímo připojen programátor ST-LINK. Mimo jiné dále kit obsahuje resetovací a uživatelské tlačítko, uživatelskou LED diodu, krystalový oscilátor 32.768 kHz a další prvky. Vývojový kit je zobrazen na obrázku 4.19. [8]



Obrázek 4.19: Vývojový kit NUCLEO-F411RE, převzato z [8]

X-NUCLEO-IHM02A1

Modul X-NUCLEO-IHM02A1 od společnosti STM32 je rozšířením pro výše zmíněný kit. Obsahuje budiče krokových motorů pro dvě osy. Tato funkce je zajištěna dvěma čipy L6470. Pro spojení s vývojovým kitem obsahuje modul konektory Arduino a Morpho. Komunikace s čipy probíhá pomocí SPI rozhraní. Čipy jsou na desce zapojeny řetězově nebo-li daisy chain. Moduly je možné současně připojit až čtyři, přičemž výběr konkrétní dvojice čipů je zařízen pomocí různých CS. Modul je schopný dodat maximálně 7 A každému motoru a mimo jiné obsahuje LED diody signalizující napájení, chyby a probíhající operaci. Modul je zobrazen na obrázku 4.20. [9]



Obrázek 4.20: Modul X-NUCLEO-IHM02A1, převzato z [9]

4.2.7 Ovladač osvětlení

RGBW-RF40B

Pro ovládání osvětlení byl dokoupen ovladač RGBW-RF40B. Ovladač obsahuje PWM modulátor s napájením 12 až 24 V, RF přijímač a je na každém výstupu schopen dodat 2 A. Součástí je také dálkové ovládání s možností regulace jasu, barevné složky a s použitím případných světelných efektů. Ovladač je zobrazen na obrázku 4.21.[21]



Obrázek 4.21: Ovladač osvětlení RGBW-RF40B, převzato z [21]

PD3-3024-3-EI

Na obrázku 4.22 je zobrazena řídicí jednotka PD3-3024-3-EI. Tuto specializovanou řídicí jednotku pro osvětlovací systémy je možné použít pro osvětlení se vstupním napětím 24 V. Jednotku lze napájet střídavým napětím přímo ze sítě. Na svůj tříkanálový výstup dokáže dodat 1,1 A. Kromě ovládání na předním panelu lze jednotce posílat příkazy přes Ethernet. Kromě konstantního osvětlení jednotka umožňuje osvětlení stroboskopické. Dále je zde možnost připojení externího triggeru pro ovládání vnitřního optočlenu. Pak lze osvětlení ovládat externím signálem. [23]



Obrázek 4.22: Ovladač osvětlení PD3-3024-3-EI, převzato z [23]

Tento typ ovladače nakonec v práci nebyl použit, ale bylo by možné do budoucna

ho využít pro regulaci osvětlení z PC. Bylo by potřeba do uživatelské aplikace implementovat komunikaci přes Ethernet a příslušné příkazy.

4.3 Software

Pro ovládání celého stanoviště byl nejdřív vytvořen program řídící mikroprocesor. Hlavní funkcí mikroprocesoru je přijímat zprávy poslané přes UART a podle nich posílat příkazy budičům motorů L6470. Popis příkazů pro budiče lze nalézt v technickém listu [22]. Zprávy přes UART je možné posílat přímo pomocí programů, jako je například Hercules. Pro jednodušší ovládání byla ale vytvořena aplikace v jazyce C#.

4.3.1 Struktura zpráv a příkazů

Příkazy pro budiče motorů

Na obrázku 4.23 je zobrazena tabulka všech příkazů z technického listu. Pro výslednou funkci stanoviště však nebyly využity všechny. Jako příkazy pro vyvolání pohybu byly využity příkazy Run, Move a GoTo. Příkaz Run slouží pro stálý běh motoru v daném směru a rychlosti. Příkaz Move slouží pro posun o daný počet kroků určeným směrem. Příkaz GoTo slouží pro přesun do dané pozice. Pro příkazy Move a GoTo bylo potřeba omezit maximální rychlost motoru, proto bylo nutné implementovat příkaz SetParam, který nastaví hodnotu daného registru. Tento příkaz nebyl implementován jako univerzální, ale pouze jako konkrétní funkce pro nastavení maximální rychlosti. Aktuální pozice motoru je také ukládána do registru uvnitř budiče. Pro správnou funkci příkazu GoTo byl tedy využit také příkaz ResetPos, který nastaví vnitřní pozici budiče na 0. Pro určování směru pohybu u příkazu GoTo, byl také využit příkaz GetParam ve variantě získání obsahu registru pozice. V případě přijímání dat pak dochází k odesílání příkazu NOP, jenž nemá funkční význam, ale odesílá se proto, aby docházelo ke generování hodinových impulsů. Dále, aby bylo možné motor zastavit, byl využit příkaz SoftStop. Po provedení tohoto příkazu je motor stále napájen a zabraňuje tak rotoru v pohybu. Aby bylo možné motor uvolnit, byl implementován příkaz SoftHiZ, který přepne výstup budiče do stavu vysoké impedance. Během práce na zařízení byly také využity příkazy GetStatus a varianty příkazu SetParam pro nastavení mikrokrokování a omezení proudu. Tyto příkazy však ve výsledku nebyly využity.

Command mnemonic	Command binary code					Action
	[7 ... 5]	[4]	[3]	[2 ... 1]	[0]	
NOP	000	0	0	00	0	Nothing
SetParam(PARAM,VALUE)	000	[PARAM]				Writes VALUE in PARAM register
GetParam(PARAM)	001	[PARAM]				Returns the stored value in PARAM register
Run(DIR,SPD)	010	1	0	00	DIR	Sets the target speed and the motor direction
StepClock(DIR)	010	1	1	00	DIR	Puts the device into Step-clock mode and imposes DIR direction
Move(DIR,N_STEP)	010	0	0	00	DIR	Makes N_STEP (micro)steps in DIR direction (Not performable when motor is running)
GoTo(ABS_POS)	011	0	0	00	0	Brings motor into ABS_POS position (minimum path)
GoTo_DIR(DIR,ABS_POS)	011	0	1	00	DIR	Brings motor into ABS_POS position forcing DIR direction
GoUntil(ACT,DIR,SPD)	100	0	ACT	01	DIR	Performs a motion in DIR direction with speed SPD until SW is closed, the ACT action is executed then a SoftStop takes place.
ReleaseSW(ACT, DIR)	100	1	ACT	01	DIR	Performs a motion in DIR direction at minimum speed until the SW is released (open), the ACT action is executed then a HardStop takes place.
GoHome	011	1	0	00	0	Brings the motor into HOME position
GoMark	011	1	1	00	0	Brings the motor into MARK position
ResetPos	110	1	1	00	0	Resets the ABS_POS register (set HOME position)
ResetDevice	110	0	0	00	0	Device is reset to power-up conditions.
SoftStop	101	1	0	00	0	Stops motor with a deceleration phase
HardStop	101	1	1	00	0	Stops motor immediately
SoftHiZ	101	0	0	00	0	Puts the bridges into high impedance status after a deceleration phase
HardHiZ	101	0	1	00	0	Puts the bridges into high impedance status immediately
GetStatus	110	1	0	00	0	Returns the STATUS register value
RESERVED	111	0	1	01	1	RESERVED COMMAND
RESERVED	111	1	1	00	0	RESERVED COMMAND

Obrázek 4.23: Tabulka příkazů z technického listu, převzato z [22]

Jednotlivé příkazy jsou v technickém listu dále popsány detailněji. Pro ukázkou zde popíši příkaz GoTo. Popis příkazu GoTo z technického listu je zobrazen na obrázku 4.24. První bajt představuje označení příkazu. Následující bajty pak obsahují pozici, do které se má motor přesunout. V dalším popisu je zde uvedena informace o směru přesunu, o závislosti na nastaveném mikrokrokování a možnostech použití příkazu.

9.2.8 GoTo (ABS_POS)

Table 44. GoTo command structure

Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	
0	1	1	0	0	0	0	0	From host
X	X	ABS_POS (Byte 2)						From host
ABS_POS (Byte 1)								From host
ABS_POS (Byte 0)								From host

The GoTo command produces a motion to ABS_POS absolute position through the shortest path. The ABS_POS value is always in agreement with the selected step mode; the parameter value unit is equal to the selected step mode (full, half, quarter, etc.).

The GoTo command keeps the BUSY flag low until the target position is reached.

This command can be given only when the previous motion command has been completed (BUSY flag released).

Any attempt to perform a GoTo command when a previous command is under execution (BUSY low) causes the command to be ignored and the NOTPERF_CMD flag to rise (see [Section 9.1.22](#)).

Obrázek 4.24: Popis příkazu GoTo z technického listu, převzato z [22]

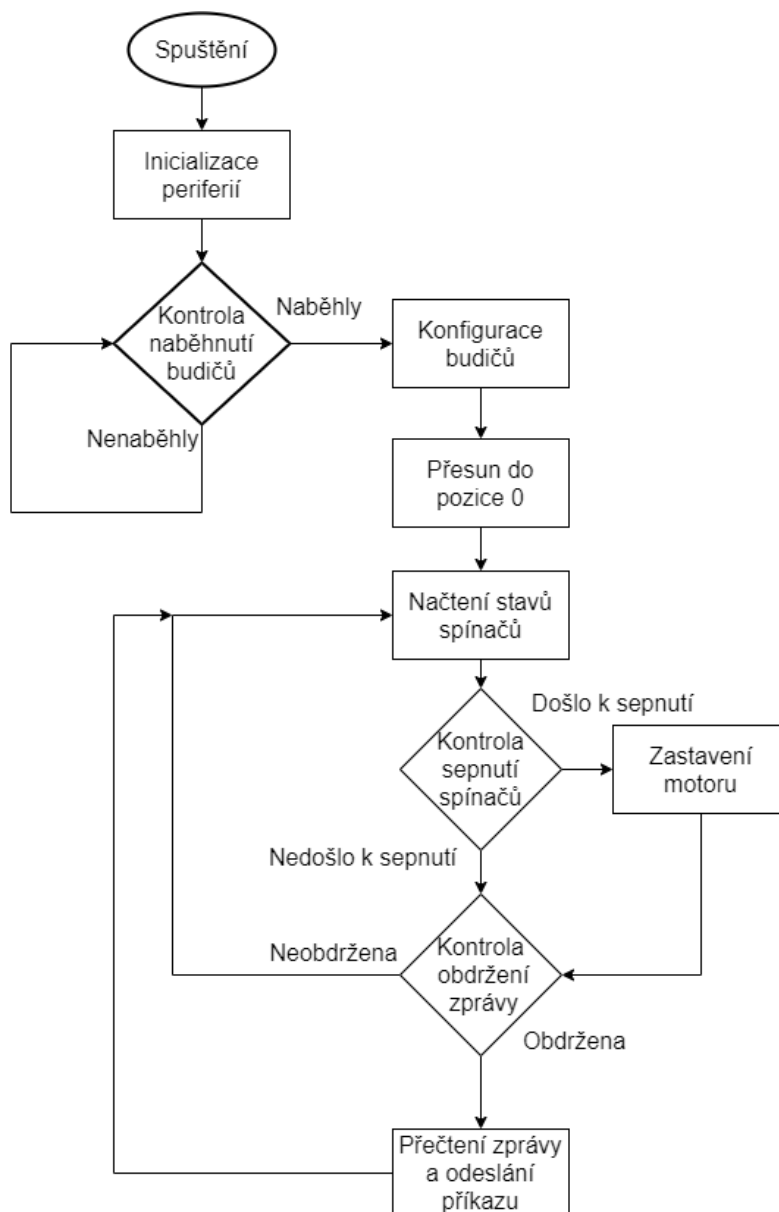
Zprávy pro mikroprocesor

Pro komunikaci s mikroprocesorem byla vytvořena vlastní struktura zpráv. Tyto zprávy i s jejich popisem byly uvedeny do textového souboru. Pro ukázkou zde popíši zprávu pro příkaz GoTo. Úryvek z textového souboru je zobrazen na obrázku 4.25. Na začátku zprávy je uvedena její délka. Ta podává přijímací funkci v mikroprocesoru informaci o tom, kolik znaků má očekávat. Po přijetí všech znaků je zpráva funkcí předána pro její přečtení a odeslání příslušného příkazu. Do délky zprávy nejsou zahrnuty znaky představující délku a následující oddělovač ve formě středníku. Po tomto středníku následuje označení zprávy. Dále zpráva obsahuje informaci o tom, pro který budič a na kterém modulu je příkaz určený. Nakonec zpráva obsahuje číselné vyjádření požadované pozice pro oba motory. Tyto pozice jsou od sebe odděleny středníkem. Podobným principem jsou popsány i ostatní zprávy, které je možné mikroprocesoru posílat.

```
GoTo
  10;GT0020;20;
  10 - délka příkazu (variabilní)
  GT - označení příkazu
  0 - výběr motoru na desce, 0 = oba, 1 = první, 2 = druhý
  0 - nCS=Chip select, možnosti 1 = kamera, 0 = rameno
  20 - pozice pro první motor, možnosti
  ; - oddělovač
  20 - pozice pro druhý motor, možnosti
  ; - oddělovač
```

Obrázek 4.25: Popis zprávy pro příkaz GoTo

4.3.2 Vývojový diagram



Obrázek 4.26: Vývojový diagram

Na obrázku 4.26 je zobrazen vývojový diagram programu v mikroprocesoru. Po spuštění programu dojde k inicializaci periférií. V tu chvíli je nakonfigurována zelená signalizační LED, systémový časovač, SPI a UART. Zároveň dojde k resetu budičů motorů.

V další části dochází ke kontrole, zda jsou budiče napájeny. Kontrola je zajištěna sledováním stavu červené LED na modulu s budiči. LED se rozsvítí, pokud došlo k připojení napájení nebo k resetu. Tím je zajištěno, že následná konfigurace budičů proběhne, až když jsou budiče připraveny. Reset probíhá přes pin budiče, nikoliv přes odeslání

příkazu. Pro případ, že budiče byly od začátku napájeny a proběhl pouze reset, je zde ještě vložena zpoždovací smyčka trvající 5 ms.

Pokud budiče v pořádku naběhly, dojde k jejich nakonfigurování. Nejdříve jsou odeslány příkazy `GetStatus`, po kterých budiče vrátí informaci o svém stavu. Po této zprávě také zhasnou červené LED na modulech s budiči. Dále jsou odeslány příkazy `SoftHiZ`, aby bylo zajištěno, že před konfigurací nebudou motory napájeny. Následně pak dojde k nastavení maximálních rychlostí.

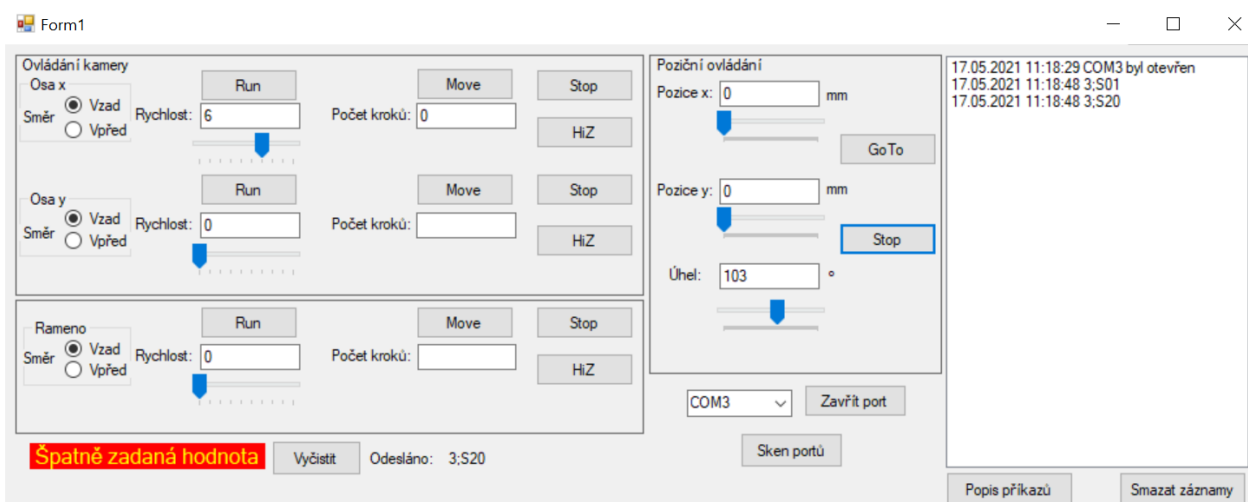
Po této operaci se pokračuje přesunem motorů do pozice 0. Nejdříve se spustí motory příkazem `Run` v příslušném směru. Následně jsou ve smyčce sledovány stavy koncových spínačů značících nulovou pozici. V případě doběžné hrany od spínače dojde k zastavení příslušného motoru a k vyresetování jeho pozice. Zachycení doběžné hrany je zajištěno porovnáváním předchozího a současného stavu spínače.

Pokud jsou všechny motory zastaveny v pozici 0, pokračuje program do hlavní smyčky. Na začátku je opět načten stav spínačů. Následně se kontroluje, jestli došlo k jejich sepnutí. Zde už je také přihlíženo k požadovanému směru pohybu. Tato funkce byla přidána pro případ, že motor odjíždí od sepnutého spínače. Během rozepínání spínače docházelo k zakmitání signálu a stávalo se tak, že se motor zastavil chvíli po rozepnutí spínače. Proto byla zavedena funkce sledování jen toho spínače, ke kterému se motor pohybuje. Pokud tedy došlo k sepnutí, dojde k zastavení příslušného motoru. Následuje kontrola, zda byla přijata zpráva přes UART.

Zde dochází ke kontrole, zda je přijímací registr prázdný. Pokud je prázdný, vrací se program na začátek hlavní smyčky. Pokud není, dojde k zavolání funkce, jež přečte zprávu. Následně se podle písmen označujících příkaz přeskočí do příslušné sekce. V těchto sekcích jsou vyčteny ze zprávy parametry potřebné pro naplnění příkazu a následně je zavolána funkce pro odeslání příkazu. Příkazy pro získání například pozice nebo statusu následně odešlou zprávy přes UART zpět do PC. Pohybové příkazy `Run`, `Move` a `GoTo` jsou také rozšířeny o kontrolu směru spínače. Pokud je spínač sepnut a zároveň přečtený směr ze zprávy by způsobil pohyb směrem k tomuto spínači, nedojde k odeslání příkazu, ale k odeslání zprávy přes UART do PC. Tato zpráva upozorní uživatele, že má špatně nastavený směr pohybu. Pokud je směr správně nastaven, dojde k odeslání zprávy potvrzující, že je vše v pořádku. Jelikož příkaz `GoTo` neobsahuje informaci o směru pohybu, bylo potřeba ji získat jiným způsobem. Jak bylo

dříve zmíněno, směr pohybu je klíčový pro zastavení motoru po sepnutí spínače. Ještě před odesláním příkazu GoTo je zjištěna aktuální pozice motoru pomocí příkazu GetParam. Tato aktuální pozice je pak porovnána s požadovanou pozicí a podle výsledku je nastaven směr pohybu. Po odeslání příkazu se program vrací na začátek hlavní smyčky.

4.3.3 Uživatelská aplikace



Obrázek 4.27: Uživatelská aplikace

Na obrázku 4.27 je zobrazena uživatelská aplikace. Aplikace byla vytvořena v jazyce C# jako aplikace Windows Forms. V pravé části obrázku je zobrazen záznamník, ve kterém se zobrazují zprávy s časovou značkou. Do záznamníku se také zapisují zprávy od mikroprocesoru při použití pohybových příkazů. Jsou to hlavně zprávy ohlašující špatnou volbu směru. Pod záznamníkem se nachází tlačítko Popis příkazů, které po stisknutí otevře textový soubor s popisem zpráv pro mikroprocesor. Vedlejší tlačítko Smazat záznamy slouží pro vyčištění záznamníku.

V prostřední části dole je ovládání pro porty. V rozbalovacím seznamu se zobrazují všechny dostupné porty. Seznam automaticky po zapnutí aplikace naskenuje dostupné porty. Pro případ připojení zařízení až po zapnutí aplikace je zde také tlačítko Sken portů pro opakované načtení. Tlačítko v obrázku označené jako Zavřít port slouží pro zavření portu. V případě zavřeného portu se text na tlačítku změní na Otevřít port. Jak je vidět v záznamníku, po otevření portu se v něm tato informace objevila.

V levé dolní části aplikace je dále textové pole, ve kterém se vypisují chyby uživatele. V obrázku lze vidět informaci o špatně zadané hodnotě po tom, co proběhl pokus

o zapsání záporné hodnoty úhlu. Vedle tohoto pole je tlačítko Vyčistit, jež chybový záznam vymaže. Vedle tlačítka je další textové pole, které vypisuje poslední odeslanou zprávu.

V horní levé části aplikace je zobrazen blok pro ovládání pohybu kamery v obou osách. Jsou zde přepínací tlačítka pro určení směru pohybu. Směr vpřed představuje posun od spínače pro nulovou polohu. Dále jsou zde tlačítka pro příkaz Run. K těmto tlačítkům jsou připojena textová pole pro zadání rychlosti. Hodnotu rychlosti je také možné zadávat pomocí posuvníku pod textovým polem. Další tlačítka jsou pro příkaz Move, která mají opět připojená textová pole pro zadání požadovaného počtu kroků. Pak jsou zde tlačítka pro příkazy Stop a HiZ. Stejné rozvržení ve spodní části je připraveno i pro ovládání ramena.

V prostřední části je nakonec blok pro poziční ovládání. Jsou zde opět textová pole napojená na posuvníky pro zadání pozice. Je tu společné tlačítko GoTo pro odeslání příkazu pro všechny motory. Před odesláním příkazů dojde k přepočtu zadaných hodnot na hodnoty pro budiče. Jak bylo dříve zmíněno, při nahrazení řemenic připojených k ramenu většími, by bylo zde potřeba přepočty upravit. Důvodem pro použití přepočtů byl větší komfort uživatele. Přibližný úhel či vzdálenost v milimetrech si lze lépe představit než počet kroků uložený v registru budiče. Pro posun kamery platí, že 1 mm odpovídá 800 krokům motoru. Pro uživatele tak platí přesnost na 1 mm, jelikož při chybě o několik kroků je tato chyba nerozeznatelná. Nastal zde ovšem problém při dojezdu ke spínači, kdy dojde k zastavení posláním příkazu místo zastavení dojezdem do pozice. Zastavení je v tu chvíli o něco pomalejší a dojde tak ještě k posunu pozice. Tímto způsobená chyba může představovat 2 až 4 mm při návratu do pozice mimo spínač. Chybu se podařilo omezit. Maximální pozice, kterou lze zadat, byla upravena pro stav, kdy dochází k sepnutí spínače. Polohování ramena je pozičně omezeno od 0° do 180°. Jeho přesnost je velmi závislá na napnutí řemenů. Dále je tu také tlačítko Stop pro zastavení všech motorů. Reakce na jeho stisknutí je zobrazena v záznamníku.

Veškerá zadávací pole jsou ošetřena tak, aby nebylo možné zadávat jiné než číselné znaky a aby zadané číslo bylo v daném intervalu. Aplikace má ošetřené některé výjimky související například s manipulací s porty, aby nedocházelo ke zhroucení aplikace z důvodu nepředvídaného stavu.

4.4 Finanční náklady

Tabulka 4.1: Tabulka finančních nákladů na nakoupené součásti

Oddíl	Součást	Počet	Cena (Kč)
Základní konstrukce	Hliníkový profil 30x30 mm	5 m	1675
	Matice s T drážkou	30 kusů	504
	Šrouby M4	100 kusů	55
Konstrukce osy x, y a ramena	Pružná spojka 5x5 mm	2 kusy	138
	Řemenice 5 mm/16 zubů	1 kus	76
	Řemenice 5 mm/16 zubů	4 kusy	236
	Kladka	1 kus	67
	Řemen GT2-6	1 m	96
	Řemen GT2-6	2 m	138
	Řemen GT2-6 smyčka 494 mm	2 kusy	178
	Vodící tyče W10	1 m	280
	Tyč průměr 5 mm	2 m	98
	Lineární ložisko	2 kusy	138
	Ložisko	9 kusů	135
	LED profil N7 Mikro	2 m	130
Elektronika	Krokový motor 42BYGH802U	2 kusy	776
	Krokový motor 0,56 Nm	1 kus	249
	Kabel k motoru 0,5 m	1 kus	39
	Koncový spínač OKY3918	5 kusů	190
	LED zdroj 24 V 150 W	1 kus	450
	LED pásek 24RGB12014	1 m	290
	LED pásek 24EFI22	1 m	270
	RGBW-RF40B LED ovladač 8 A	1 kus	320
Celkem			6528

Výše uvedená tabulka 4.1 obsahuje finanční náklady na nakoupené součásti. V tabulce jsou zahrnuty pouze součásti, které bylo potřeba dokoupit. Celková částka se tak vyšplhala na 6528 Kč. Největší část této ceny tvoří základní konstrukce z hliníkových pro-

filů a krokové motory. Jelikož bylo snahou postavit zařízení co nejlevnější, není zde moc možností, jak cenu snížit. Jedna možnost by byla nahradit koupené řemenice a kladku 3D tištěnou variantou. Při použití plně výplně jsou pak mechanické vlastnosti vyhovující. Další možností snížení ceny by bylo objednání elektronických součástí na asijském trhu. Například u krokových motorů by bylo teoreticky možné dostat se s cenou za kus pod 200 Kč. Výslednou cenu by tak mohlo být možné snížit přibližně o 1000 Kč. V tabulce 4.2 jsou součásti, které nebylo potřeba koupit, protože již byly dostupné na katedře. Přibližná cena je uvedena jen u těch součástí, u kterých ji bylo možné dohledat. Například ovladač osvětlení PD3-3024-3-EI se již nevyrábí. Kolonka spojovací materiál označuje šrouby, matice a podobné. Pokud by se náklady z této tabulky započítaly do celkové ceny, došlo by k nárůstu ceny minimálně o 1300 Kč.

Tabulka 4.2: Tabulka součástí získaných z katedry

Součást	Počet	Přibližná cena (Kč)
NUCLEO-F411RE	1 kus	400
X-NUCLEO-IHM02A1	2 kusy	720
PD3-3024-3-EI	1 kus	16000
L profily	0,8 m	17
Hliníkový profil 30x30 mm	0,5 m	170
Spojovací materiál		
Náklady na 3D tisk		

5. Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit funkční konstrukci, jež umožní počítačově řízený pohyb kamery se změnou geometrie osvětlení a jeho regulací. Výše popsané principy byly realizovány a uvedeny do funkční podoby.

Při návrhu pohybu kamery došlo k problému způsobenému příliš nízkým napětím pro krokový motor. Takový motor měl pak nedostatečný točivý moment. Problém byl vyřešen nahrazením zdroje napětí zdrojem 24 V. Byl zde také problém s nákupem špatného typu motorů. Ten byl nakonec vyřešen zapojením jen poloviny vinutí. Výsledný pohyb v ose x po hlazených tyčích fungoval nakonec bez problémů. Pro fungování posunu v ose y bylo potřeba vyzkoušet různé typy pomocných kol. Původní kola se zadírala v drážkách profilu. Problém byl nakonec vyřešen koly jedoucimi pouze po hranách drážky. Po této úpravě je již posun v ose y také funkční.

Pro pohyb osvětlovacího ramena byl nakoupen výkonnější motor. Bylo také potřeba udělat 3D tištěné řemenice se 100 % výplní. Řemenice s nižším procentem výplně měly tendenci prskat. Problém vznikající u ramena se objevil při pozičním posunu. Při špatném napnutí řemenů docházelo k prokluzu zubů pod řemenem a tudíž k uvedení do špatné pozice. Byl zde navržen způsob, jak tento problém omezit pomocí větších řemenic nebo napínačů řemene.

Osvětlení v ramenu bylo zajištěno pomocí LED pásek a budiče s dálkovým ovládním. Příčnou část ramena s LED páskem je možné vyměňovat a dosáhnout tak univerzálnějšího osvětlení. Ovladač by bylo možné nahradit jiným, který bude umožňovat komunikaci s PC.

Byl vytvořen program pro řízení mikroprocesoru, umožňující posílání příkazů budičům motorů, zpracování vstupů od koncových spínačů a zpracování zpráv z PC společně s odesláním kontrolních zpráv do PC.

Pro jednodušší ovládání z PC byla vytvořena uživatelská aplikace umožňující několik způsobů řízení motorů.

Ve finančním shrnutí byly zmíněny některé nápady, kde by bylo možné ušetřit. Jednalo se především o větší využití 3D tisku pro mechanické díly, a potom nákup levnějších elektronických součástek na asijském trhu.

6. Zdroje

6.1 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] GIEBL, Jan. *Osvětlení ve strojovém vidění*. V Plzni, 2016. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Radek Holota.
- [2] *A Practical Guide to Machine Vision Lighting* [online] [cit. 9.1.2021]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/12/a-practical-guide-to-machine-vision-lighting.html#section-1978458599>.
- [3] *How to Choose the Right Lighting for Machine Vision Applications* [online] [cit. 9.1.2021]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/91422-how-to-choose-the-right-lighting-for-machine-vision-applications>.
- [4] *MACHINE VISION LIGHTING* [online] [cit. 9.1.2021]. Dostupné z: <https://www.cognex.com/what-is/machine-vision/components/lighting>.
- [5] *Basic Lighting Techniques for Machine Vision* [online] [cit. 9.1.2021]. Dostupné z: https://www.visiononline.org/userAssets/aiaUploads/file/CVP_Beginning-Lighting-for-Machine-Vision_Daryl-Martin.pdf.
- [6] *Strojové vidění IV: Osvětlovače* [online] [cit. 13.1.2021]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/strojove-videni-iv-osvetlovace-2008_04_36988_5853/.
- [7] HORNBERG, Alexander. *Handbook of machine vision*. 1. vyd. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH Co KGaA, 2006. ISBN 3-527-40584-4
- [8] *NUCLEO-F411RE* [online] [cit. 16.1.2021]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f411re.html#overview>.

- [9] *X-NUCLEO-IHM02A1* [online] [cit. 13.2.2021]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/ecosystems/x-nucleo-ihm02a1.html#overview>.
- [10] *3D Printed Laser Engraver* [online] [cit. 20.2.2021]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/3D-printed-Laser-Engraver/>.
- [11] *atesystem osvětlení* [online] [cit. 10.3.2021]. Dostupné z: <https://eshop.atesystem.cz/s/2147/osvetleni>.
- [12] *SmartView osvětlení* [online] [cit. 10.3.2021]. Dostupné z: <https://www.smartview.cz/osvetleni-strojoveho-videni>.
- [13] *EFFI-FD-1000-1000-000* [online] [cit. 10.3.2021]. Dostupné z: <https://eshop.atesystem.cz/d/841709/effi-fd-1000-1000-000>.
- [14] *LED zdroj 24V 150W vnitřní* [online] [cit. 25.4.2021]. Dostupné z: https://www.t-led.cz/p/led-zdroj-24v-150w-vnitrni-5524?artnr=253&sizeNr=253&gclid=Cj0KCQjwppSEBhCGARIsANIs4p4Ib_NtSoyX9M-Bb82-Z0siiN5dmtsNlvSa7vfPAqUANXP4yZzi_n0aAgBmEALw_wcB.
- [15] *LED pásek 24RGB12014* [online] [cit. 25.4.2021]. Dostupné z: <https://www.t-led.cz/p/led-pasek-24rgb12014-120led-m-14w-m-zaruka-3-roky-82400>.
- [16] *LED pásek 24EFI22* [online] [cit. 25.4.2021]. Dostupné z: <https://www.t-led.cz/p/led-pasek-24efi22-79280>.
- [17] *42BYGH802U* [online] [cit. 26.4.2021]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/42bygh802u/elektromotory/>.
- [18] *Krokový motor 0,56 Nm* [online] [cit. 26.4.2021]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/p/3829/krokovy-motor-056-nm>.
- [19] *Stepper Motor Basics* [online] [cit. 26.4.2021]. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/t/stepper-motor-basics/275223>.
- [20] *Mechanical Endstop End Stop Limit Switch+Cable* [online] [cit. 8.5.2021]. Dostupné z: <https://www.okystar.com/product-item/3d-printer-switch-limit-switch-oky3918/>.

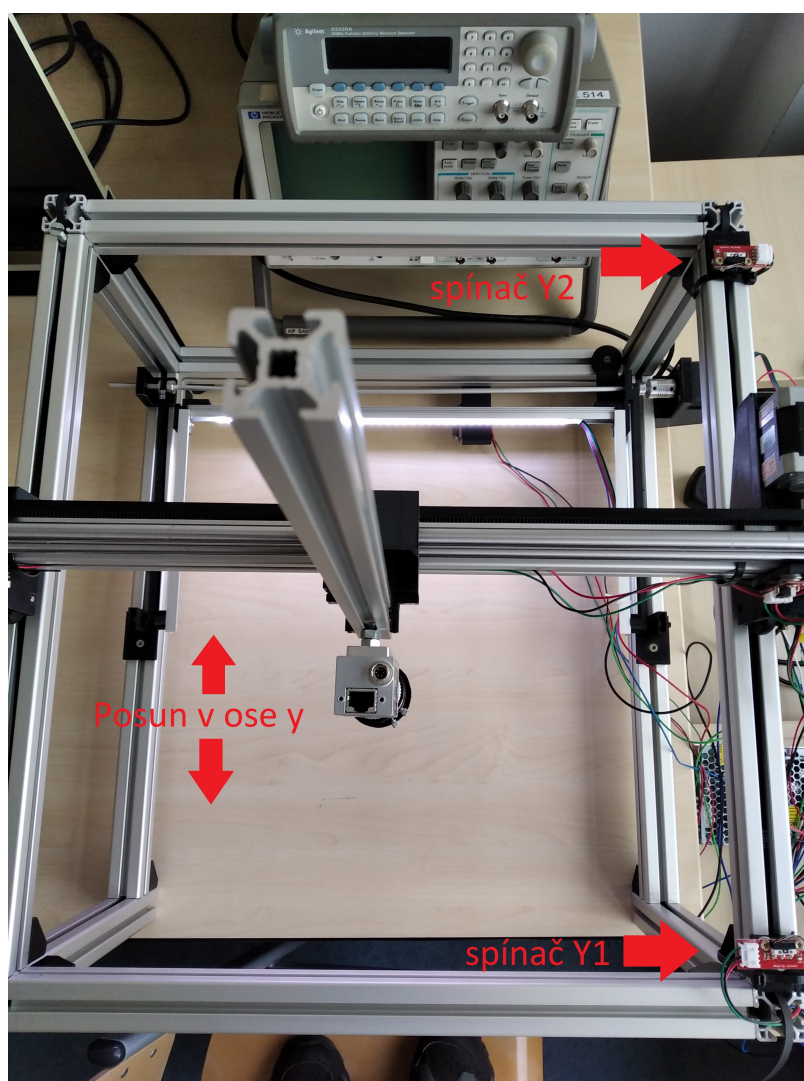
- [21] *RGBW-RF40B LED ovladač 8A* [online] [cit. 8.5.2021]. Dostupné z: <https://www.t-led.cz/p/rgbw-rf40b-led-ovladac-6392>.
- [22] *L6470* [online] [cit. 9.5.2021]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/16470.pdf>.
- [23] *PD3-3024-3-EI* [online] [cit. 11.5.2021]. Dostupné z: <https://www.ccs-grp.com/products/model/3320>.

7. Přílohy

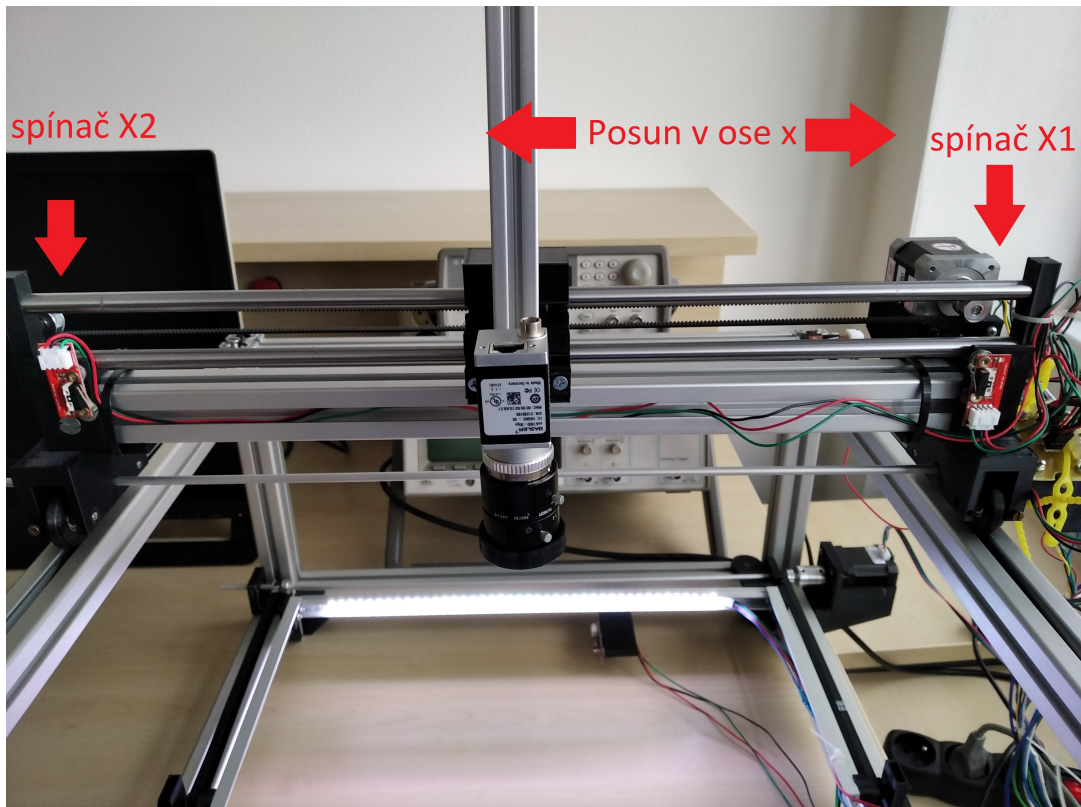
Seznam příloh

1. Fotografie zařízení s popisem umístění spínačů. 40

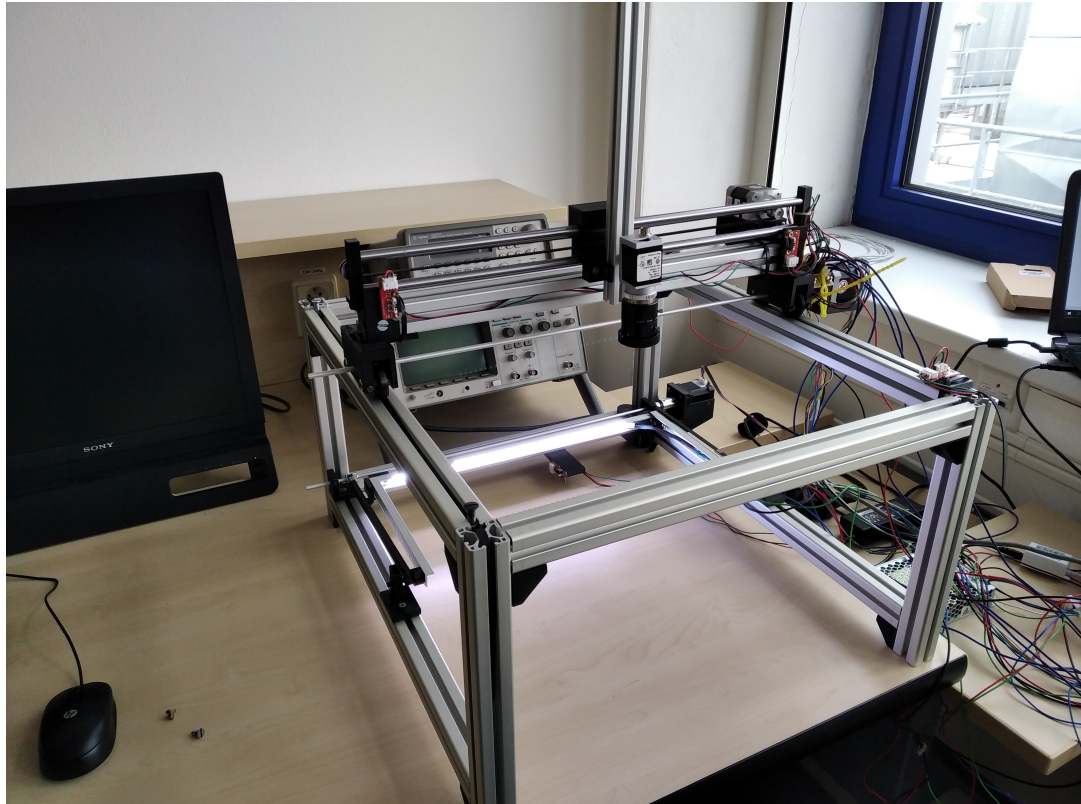
Příloha 1



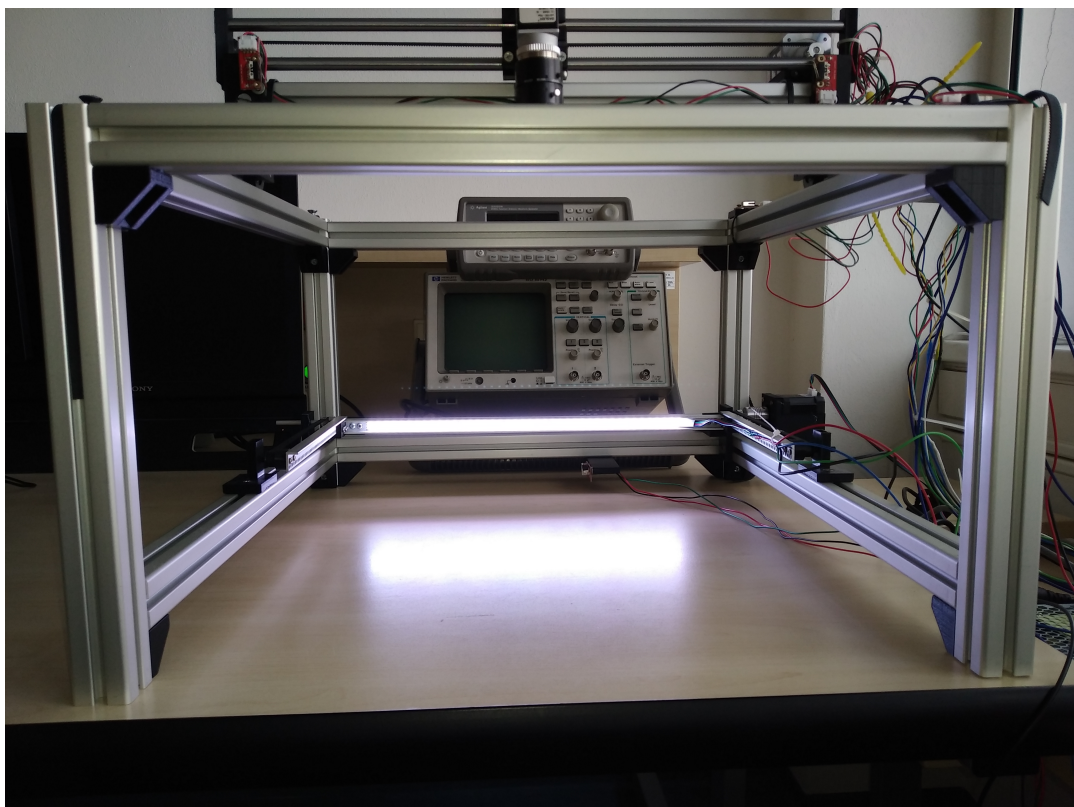
Obrázek 7.1: Fotografie osy y s popisem umístění spínačů



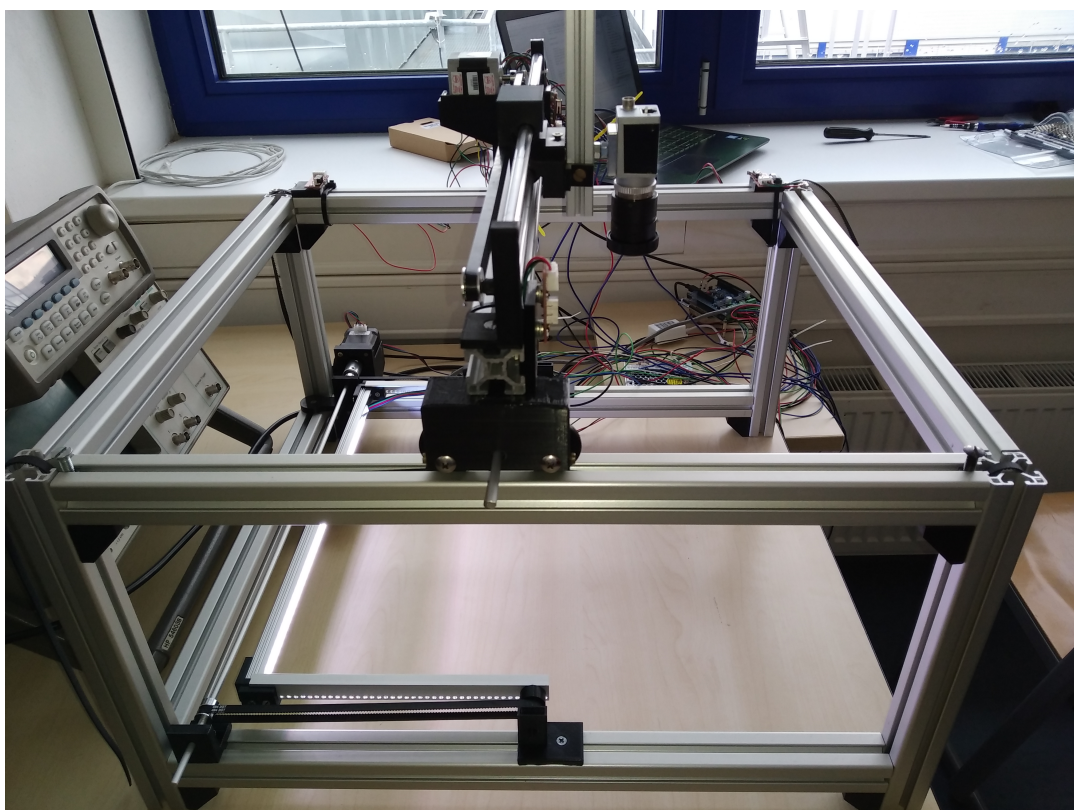
Obrázek 7.2: Fotografie osy x s popisem umístění spínačů



Obrázek 7.3: Fotografie osvětlovače



Obrázek 7.4: Fotografie osvětlovače - přední pohled



Obrázek 7.5: Fotografie osvětlovače - boční pohled