



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

MODERNIZACE ŘÍDICÍ JEDNOTKY MANIPULÁTORU PRO UMISŤOVÁNÍ MAGNETICKÝCH BODŮ

MODERNIZATION OF THE MANIPULATOR CONTROL UNIT FOR THE PLACEMENT OF MAGNETIC POINTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Adámek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Formánek

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Adam Adámek**
Studijní program: Mechatronika
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Martin Formánek**
Akademický rok: 2023/24

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:

Modernizace řídicí jednotky manipulátoru pro umístění magnetických bodů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat modernizací 3-osého pick-and-place manipulátoru, který slouží pro osazování magnetických bodů na fólii. Stávající řídicí systém je založený na platformě Arduino s moduly pro řízení krokových motorů a moduly pro spínání výkonových tranzistorů. Pro spuštění operačního programu manipulátoru je potřeba mít Arduino připojené k nadřazenému PC, který do Arduina průběžně posílá příkazy. Takovéto řešení se ukázalo jako nespolehlivé a občas docházelo ke chybám v komunikaci.

Cílem této práce je nahradit stávající řešení řídicí jednotky (Arduino + nadřazený počítač) jedním mikropočítačem Raspberry Pi, zjednodušit zadávací proceduru operací a doplnit celý systém o kameru snímající QR kódy na podložce, co umožní zautomatizovat volbu požadovaného programu.

Cíle bakalářské práce:

1. Analyzujte stávající stav řídicí jednotky a manipulátoru
2. Navrhněte potřebný hardware, který bude kompatibilní s Raspberry Pi a umožní zachovat původní funkcionalitu systému.
3. Vytvořte software pro řízení manipulátoru, včetně rozpoznání QR-kódů na podložce.

Seznam doporučené literatury:

VALÁŠEK, M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT 1995.

SUMMERFIELD, Mark. Python 3: výukový kurz. Brno: Computer Press, 2010. ISBN 978-80-251-2737-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto práca sa zoberá modernizáciou riadiacej jednotky manipulátoru. Jedná sa o takzvaný pick and place manipulátor s prvkami CNC stroju, ktorý umiestňuje magnetické body na fóliu. Na manipulátore bude vymenená riadiaca jednotka Arduino MEGA s RAMPS v1.3 shieldom a riadiacim počítačom za jednu dosku Raspberry Pi a manipulátor bude doplnený o kameru pomocou ktorej bude rozpoznávať QR kódy na jednotlivých fóliách a podľa toho zvolí príslušný program pre umiestňovanie už spomínaných magnetických bodov. Bude zhodnotený pôvodný stav manipulátoru, jeho riadiaca jednotka a pneumatický systém, ktorý je zodpovedný za prenášanie a umiestňovanie magnetických bodov. V ďalšej časti bude popísaný návrh nového riadenia, využitie open-source G-kód interpreteru PyCNC, nastavenie tohto softwaru a taktiež jeho zakomponovanie s už existujúcimi prvkami na manipulátore ako sú napríklad koncové spínače a elektromagnetické ventily. Posledná časť práce sa zaoberá porovnaním dosiahnutého výsledku, či už ide o funkčnosť manipulátoru a jeho vylepšenie, alebo o estetickú stránku nainštalovania RPi a kamerového modulu na manipulátor. Taktiež bude porovnaná doba zapínania a trvania jedného cyklu ukladania magnetických bodov na manipulátore.

Kľúčové slová

Raspberry Pi, Python, PyCNC, QR kód, pick and place manipulátor

ABSTRACT

This work is being taken up by upgrading the manipulator control unit. It is a so-called pick and place minupulator with CNC machine elements that places magnetic points on a film. On the manipulator, Arduino MEGA control unit with RAMPS v1.3 shield and control computer will be supplemented with Raspberry Pi microcomputer and a camera that will recognize QR codes on individual foils and accordingly select the appropriate program for placing the aforementioned magnetic points. The initial state of the manipulator will be assessed, its control unit and the pneumatic the system responsible for the transmission and placement of the magnetic points. The next section will describe the design of the new control, the use of the open-source G-code interpreter PyCNC, the setup of this software and also its incorporation with the already existing elements on the manipulator such as limit switches and solenoid valves. The last part of the thesis deals with the comparison of the achieved result, whether it is the functionality of the manipulator and its improvement, or the aesthetic aspect of installing the Raspberry Pi and the camera module on the manipulator. Also, the turn-on time and the duration of one cycle of placing the magnetic points on the film of the manipulator will be compared.

Key words

Raspberry Pi, PyCNC, QR codes, pick and place manipulator

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ADÁMEK, Adam. Modernizace řídicí jednotky manipulátoru pro umístění magnetických bodů. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157383>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Martin Formánek.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Modernizácia riadiacej jednotky manipulátoru na umiestňovanie magnetických bodov** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

.....
Dátum

.....
Adam Adámek

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som chcel poďakovať môjmu vedúcemu práce pánovi Ing. Martinovi Formánkovi, za cenné rady, odborné konzultácie a pomoc pri vypracovaní bakalárskej práce. Poďakovanie patrí aj pánovi Ing. Martinovi Slanému, Ph.D. za promptnú pomoc při riešení mojich požiadavkov. Ďalej by som taktiež rád poďakoval mojej rodine a priateľke za podporu při štúdiu. A v neposlednom rade mojím kamarátom spolužiakom a kolegom z MechLabu s ktorými som mohol prácu volne a produktívne konzultovať.

OBSAH

ÚVOD.....	1
1 Rešerš.....	2
1.1 Arduino.....	2
1.1.1 Arduino Mega 2560.....	2
1.1.2 RAMPS v1.3.....	2
1.2 Raspberry Pi.....	3
1.2.1 RPi 3B +.....	3
1.2.2 Rpi Cam V2.....	4
1.3 PyCNC.....	4
1.3.1 DMA.....	5
1.4 Krokové motory NEMA17.....	5
1.4.1 Riadenie krokových motorov.....	5
1.5 Pneumatické systémy.....	5
1.5.1 Kompresory.....	6
1.5.2 Filtre.....	6
1.5.3 Vákuové ejektory.....	6
1.5.4 Pneumatický aktuátory.....	6
1.5.5 Ventily.....	7
1.6 Optické koncové spínače.....	7
2 Zhodnotenie pôvodného stavu manipulátoru.....	8
2.1 Funkcia manipulátoru.....	8
2.2 Arduino MEGA 2560.....	9
2.3 RAMPS v1.3.....	10
2.4 Ovládač krokového motoru.....	10
2.4.1 Driver A4988.....	10
2.5 Krokové motory NEMA17.....	10
2.5.1 Ozubená kladka.....	11
2.6 Koncový spínač TCST1103.....	12
2.7 Reset tlačidlo.....	14
2.8 Pneumatický systém.....	14
2.8.1 Filter/Regulátor.....	15
2.8.2 Elektromagnetický ventil SYJ314M 6-LOU-Q.....	16
2.8.3 Ejektor vákua ZH05 B.....	16
2.8.4 Vzduchový filter ZFB2.....	17
2.8.5 Piest.....	17
2.9 Deliaci mechanizmus.....	17
2.10 G-kód.....	18

3	Praktická časť.....	20
3.1	Zakomponovanie RPi.....	20
3.2	RPi Camera Module V2	22
3.3	PyCNC.....	25
3.4	Hlavný program manipulátoru.....	27
3.5	Zapojenie koncového spínaču TCST1103	29
3.6	Spínanie elektromagnetických ventilov.....	30
3.7	Kryt.....	31
4	Porovnanie nového stavu manipulátoru s pôvodným stavom	32
4.1	Rozdiel v spúšťaní cyklu teraz/predtým.....	32
4.2	Porovnanie dĺžky cyklu	32
4.3	Osadenie riadiacej jednotky	32
	ZÁVER.....	34
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV.....	35
	ZOZNAM OBRÁZKOV	38
	ZOZNAM TABULIEK	39
	ZOZNAM PRÍLOH.....	39

ÚVOD

Automatizácia a robotika sú dnes neoddeliteľnou súčasťou mnohých priemyselných odvetví. Vývoj efektívnych a presných manipulačných systémov predstavuje kľúčovú výzvu, ktorej riešenie umožňuje zvýšenie produktivity a kvality výroby. Manipulačné systémy ako sú napríklad pick and place roboty sú navrhované tak aby vykonávali opakujúce sa príkazy s veľkou presnosťou a rýchlosťou.

Dôležité je aj správne zaintegrovanie takýchto systémov do už existujúcich výrobných liniek. Je potrebné klásť veľký dôraz, nieľaj na hardwarové zaintegrovanie ale taktiež aj softwarové. Spôľahlivým prepojením týchto dvoch svetov sú vstavane systémy.

Jednými z najznámejších nástrojov v tejto oblasti sú mikropočítače Raspberry Pi (RPi). Sú to cenovo dostupné výkonné mikropočítače, ktoré sú ideálne na použitie v priemyselnej automatizácii a robotike. Ich vlastnosti ako kompaktná veľkosť a nízka spotreba ich robia dobrým kandidátom na rôzne aplikácie od riadenia jednoduchých elektrických obvodov až po komplexné procesy.

Táto práca sa zameriava na analýzu a modernizáciu riadiacej jednotky manipulačného systému, konkrétne manipulátoru na umiestňovanie magnetických bodov, s cieľom zjednodušenia zadávajúcej procedúri operácií. Zjednodušenie je docieliteľné zakomponovaním kamery pomocou ktorej by boli rozpoznávané QR kódy.

Analytická časť práce sa zaoberá zhodnotením pôvodného stavu manipulátoru a jeho riadiacej jednotky. V tejto časti je analyzovaný taktiež aj pneumtický systém, ktorý sa na manipulátore nachádza.

V praktickej časti bude nahradená pôvodná riadiaca jednotka manipulátoru za mikropočítač Raspberry Pi. Manipulátor bude doplnený o kamerový modul druhej generácie RPi camera module V2.

1 Rešerš

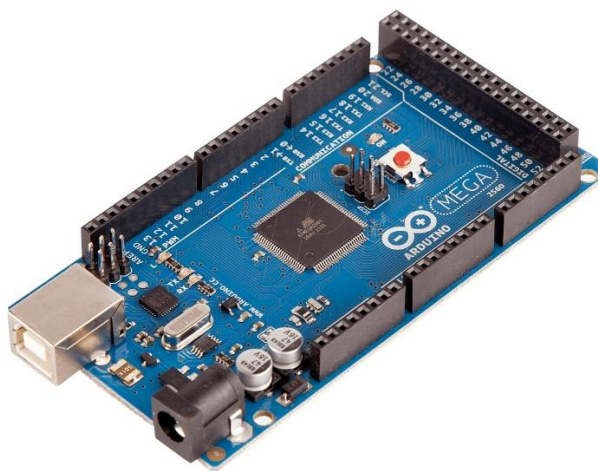
Táto kapitola sa zaoberá rešeršou jednotlivých častí maipulátoru, či už tých, ktoré sa na ňom nachádzali v pôvodnom stave alebo ešte len budú na manipulátor nainštalované v praktickej časti práce.

1.1 Arduino

Arduino je jedným z lacných, jednoduchých a vysoko konfigurovateľných mikrokontrolérov, ktoré zmenili oblasť domácej elektroniky. Arduino a podobné zariadenia, ako napríklad Raspberry Pi majú na svojich malých doskách značný výkon a poskytujú obrovské možnosti automatizácie, vytvárania sietí, zberu a analýzy údajov [1]. Arduino ako také nie je špecifický typ dosky alebo mikrokontroléru. Tento názov označuje celú rodinu plošných dosiek, ktoré majú svoje výhody a nevýhody. Medzi populárne plošné dosky patria napríklad Arduino UNO, Arduino NANO, Arduino Due a Arduino Mega [2]. Arduino je programované v jazyku, ktorý sa dá považovať za zjednodušenú verziu C++.

1.1.1 Arduino Mega 2560

Táto vývojová doska je určená pre projekty, kde Arduino UNO už nestačí. Má väčší výpočtový výkon a nachádza sa na nej 54 vstup/výstup pinov čo je viac ako spomínané UNO na ktorom ich je 20 [3]. Tieto piny fungujú ako programovateľné rozhrania, vďaka ktorým sa na dosku dá pripojiť niekoľko senzorov, aktuátorov a ďalších elektronických súčiastok. Využíva sa v rôznych odboroch vrátane robotiky a automatizácie.



Obrázok 1.1 Arduino MEGA2560 (prevzaté z [4])

1.1.2 RAMPS v.1.3

RepRap Arduino Mega Pololu Shield, skrátene RAMPS. Táto doska je navrhnutá tak aby sa na ňu zmestila všetka elektronika potrebná pre RepRap (3D tlačiareň, ktorá je schopná sa „replikovať“, t.j. dajú sa na nej vytlačiť časti potrebné k zostaveniu novej 3D tlačiarne) v jednom malom balení za nízku cenu. Dizajn zahŕňa zásuvné moduly pre ovládače kokových motorov a riadiacu elektroniku extrúdera. Doska je modulárna, tým pádom ak sa nachádza nad ňou priestor, dajú sa na ňu zapojiť ďalšie shieldy [5].



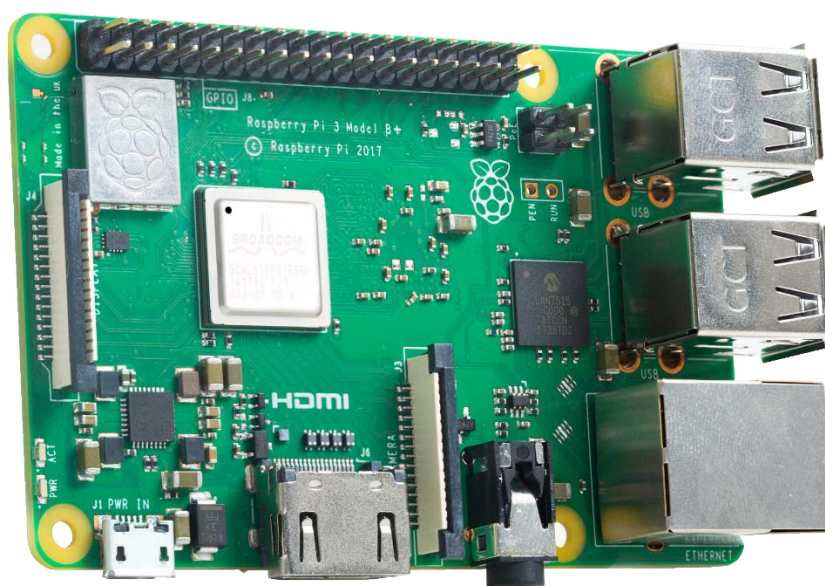
Obrázok 1.2 RAMPS v.1.3 (prevzaté z [6])

1.2 Raspberry Pi

Raspberry Pi sa dá považovať ako kompletný počítač v menšom meradle. Medzi bežné mikropočítače patria mobilné telefóny, notebooky, pracovné stanice a vstavané systémy. Mikropočítač, ktorý je menší ako minipočítač, používa ako procesorovú jednotku (CPU) jeden integrovaný polovodičový čip. Obsahuje pamäť vo forme pamäte len na čítanie (z angl. read only memory - ROM), pamäť s náhodným prístupom (z angl. random access memory - RAM), vstupno/výstupné (I/O) piny a zbernicu, čo všetko je umiestnené na základnej doske [7]. Ich nízka cena a dostupnosť z nich urobili obľúbený nástroj pre tvorivé experimenty. Napriek tomu, že ide o mikropočítač na všeobecné použitie, jeho nízka cena umožnila, aby bol použitý ako súčasť v jednoúčelových zariadeniach [8].

1.2.1 RPi 3B+

Tento model Raspberry Pi (ďalej ako RPi) disponuje so 64-bitovým štvorjadrovým procesorom s frekvenciou 1,4 GHz [9]. Model vychádza z RPi modelu 3 B, má však vylepšený výkon v niekoľkých ohľadoch. Je vybavený vylepšeným integrovaným Broadcom SoC procesorom BCM2837B0 so štyrmi 64-bitovými jadrami Cortex-A53. Vďaka lepšiemu odvodu tepla a optimalizovanej spotrebe sú tieto jadrá teraz taktované na 1,4 GHz namiesto pôvodných 1,2 GHz. Tento takt je udržiavaný pri teplotách do 70 stupňov celzia. Po prekročení tejto hranice sa takt znižuje na 1,2 GHz. [10]



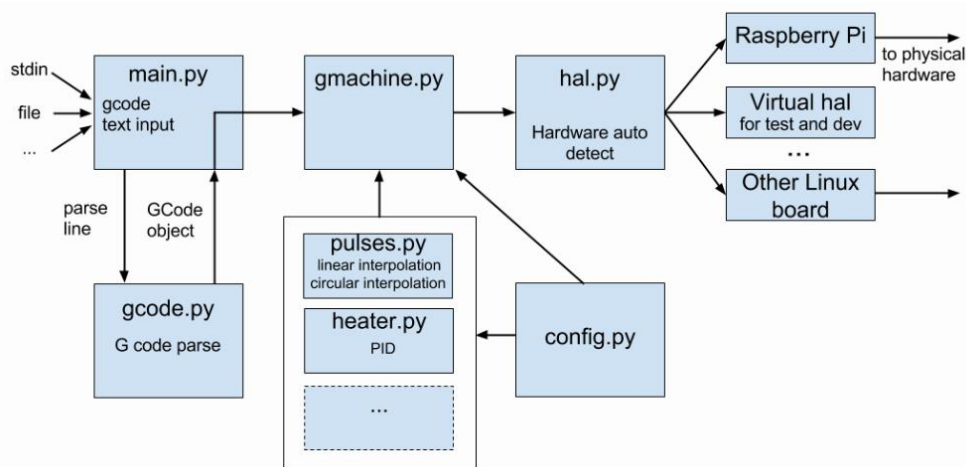
Obrázok 1.3 RPi 3B+ (prevzaté z [10])

1.2.2 Rpi Cam V2

Existuje už niekoľko kamerových modulov pre Raspberry Pi. Ako prvý, originálny model bola vydaná 5-megapixelová kamera a to v roku 2013, neskôr nasledovala 8-megapixelová kamera. Najnovšou verziu kamerového modulu pre Raspberry Pi je modul s 12-megapixelovou kamerou, ktorý bol vydaný v roku 2023. Tieto kamery sú dostupné vo verziách pre viditeľné a infračervené svetlo. Najnovší modul je v dvoch prevedeniach a to v štandardnom a širokouhlom [11].

1.3 PyCNC

PyCNC je vysoko výkonný bezplatný open-source interpretér pre G-Kód a kontrolér pre CNC/3D-tlačiarne. Dokáže bežať na rôznych Linux-om riadených doskách ako sú napríklad Raspberry Pi, Odroid, a Beaglebone [12]. Je voľne dostupný zo stránky www.pypi.org pod názvom *pycnc*. Na obrázku č. 1.4 je vidieť architektúru projektu PyCNC.



Obrázok 1.4 Architektúra projektu PyCNC, (prevzaté z [13])

Využívaná je Direct Memory Access (DMA), na čipovom module, ktorá kopíruje vyrovnávaciu pamäť stavov GPIO (General Pin Input/Output) alokovaných v RAM do skutočných GPIO registrov. Tento proces je synchronizovaný systémovým hodinovým signálom a pracuje nezávisle od jadier CPU. Tým pádom je sekvencia pulzov pre pohyb krokových motorov generovaná v pamäti a následne precízne odoslaná pomocou DMA [14].

1.3.1 DMA

DMA je konkrétny modul, zakoponovaný do RPi, ktorý je použitý na kopírovanie pamäťových blokov z jednej oblasti do druhej. Konkrétne sú kopírované dáta z vyrovnávacej pamäte do GPIO modulu. DMA modul ako taký je súbor registrov, ktoré sa nachádzajú na určitej fyzickej adrese. Vďaka týmto registrom je možné ovládať spomínaný DMA modul [14].

1.4 Krokové motory NEMA17

Krokové motory NEMA17 sú dôležitými prvkami v odvetviach ako napríklad 3D tlač a CNC stroje. Sú to kompaktné ale výkonné motory, ktoré poskytujú presnú kontrolu nad ich pohybom [15]. Názov NEMA17 odkazuje na ich fyzické rozmery, ktoré sú normalizované podľa veľkosti ich rámu. Toto normalizovanie umožňuje uľahčenie výmeny komponentov medzi výrobcami a užívateľmi.

Jeden krok týchto motorov sa prejaví na pootočení ich hriadeľa o 1.8 stupňa. Tým pádom na celé jedno otočenie hriadeľa je potrebných 200 krokov [16].

V rotore krokového motoru sa nachádza permanentný magnet. Okolo tohto rotoru je navinutých niekoľko cievok, ktoré sú aktivované elektronicky. Rotor krokvého motoru sa otáča vo vopred stanovených krokoch do konkrétnych polôh [17].

1.4.1 Riadenie krokových motorov

- **Open loop system**

Open loop systém, je systém, ktorý nemá žiadnu spätnú väzbu. Takýto typ systému nie je závislý na jeho vlastnom výstupe. To znamená, že v open-loop systémoch sa výstup nepoužíva ako riadiaca veličina systému a nemá vplyv na vstup [18].

- **Closed loop system**

Closed loop system je používaný keď je potrebná konzistentnosť a stabilita systému. V takýchto riadiacich systémoch je vstup riadený signálom spätnej väzby z výstupu, aby mohol kompenzovať vzniknuté chyby. Vďaka slučky spätnej väzby môžeme konvertovať akýkoľvek open loop systém na closed loop systém. Spätná väzba zabezpečuje korekciu vstupného signálu na základe požiadavky na výstup. Porovnaním požadovaného výstupu so skutočným stavom systému v uzavretej slučke udržiava a dosahuje požadovaný výstup. Ak sa vytvorený výstup odchyľuje od požadovaného výstupu, systém uzatvorenej slučky generuje chybový signál a tento signál sa privádza na vstup signálu [19].

1.5 Pneumatické systémy

Pneumatika je odvetie strojárstva, ktoré využíva vysokotlakový vzduch na vykonávanie rôznych operácií. V súčasnosti sa tieto systémy široko využívajú v niekoľkých priemyselných odvetviach na automatizáciu viacerých procesov. Medzi najbežnejšie príklady pneumatických

systémov patria pneumatické brzdy, pneumatické ramená a napríklad aj pneumatické tlmivé nárazov [20].

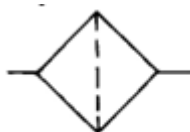
Pneumatické systémy sú zložené z rôznych komponentov ako sú napríklad kompresory, regulátory so zabudovaným filtrom, vákuové ejektory, aktuátory, ventily, medzichladiče a podobné.

1.5.1 Kompresory

Kompresory alebo aj vzduchové pumpy sú používané na privádzanie konštantne natlakovaného vzduchu do systému [21].

1.5.2 Filtre

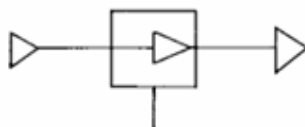
Filtre očisťujú a odvlhčujú vzduch, ktorý je privádzaný do systému [22].



Obrázok 1.5 Schematická značka vzduchového filtru

1.5.3 Vákuové ejektory

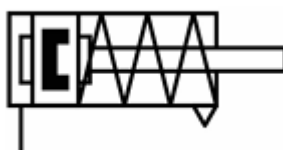
Takéto súčiastky generujú vákum, potrebné k manipuláciám s rôznymi objektmi. Fungujú na princípe Venturiho efektu. Venturiho efekt opisuje pokles statického tlaku v prúdiacich kvapalinách so zvyšujúcou sa rýchlosťou. Je založený na princípe zachovania mechanickej energie. Podľa tohto princípu súčet kinetickej a potenciálnej energie tekutiny je v uzatvorenom systéme konštantný. Keď tekutina preteká cez zúžený úsek potrubia, jej prierez sa zmenší. To vedie k nárastu rýchlosti prúdenia tekutiny a tým pádom k zmenšeniu jej tlaku [23].



Obrázok 1.6 Schematická značka ejektora vákua

1.5.4 Pneumatický aktuátor

Pneumatické aktuátory premieňajú natlakovaný vzduch na mechanický pohyb. Tento pohyb môže byť lineárny alebo otáčavý [24].



Obrázok 1.7 Schematická značka piestu

1.5.5 Ventily

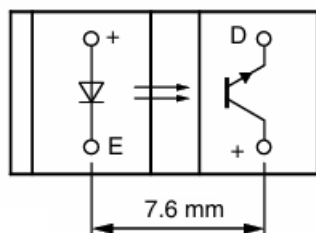
Ventily sú použité na kontrolovanie objemu, tlaku a smeru natlakovaného vzduchu počas toho, ako sa toto médium pohybuje v pneumatickom systéme [25].

1.6 Optické koncové spínače

Sú to transmisívne senzory, ktoré sa skladajú z infračerveného žiaríču a fototranzistoru. Tieto súčiastky sú umiestnené čelne k sebe na optických osiach v olovenom obale, ktorý blokuje viditeľné svetlo [26]. Optické koncové snímače fungujú na princípe detekcie prerušenia infračerveného svetelného lúču medzi vysielateľom a príjmačom. V momente, keď prijímač prestane registrovať infračervené svetlo z vysielateľa, vyšle signál do riadiacej dosky.

Výhody optických koncových snímačov:

- Vysoká presnosť detekcie koncovej polohy
- Spoľahlivosť voči vonkajším vplyvom a vibráciám.
- Kompaktné rozmery a nenáročná montáž



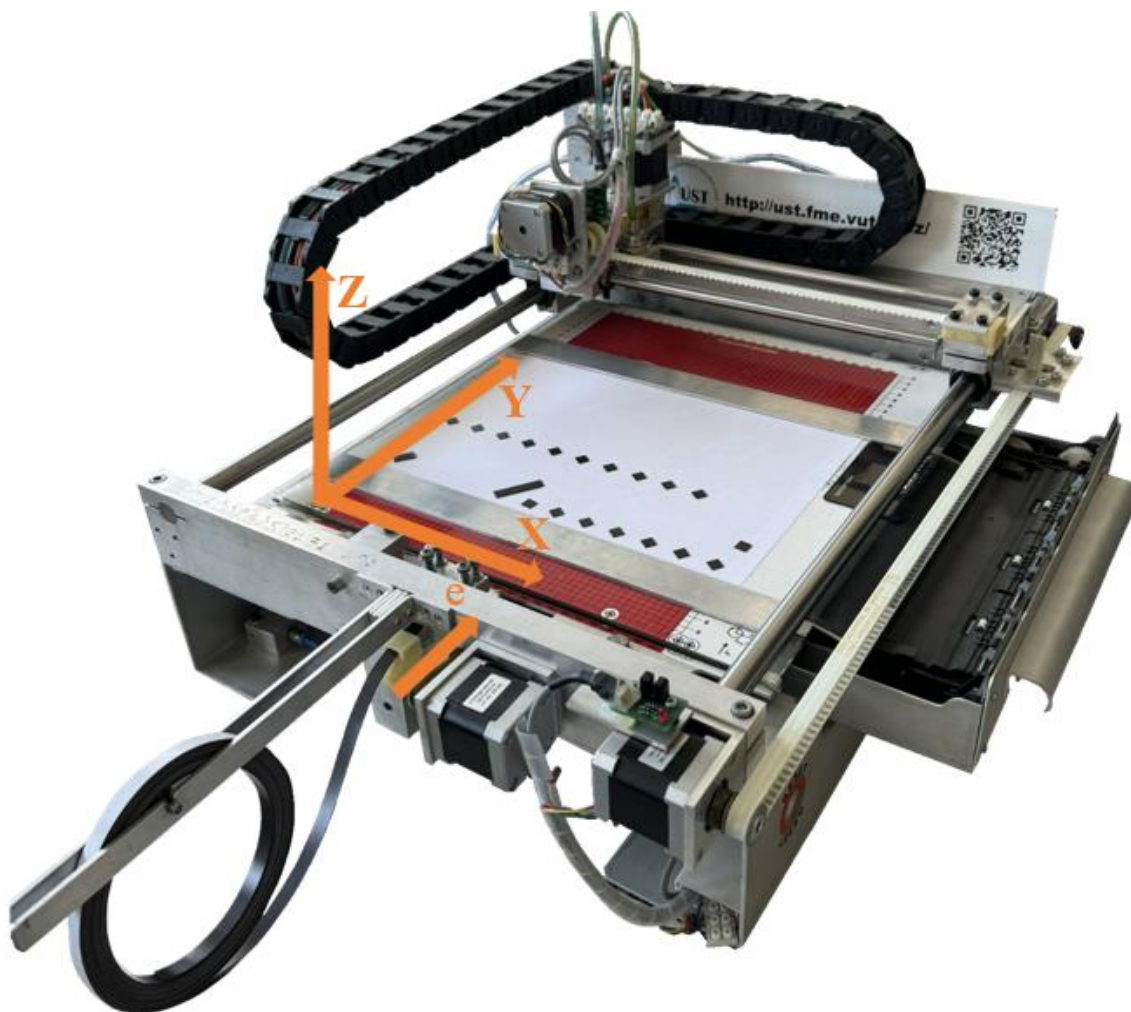
Obrázok 1.8 Obvod koncového spínaču (prevzaté z [26])

2 Zhodnotenie pôvodného stavu manipulátoru

V tejto časti práce bude zhodnotený pôvodný stav manipulátoru. Budú zhodnotené jednotlivé prvky manipulátoru, ako je jeho riadiaca jednotka, pneumatický systém a taktiež aj koncové spínače, ktoré sa na manipulátore nachádzajú.

2.1 Funkcia manipulátoru

Manipulátor, ktorý je typu pick and place zariadenia bol zostavený pre umiestňovanie magnetických bodov na rôzne fólie s notovým zápisom. Skladá sa z niekoľkých častí, ktoré budú podrobnejšie rozvinuté v nasledujúcich kapitolách. Hlavnými časťami sú riadiaca jednotka (kap. č. 2.2 až kap. č. 2.4), krokové motory (kap. č. 2.5), pneumatický systém (kap. č. 2.8) a deliaci mechanizmus (kap. č. 2.9). Hlavnou funkciou manipulátoru je umiestňovanie magnetických bodov na vopred stanovenú pozíciu na fólii. Táto pozícia je zadaná vo zmysle X, Y a Z súradníc. Kde X a Y súradnice značia fyzickú polohu v pracovnom priestore a súradnica Z hovorí o natočení magnetického bodu okolo tejto osi. Magnetická páska je vysúvaná vo smere inkrementálnej osi e. Súradnicový systém je vidieť na obrázku č. 2.1.



Obrázok 2.1 Vyobrazenie súradnicového systému na manipulátore

Na obrázku č. 2.2 sa nachádza jedna z vytvorených fólií a to konkrétne fólia č. 3 na ktorej sú už umiestnené magnetické body.



Obrázok 2.2 Fólia č. 3 s magnetickými bodmi

2.2 Arduino MEGA 2560

Pôvodne sa na manipulátore nachádzalo ARDUINO MEGA 2506 na ktoré bol pripevnený RAMPS v.1.3 shield. Toto Arduino bolo riadené a napájané z nadradeného počítaču, ktorý pomocou USB do neho posielal príkazy.



Obrázok 2.3 Arduino MEGA s RAMPS v1.3 shieldom

2.3 RAMPS v1.3

Tento shield je robený konkrétne pre Arduino Mega 2506 [5], vďaka čomu sa dá jednoducho nasunúť už do slotov pre piny na Arduine. Potrebné je ale na tento shield piny najprv naspájať. Na shield bolo privedených 12V zo zdroju, ktorými boli napájané krokové motory a taktiež aj elektromagnetické ventily. Káblíky z elektromagnetických ventilov boli zapojené do shieldu ako je možné vidieť na obrázku č. 2.3. Na shielde sa nachádzali sloty do ktorých boli taktiež jednoducho zasunuteľné ovládače krokových motorov. Shield je vybavený aj pinmi pre koncové spínače a každý z týchto spínačov odpovedá jednej konkrétnej osi.

2.4 Ovládač krokového motoru

Krokové motory sú ovládané budičmi krokových motorov, ktoré sa nachádzali na spomenutom RAMPS v.1.3 shielde. Každý jeden budič riadi jeden krokový motor. Na tento budič je pripojené ovládacie napätie 3V3, napätie pre budenie krokových motorov 12V, štyri káblíky z dvoch fáz krokového motoru a taktiež signály pre STEP, DIR a ENABLE piny. Aktiváciou STEP pinu vyšle budič signál na pootočenie hriadele o jeden krok [17]. DIR pin zabezpečuje pohyb hriadeľom na motore v smere hodinových ručičiek alebo oproti nim. ENABLE pinom sa riadi stav budiču, ak je naň privedená log. 1 krokový motor je vypnutý [27].

2.4.1 Driver A4988

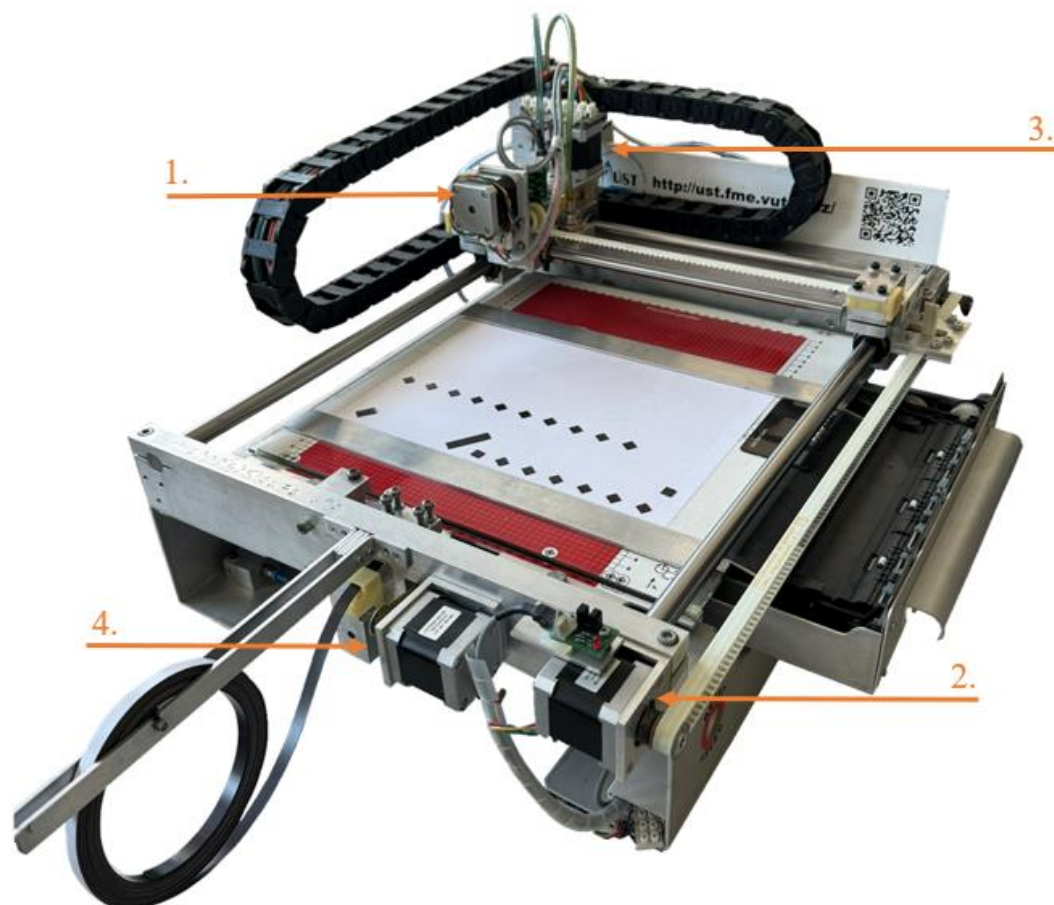
Jedná sa o kompletný mikrokrokový ovládač krokového motoru so zabudovaným prekladačom pre jednoduchú prevádzku s minimálnym počtom ovládacích vodičov. Ovláda bipolárne krokové motory v režimoch plného, polovičného, štvrtového, osminového a šestnásťtinového kroku [28].



Obrázok 2.4 Ovládač krokového motoru A4988 (prevzaté z [27])

2.5 Krokové motory NEMA17

Na manipulátor sú umiestnené celkovo 4 bipolárne krokové motory typu NEMA17. Dva zo štyroch týchto motorov sú potrebné pre pohyb pozicovacieho suportu v hlavných osiach, t. j. v osi X a v osi Y. Tretí krokový motor, ktorý sa nachádza na pozicovacom suporte zabezpečuje natočenie prísavky pri pokladaní magnetického bodu na fóliu. Posledný, štvrtý krokový motor zaisťuje postupné vysúvanie sa magnetickej pásky na strih a následne na odobratie prísavkou, ktorá sa nachádza na pozicovacom suporte. Podrobnejšie je možné si všimnúť jednotlivé krokové motory na obrázku č. 2.5.



Obrázok 2.5 Manipulátor s očíslovanými krokovými motormi

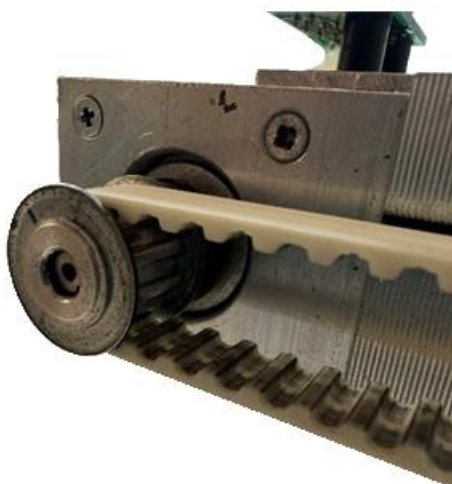
Tabuľka 1 Priradenie krokových motorov k ich osiam

Č. krokového motoru	Príslušná os
1.	X
2.	Y
3.	Z
4.	e

Z každého z krokových motorov vychádza hriadeľ, na konci ktorého sa nachádza ozubená kladka. Na ozubenú kladku je pripojený ozubený remeň. Toto umožňuje pohyb pozicovacieho suportu v pracovnom priestore, natáčanie prísavky a taktiež odvíjanie magnetickej pásky.

2.5.1 Ozubená kladka

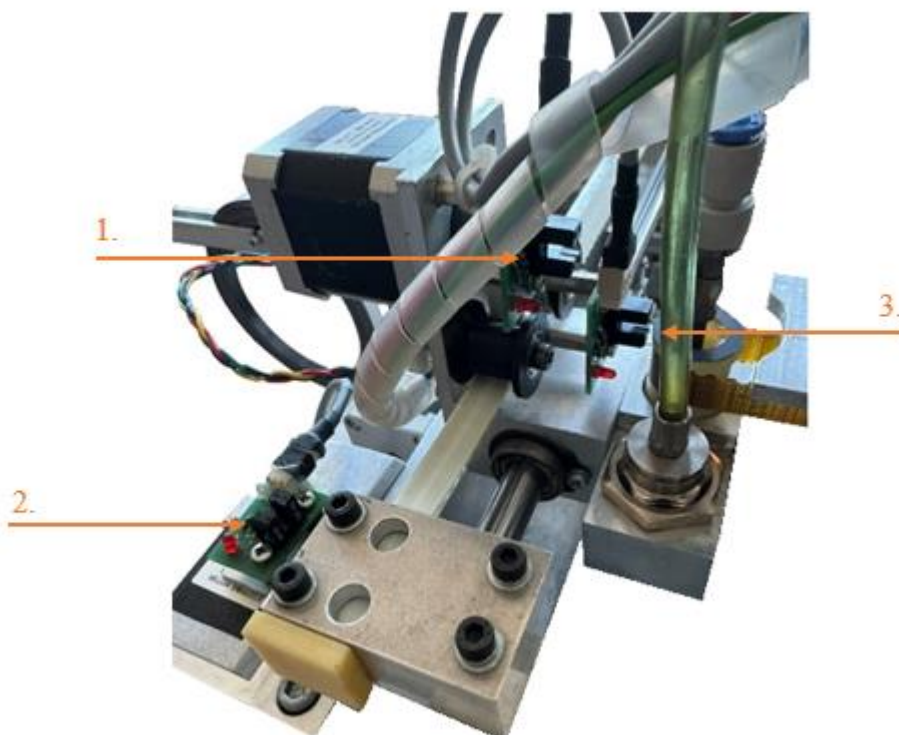
Na obrázku č. 2.6 sa nachádza koniec hriadele jedného zo štyroch krokových motorov, na ktorom je pripevnená ozubená kladka. Vďaka takémuto jej vyhotoveniu je zabezpečené, že nenastane žiadny prešmyk medzi výstupom z krokového motoru a ozubeným remeňom pripojeným na ňom.



Obrázok 2.6 Ozubená kladka na výstupe krokového motoru

2.6 Koncový spínač TCST1103

Na manipulátore sa nachádzajú tri koncové spínače tohto typu. Dva z nich sa nachádzajú na pozicovacom suporte. Tretí je umiestnený na tele manipulátora. Každý z nich spína jednu os.



Obrázok 2.7 Koncové spínače na manipulátore

Tabuľka 2 Priradenie koncových spínačov k ich osiam

Číslo spínaču	Os
1.	X
2.	Y
3.	Z

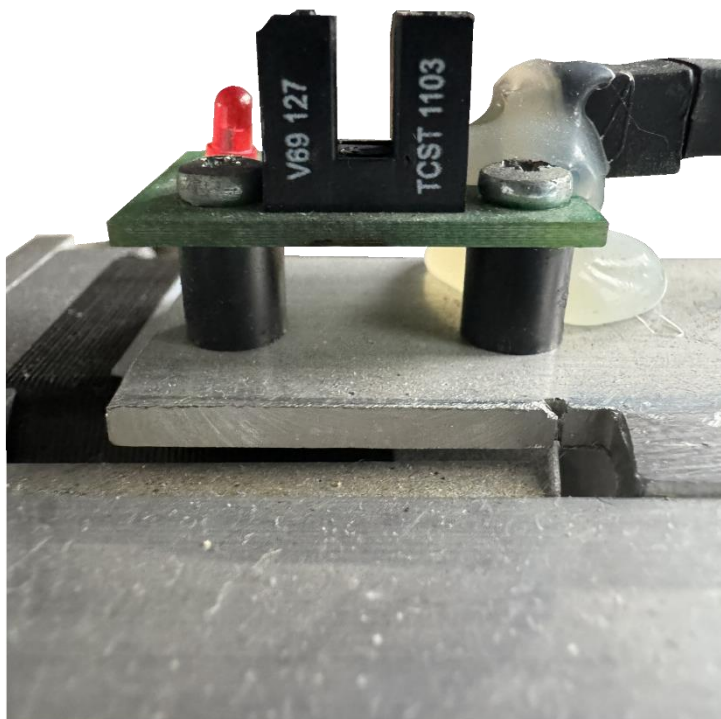
Princíp funkčnosti:

Nezablokovaný vysielateľ:

Vysielateľ infračerveného svetla priamo vysielajú toto svetlo na fototranzistor. Ako lúč dopadá na fototranzistor, aktivuje ho, čo vedie k nízkym odporom a napätie na jeho výstupe. Tento signál nízkeho napätia je braný ako logická nula a informuje riadiacu dosku o tom, že os manipulátora nie je v koncovéj polohe a krokový motor môže pokračovať v pohybe [29].

Prerušený lúč:

Ak nejaký objekt preruší infračervený lúč, fototranzistor sa deaktivuje, vznikne na ňom vysoký odpor, ktorý je doprevádzaný zvýšeným napätím. Tento signál vysokého napätia informuje riadiacu dosku, že os manipulátora dosiahla koncovú polohu a motor sa zastaví [29].



Obrázok 2.8 Koncový spínač TCST1103

2.7 Reset tlačidlo

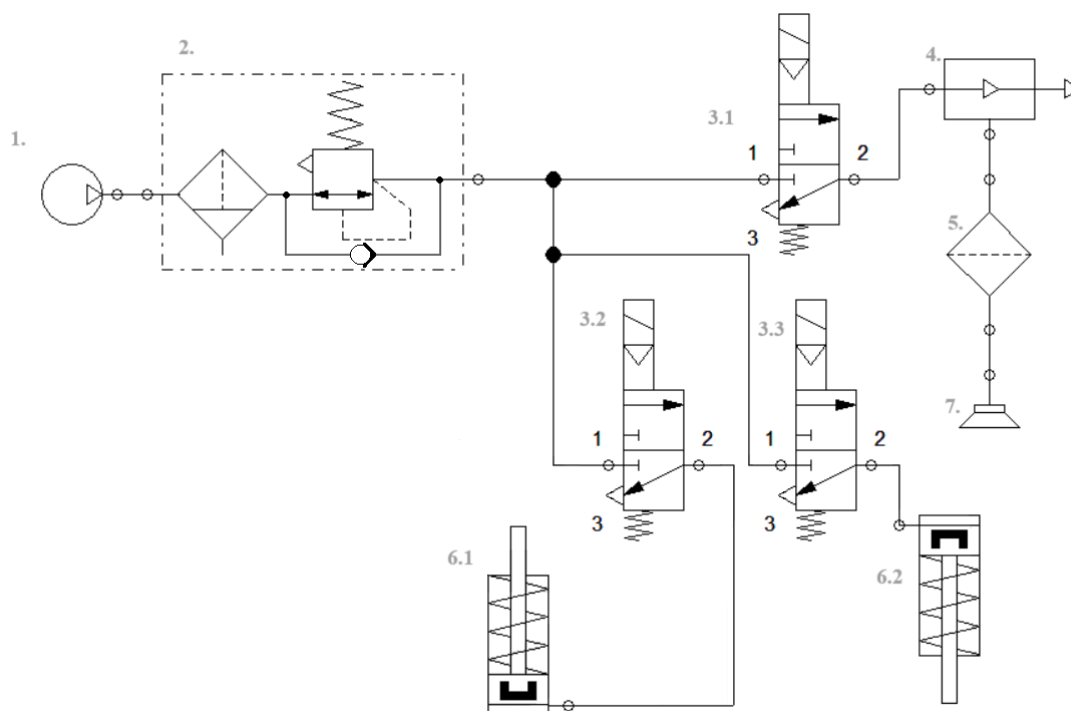
Na manipulátore sa nachádza jeden push-button. Jeho pôvodná funkcia mala byť zresetovania Arduina MEGA, ak by nastali nejaké prípadné problémy s ním. Nakoniec ale nebolo využívané.



Obrázok 2.9 Fotografia RESET tlačidla

2.8 Pneumatický systém

Na obrázku č. 2.10 sa nachádza schéma celkového zapojenia pneumatického systému, ktorý zabezpečuje strih a presun magnetických bodov z deliaceho mechanizmu na určenú polohu.



Obrázok 2.10 Schematický popis pneumatického systému vykreslený v programe FluidSim

Tabuľka 3 Popis častí nachádzajúc sa na obrázku č. Obrázok 2.10.

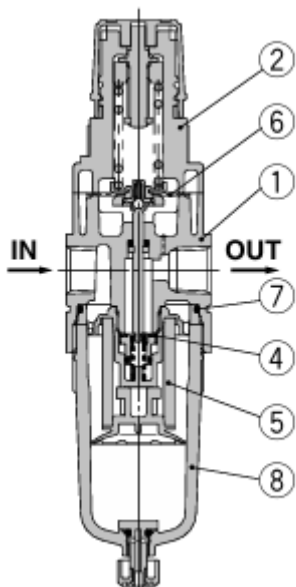
Č.	Popis časti
1	Kompresor
2	Filter-Regulátor
3 ₁₋₃	Elektromagnetický ventil
4	Ejektor vákua
5	Filter vzduchu
6 ₁₋₂	Piest
7	Prísavka

2.8.1 Filter/Regulátor

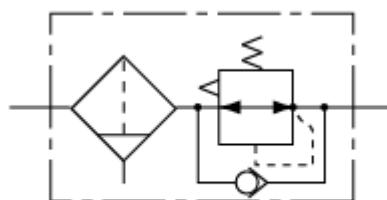
Cez tento komponent sa privádza natlakovaný vzduch do systému. Nachádza sa na začiatku celého systému a pôsobí ako regulátor tlaku v ňom. Taktiež sa na ňom nachádza filter, tým pádom vzduch vstupujúci do systému je očistený o rôzne nečistoty, ktoré by sa mohli niesť v ňom a taktiež je odoberaná vlhkosť zo vzduchu [30].

Princíp činnosti:

Táto súčiastka riadi tlak vzduchu na výstupe a snaží sa ho udržať na konštantnej hodnote. Pri bežnej prevádzke je spätný ventil uzatvorený. Tým pádom filter-regulátor udržiava tlak. Pri vypnutí prívodu vzduchu sa spätný ventil otvorí, tlak v komore sa uvoľní a pružina zdvihne membránu. Vďaka tomuto sa otvorí ventil a uvoľní zostávajúci tlak v systéme. Spätný ventil tak zabezpečuje reguláciu tlaku a slúži aj ako bezpečnostný odzdušňovací ventil. [30].



Obrázok 2.11 Rez filter-regulátorom (prevzaté z [30])



Obrázok 2.12 Schematická značka filter-regulátoru (prevzaté z [30])

Popis jednotlivých častí Filter-regulátoru:

Tabuľka 4 Popis častí filter-regulátoru (prevzaté z [30])

Číslo časti	Popis časti
1.	Telo Filter-regulátoru
2.	Kryt
3.	Puzdro
4.	Ventilový komplet
5.	Filtračná zložka
6.	Membránový celok
7.	Miskový O-Krúžok (tesnenie)
8.	Nádoba na nečistoty

2.8.2 Elektromagnetický ventil SYJ314M 6-LOU-Q

Na manipulátore sa tento typ elektromagnetického ventilu nachádza trikrát. V nulovej polohe sú ventily uzatvorené. Privedením 12V do nich sa jednotlivé ventily otvoria [31]. Vďaka tomu sa môže médium, t.j. vzduch prepravovať v pneumatickom systéme.

Otvorením ventilu č. 1 sa vzduch dostáva do vákuového ejektora, vďaka čomu môže byť magnetický bod premiestňovaný po pracovnom priestore na prísavke.

Otvorením ventilu č. 2 sa vysúva pneumatický piest. Tento piest strihá magnetickú pásku na magnetické body.

Otvorením ventilu č. 3 sa natlakovaný vzduch dostáva do piestu, ktorý sa nachádza na pozicovacom suporte. Tento piest následne vysunie prísavku aby sa dotkla magnetického bodu či už na podložke alebo keď sa ešte len odstrihne v deliacom mechanizme. Dotykom je zabezpečené, že sa magnetický bod prichytí na prísavku a bude presunutý na danú pozíciu.

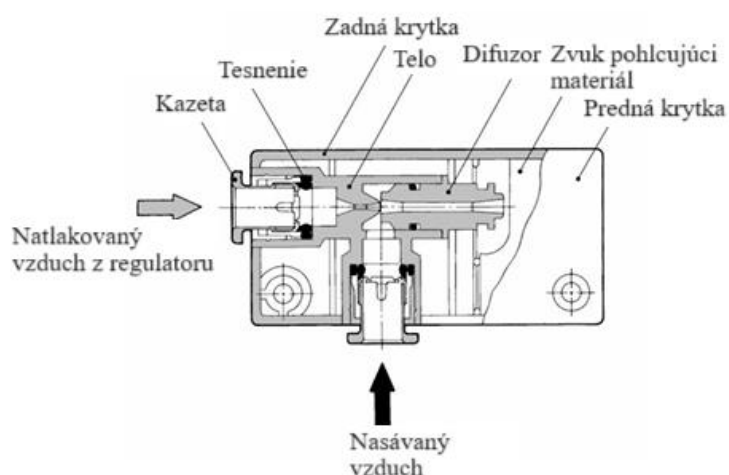


Obrázok 2.13 Schéma elektromagnetického ventilu (prevzaté z [31])

2.8.3 Ejektor vákua ZH05 B

Na manipulátore sa ejektor nachádza za elektromagnetickým ventilom, ktorým, keď je tento ventil zopnutý, sa do ejektora privádza natlakovaný vzduch z regulátoru. Tento vzduch sa dostáva do konvergujúcej dýzy, kde sa zväčší rýchlosť tohto vzduchu a tým pádom tu vzniká podtlak. Tento podtlak spôsobí, že nasávaný vzduch (viď obrázok č. 2.14) sa dostáva do ejektora a spolu s natlakovaným vzduchom z regulátoru vychádzajú cez divergentnú dýzu. V divergentnej dýze sa postupne tlak vyrovná s tlakom okolia. V tomto prípade s atmosférickým tlakom. [32]. Zo spodnej časti je vyvedená hadička, na ktorej konci sa nachádza prísavka. Cez túto hadičku je do ejektora privádzaný vzduch ako už bolo spomenuté.

Takýto ejektor vákua pracuje na princípe Venturiho efektu (vysvetlené v podkapitole č. 1.5.3 na strane č. 6). V ejektore sa nenachádzajú žiadne pohybujúce sa časti.



Obrázok 2.14 Rez ejektorom vákua (upravené podľa [33])

2.8.4 Vzduchový filter ZFB2

Tento filter vzduchu spája prísavku a ejektor vákua. Hlavnou úlohou filtru je očisťovať vzduch od nečistôt, ktoré sú nasaté prísavkou. Je to pasívna časť v pneumatickom systéme [22].

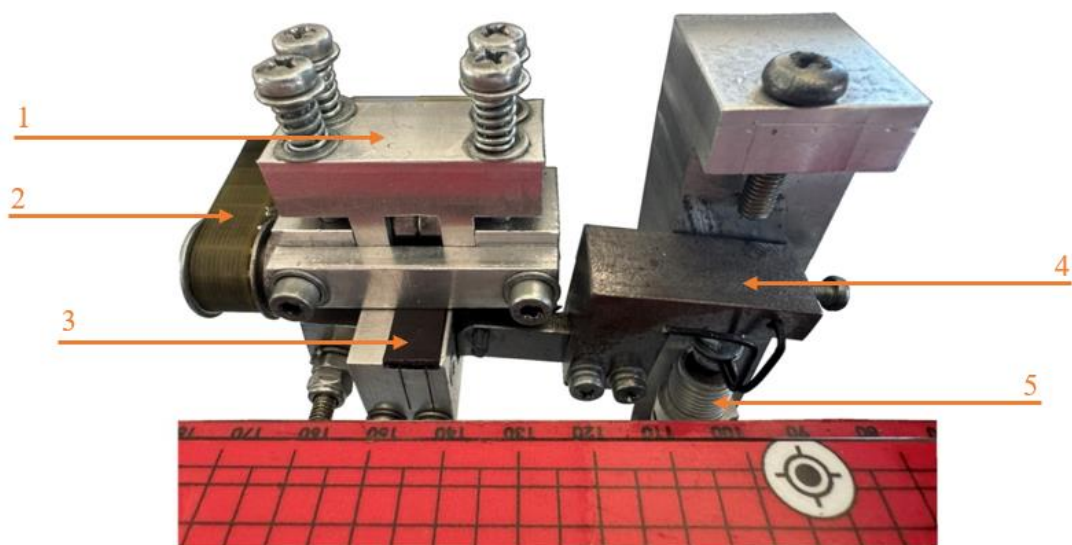
2.8.5 Piest

Na manipulátore sa nachádzajú dva pneumatické piesty. Na konci piestu č. 6₁ sa nachádza deliaci mechanizmus. Keď zopne elektromagnetický ventil č. 3₂ do piestu je privedený natlakovaný vzduch, ktorý vytlačí piest zvislo nahor. Na konci piestu je pripevnená žiletka, ktorá rozdeľuje magnetickú pásku na jednotlivé magnetické body.

Pneumatický piest č. 6₂ sa aktivuje pomocou elektromagnetického ventilu č. 3₃. Keď sa tento ventil zopne, do piestu je privedený natlakovaný vzduch, ten tento piest vytlačí smerom zvisle nadol. Keďže je k nemu pripevnená konzola, na ktorej sa nachádza prísavka, táto prísavka bude vysunutá spolu s piestom a dostane sa do pozície, kde zachytí magnetický bod. Tento bod sa na ňu prichytí a môže byť premiestnený na dané súradnice.

2.9 Deliaci mechanizmus

Na obrázku č. 2.15 sa nachádza deliaci mechanizmus ktorého úlohou je rozdeľovanie magnetickej pásky na jednotlivé magnetické body. A taktiež vysúvanie týchto bodov do pozície pre ich odobranie.



Obrázok 2.15 Fotografia deliaceho mechanizmu na strihanie magnetických bodov

Tabuľka 5 Popis častí deliaceho mechanizmu

Číslo časti	Popis časti
1.	Komponent na zatláčanie mag. pásky do hriadeľu
2.	Ozubený remeň pripevnený na ozubenej kladke
3.	Magnetická páska
4.	Kladka, na ktorej je pripevnená žiletka
5.	Piest

Vďaka tomu, že je magnetická páska zatláčaná do hriadeľu sa zaistí dostatočné trenie medzi hriadeľom a páskou. Tým pádom, keď je hriadeľ otáčaný pomocou ozubeného remeňa, tento točivý moment umožní vysúvanie pásky.

2.10 G-kód

```

; Magnet 01 -----
G1 E8 F6000 ;1. Delka magnetu pred strihem
G4 P101
M05 ;Strih magnetu ON
G4 P142 ;Prodleva
G1 E-1 ;Utrzeni magnetu
M06 ;Strih magnetu OFF
G4 P143
G1 E8.5 F10001 ;2. Vyjeti magnetu na odebiraci pozici
G4 P34
M12 ;Pist dolu + VAKUUM ON
G4 P105
G1 E10 Y9.5 F6001 ;Vyjeti na reference R01 - Odebrani magnetu
G1 E-9 F10001 ;najeti na pozici nasledujiciho magnetu. E8 hrana+ 8mm dalsi magnet
G4 P36
M02 ;PIST nahoru
G4 P197
G1 X7 Y92 Z40 F18002 ;ZADANI SOURADNICE MAGNETU-----
M10 ;PIST dolu + Strih magnetu ON
G4 P144
M04 ;VAKUUM OFF
G1 E-1 F10001 ;Utrzeni magnetu z druheho radku
M11 ;PIST nahoru + Strih magnetu OFF
G4 P210
G1 X149 Y0 Z8 E8.5 F18001 ;Najeti reference
G56 ;Referovani E=0 Z=0
    
```

Obrázok 2.16 Kód potrebný pre umiestnenie prvého magnetického bodu

Na obrázku č. 2.16 je vidieť G-kód potrebný pre uloženie jedného magnetického bodu. V tomto kóde sú zahrnuté všetky príkazy potrebné, či už na jednotlivé spínanie elektromagnetických ventilov a pohyb manipulátoru v pracovnom priestore.

Pri spusetní cyklu ako prvé manipulátor nájde referencie, t.j. začne sa pohybovať v smere ku koncovým spínačom. Postupne ako budú tieto spínače zopínať sa vypnú príslušné krokové motory a manipulátor bude viesť, kde vzhľadom na pracovný priestor sa nachádza.

Následne sa pozicovací suport presunie nad deliaci mechanizmus, kde už bude pripravený vystrihnutý magnetický bod. Zapne sa nasávanie prísavkou pomocou vákuového ejektoru, vysunie sa piest pre dotyk prísavky s magnetickým bodom, piest sa zasunie naspäť a magnetický bod sa presunie na predom určené súradnice. Vypne sa nasávanie a opäť sa vysunie piest, ktorý prilepí magnetický bod na fóliu. Následne sa pozicovací suport vráti nad deliaci mechanizmus a celý cyklus sa opakuje.

Na konci celého cyklu sa pozicovací suport sa presunie do polohy mimo fólie aby bolo možné odobrať fóliu.

3 Praktická časť

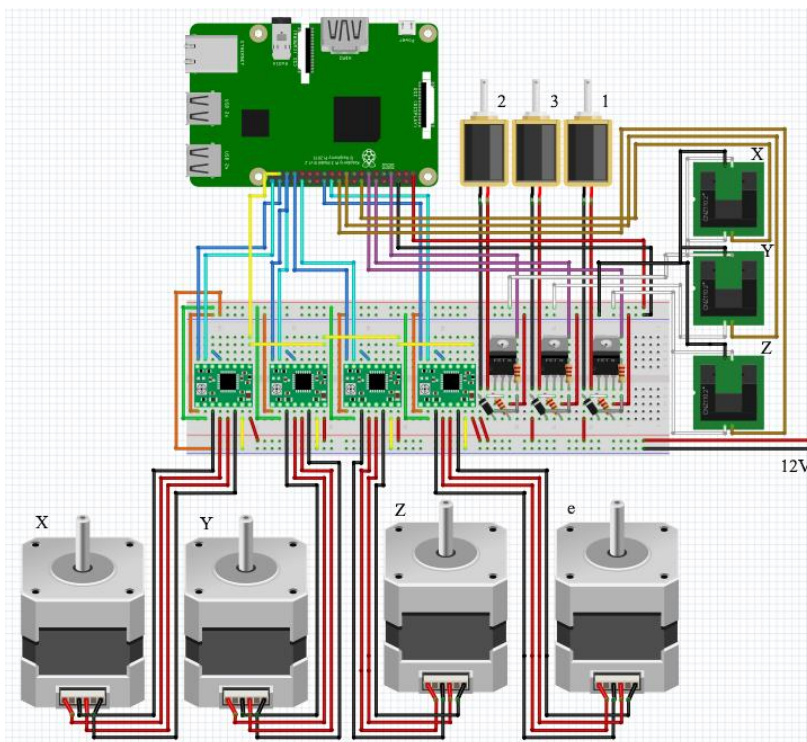
V praktickej časti tejto práce bude RPi zakomponované ako riadiaca jednotka do manipulátoru. Bude sa v nej opisovať skonfigurovanie jednotlivých programov softwaru PyCNC. Taktiež bude vytvorený obvod pre zapojenie všetkých častí manipulátoru do RPi pri zachovaní jeho funkčnosti. Navrhnutý a zkonštruovaný bude aj držiak pre kamerový modul a následne bude tento modul vmontovaný do držiaku.

3.1 Zakomponovanie RPi

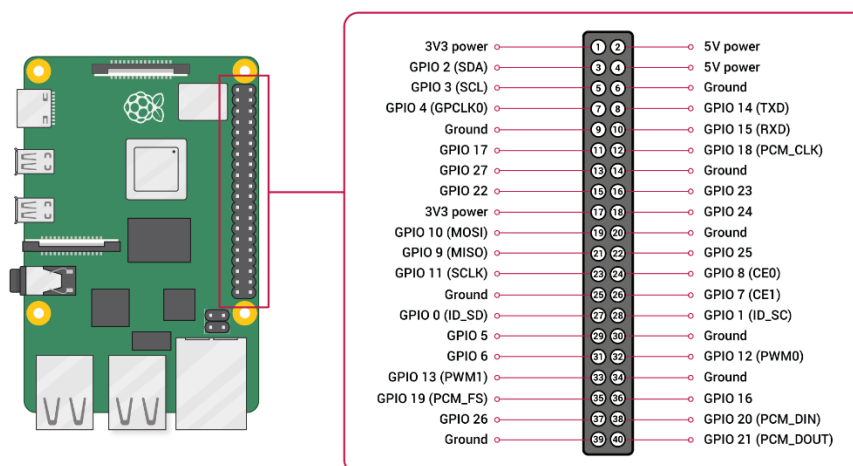
V manipulátore bolo zamenené Arduino Mega 2560 so shieldom RAMPS v.1.3 za jeden mikropočítač Raspberry Pi model 3B+. RPi bolo zvolené aj z toho dôvodu, že riadenie manipulátoru pomocou Ardiuna sa ukázalo ako nespoľahlivé. Stávalo sa, že dochádzalo ku chybám komunikácie medzi Arduinom a nadradeným počítačom. Ďalším z dôvodov bol požiadavok na nahrávanie snímok a následné dekódovanie QR-kódov z nich. Keďže mikropočítač RPi má väčší výkon ako mikrokontrolér Arduino, RPi bolo jasnou voľbou [34]. Po analýze rôznych možností a s prihliadnutím na potreby tejto práce bola platforma Raspberry Pi 3B + zvolená ako ideálna voľba vďaka jej optimálnemu pomeru ceny a výkonu. Použitím tohto mikropočítača sa taktiež zlepši kompaktnosť celkového projektu keďže nebude potrebný nadradený počítač.

Pre riadenie manipulátoru bol zvolený open-source G-Kód interpretér PyCNC (bližší popis v kapitole č. 3.3 na strane č. 25).

Na obrázku č. 3.1 je vidieť zapojenie, vytvorené v programe Fritzing, jednotlivých krokových motorov k ich príslušným budičom, taktiež koncové spínače s popisom, pre ktorú os spínajú. A taktiež aj samotné elektromagnetické ventily s ich príslušnými číslami, ktorých funkčnosť bola objasnená v kapitole č. 2.8.2 na strane č. 16.



Obrázok 3.1 Zakomponovanie RPi do manipulátoru



Obrázok 3.2 Popis GPIO pinov (prevzaté z [35])

GPIO piny (použitá ako output) na RPi, boli pripojené ku STEP a DIR pinom na budičoch krokových motorov.

Tabuľka 6 DIR piny

GPIO vyvedené na DIR pin krok. m.	Os
20	X
19	Y
13	Z
7	e

Tabuľka 7 STEP piny

GPIO vyvedené na STEP pin krok. m.	Os
21	X
16	Y
12	Z
8	e

Ďalšie tri GPIO piny (použitá ako output) boli použité na spínanie MOSFET tranzistorov (bližšie v kap. č. 3.6 na strane č. 30)

Tabuľka 8 Priradenie elektromag. ventilov k ich úkonom

Elektromag. ventil č.	Úkon
1	Strih mag. bodu
2	Pohyb prísavky
3	Vákuum

Na GPIO piny (použitá ako input) nachádzajúce sa na RPi boli privedené signálové káblíky z koncových spínačov.

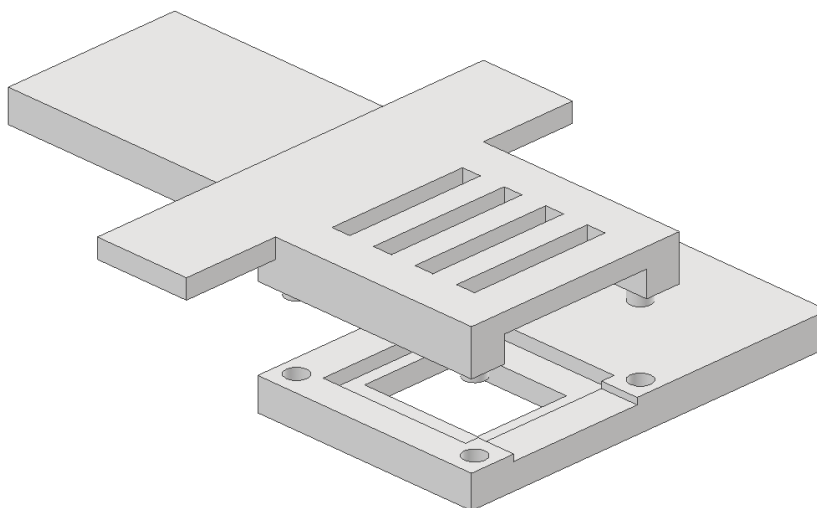
Tabuľka 9 GPIO piny napojené na koncové spínače

GPIO	Os
23	X
10	Y
25	Z

3V3 voltový pin bol použitý na napájanie spomínaných koncových spínačov. Ako spoločná zem týchto spínačov bol použitý GPIO GND (Ground) pin na RPi vďaka čomu bolo zabezpečené, že nenastávalo žiadne skreslenie logického signálu zo spínačov.

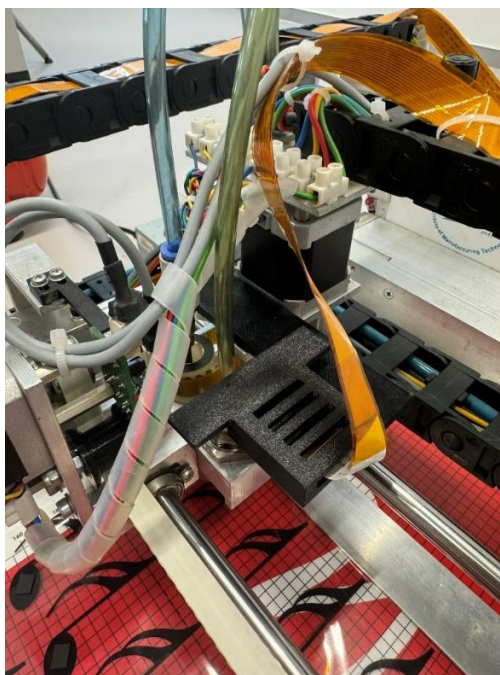
3.2 RPi Camera Module V2

Na manipulátor bol prirobený kamerový modul pre RPi. Na tento modul bolo nutné vytvoriť držiak, ktorý by ho uchytil na manipulátore. Tento držiak je vidieť na obrázku č. 3.3 kde je vymodelovaný v programe Autodesk Inventor Profesional.



Obrázok 3.3 Vymodelovaný držiak pre kameru v programe Autodesk Inventor Profesional

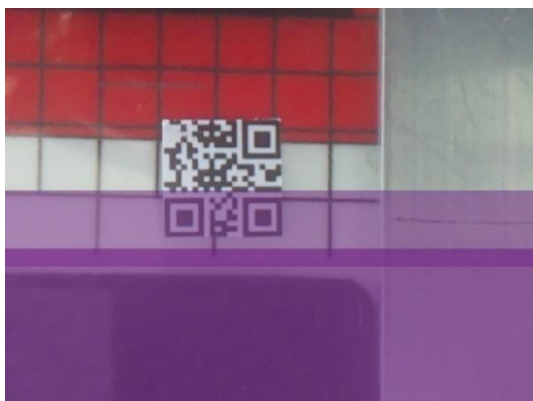
Bolo potrebné zvoliť vhodné miesto, kde by tento držiak s kamerovým modulom bol pripevnený. Zohľadnená bola vzdialenosť kamery od pracovnej plochy, z dôvodu aby bolo možné s kamerou zaostriť, čo bolo dôležité pre správne nasnímanie QR Kódu.



Obrázok 3.4 Držiak s kamerovým modulom uchytený na pozicovacom suporte

Zvolené miesto (vid' obrázok č.3.4) na pozicovacom suporte sa javí ako ideálne, aj z dôvodu využitia ciest pre prepojenie RPi s kamerovým modulom. Využitím týchto ciest sa ale zhoršila kvalita fotografií vytvorených kamerovým modulom. Zhoršenie kvality zapríčiňovalo elektromagnetické rušenie z kabeláže krokových motorov (vid' obrázok 3.5a).

Tento problém bol ale jednoducho vyriešiteľný a to deaktiváciou krokových motorov v čase získavania snímky (bližší popis v kap. č. 3.3 na strane č. 25). Pre zlepšenie rozpoznania QR-kódu bola fotografia ešte konvertovaná do čiernobielej podoby (vid' obrázok 3.5b).



a)



b)

Obrázok 3.5 a) Fotografia s elektromag. rušením b) upravená fotografia bez elektromag. rušenia

```
from picamera import PiCamera
from pyzbar.pyzbar import decode
from PIL import Image

def pic_n_decode():
    camera = PiCamera()
    camera.resolution = (1280,720)
    camera.start_preview()
    time.sleep(1)
    pic_sample = camera.capture("/home/manipulator/Pictures/pic_sample.jpg")
    camera.stop_preview()

    try:
        decoded_data= decode(Image.open("/home/manipulator/Pictures/pic_sample.jpg"))
        if decoded_data:
            decoded_text = decoded_data[0].data.decode("utf-8")
            return ("{decoded_text}")
        else:
            decoded_text = "error"
            return ("{decoded_text}")
    except Exception as e:
        print(f"Error: {e}")

user_input = True
def qr_read():
    while user_input:
        decoded_text = pic_n_decode()
        print(f"Decoded Text: {decoded_text}")
        if decoded_text == "error":
            user_input = input("Would you like to retry? y/n \n")
            if user_input != "y":
                print("Program done.")
                break
```

Časť kódu, použitého na dekódovanie QR kódov.

Na obrázku č. 3.6 sa nachádzajú QR kódy, v ktorých je zakódovaný text T01 až T03. Na každej jednej z fólií sa nachádza jeden takýto QR kód. Celkovo je týchto kódov 10.

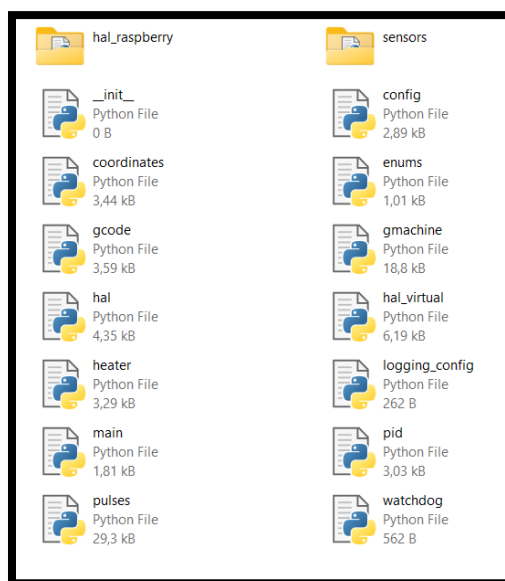


Obrázok 3.6 QR kódy

3.3 PyCNC

PyCNC je nosnou časťou tejto práce. Týmto softwarom je riadené všetko, čo manipulátor vykonáva.

Keďže PyCNC je kompatibilné s RPi 1, RPi 2 a RPi 3 [13] nebolo potrebné meniť žiadne registre. Ak by bola využitá novšia doska RPi ako napríklad RPi 4 alebo RPi 5, v programe s názvom *hal.py* je možné zmeniť adresy týchto registrov pre zaručenie kompatibility. Po stiahnutí tohto softwaru a otvorení priečinku s názvom *cnc* sú vidieť súbory ako na obrázku č. 3.7.



Obrázok 3.7 Obsah priečinku s názvom *cnc* zo softwaru *pycnc*

Musel byť skonfigurovaný program, ktorý sa zaoberal hardwarovou časťou manipulátoru. Jedná sa o program s názvom *config.py*. Ako prvé bolo potrebné zistiť počet krokov krokového motoru potrebných na prejdeň vzdialenosti jedného mm. Z kapitoly č. 2.5 na strane č. 10 je známe, že krokové motory nachádzajúce sa na manipulátore vykonajú 200 krokov na otáčku. Ďalej bolo zamerané, že pri jednej otáčke krokového motoru sa pozicovací suport posunul 49,86 mm v pracovnom priestore. Tým pádom bol zistený pomocou rovnice č. 1 počet krokov na prejdeň vzdialenosti jedného mm, ktorý je 4,01 mm.

$$n_k = \frac{n_{kr}}{x_r} \quad (1)$$

n_k počet krokov na milimeter

n_{kr} počet krokov na jednu otáčku krokového motoru

x_r prejdeň vzdialenosť na jednu otáčku krokového motoru

Následne bolo potrebné zistiť, aká je maximálna rýchlosť a maximálne zrýchlenie, ktoré krokové motory zvládnu pre plynulý presun pozicovacieho suportu po pracovnom priestore.

Pri nastavení veľkého zrýchlenia krokové motory nemali dostatočnú silu na rozpochybovanie pozicovacieho suportu, kvôli čomu sa zadržávali a preskakovali krok.

Maximálne zrýchlenie bolo zistené experimentálne, kde:

$$a_{max} = 3000 \text{ mm/min}$$

Následne bola zvolená aj maximálna rýchlosť, taktiež experimentálne:

$$v_{max} = 30000 \text{ mm/min}$$

Ďalej bolo potrebné určiť rýchlosť, pri ktorej by pozicovací suport smeroval ku koncovým spínačom (kalibrácia manipulátoru). Zvolená bola rýchlosť:

$$v_{calib} = 8000 \text{ mm/min}$$

Táto rýchlosť sa zdala ako najvhodnejšia v zohľadnení celkovej rýchlosti presunu pozicovacieho suportu spolu s rýchlosťou zopnutia koncových spínačov pre bezpečné vypnutie krokových motorov. Taktiež bolo potrebné vymedziť maximálne rozmery pracovného priestoru, aby neprišlo k nárazu pozicovacieho suportu do stien manipulátoru.

Zmerané hodnoty pre pracovný priestor:

Tabuľka 10 Rozmery pracovného priestoru

Os	Rozmer [mm]
X	270
Y	380
Z	100

Ako posledné v tomto programe boli preprogramované nevyužitú GPIO piny. Boli zakomponované na spínanie MOSFET tranzistorov. V programe *hal.py* boli vytvorené funkcie pre jednotlivé činnosti elektromagnetických ventilov. V týchto funkciách boli menené stavy GPIO pinov medzi log. 1 a log. 0.

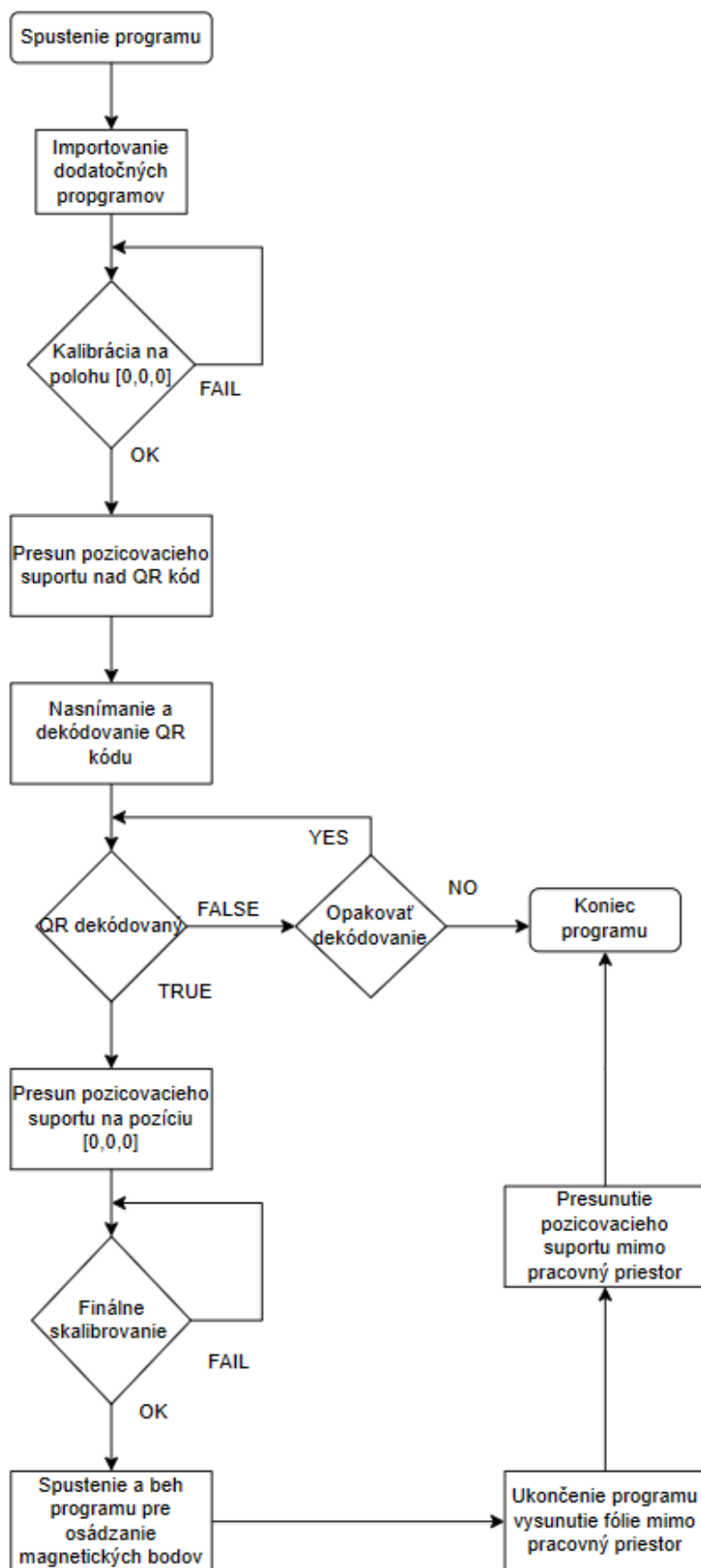
Tabuľka 11 Priradenie príkazov k ich funkciám

Názov príkazu v G kóde	Funkcia príkazu
M2	Vysunutie piestu
M4	Vypnutie vákua
M5	Strih magnetickej pásky
M6	Uvolnenie strihu magnetickej pásky
M10	Piest dolu, strih magnetickej pásky
M11	Piest hore, uvolnenie strihu mag. Pásky
M12	Piest dolu, zapnutie vákua

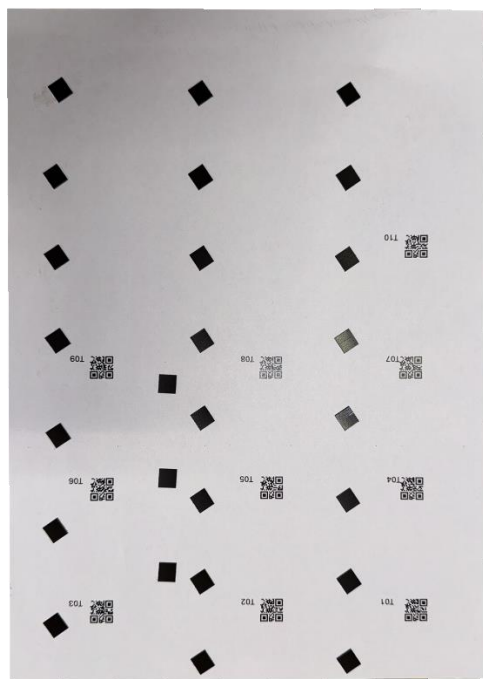
3.4 Hlavný program manipulátoru

Hlavný program manipulátoru sa skladá zo 7 častí.

1. Pri spustení programu z terminálu sa nahrajú potrebné knižnice a šablóny.
2. Následne sú v programe definované funkcie na nasnímanie a dekódovanie QR kódu. (kap č. 3.2 strana č. 22)
3. V ďalšej časti programu sa pozicovací suport skalibruje, t. j. pozicovací suport sa začne pohybovať smerom ku koncovým spínačom, podobne ako tomu bolo aj v pôvodnom prevedení. Pri zatínení jednotlivých spínačov sa budú vypínať príslušné krokové motory.
4. Po úspešnej kalibrácii sa pozicovací suport presunie po pracovnom priestore na miesto, kde sa na fólii nachádza QR Kód, ktorý je následne nasnímaný a dekódovaný. Manipulátor zvolí vhodný program podľa textu v QR kóde.
5. Manipulátor sa opäť skalibruje a pripravý sa na umiestňovanie magnetických bodov podľa zvolenej šablóny.
6. Po ukončení osadzovania magnetických bodov pozicovací suport povysunie fóliu mimo pracovný priestor a on sám sa taktiež presunie na miesto, kde by neprekážal pri vložení novej šablóny.
7. Po tomto pohybe sa hlavný program ukončí.



Obrázok 3.8 Vývojový diagram pre hlavný program manipulátoru



Obrázok 3.9 Testovacia fólia



Obrázok 3.10 Skutočná fólia

Na obrázku č. 3.9 sú vidieť umiestnené magnetické body na testovacej fólii, taktiež sú tu vidieť QR kódy pre otestovanie kamery. Finálna poloha QR kódu bola zvolená v pravom dolnom rohu. Na obrázku č. 3.10 je skutočná fólia na ktorú boli magnetické body umiestňované. Nachádza sa na nej len jeden QR kód. Konkrétne sa jedná o fóliu č. 3.

3.5 Zapojenie koncového spínaču TCST1103

Pre správnu funkčnosť boli na manipulátore menené dva koncové spínače. Nahradené boli spínače pre os X a os Y.

Spínače sú napájané pomocou 3V3 GPIO pinu, na ktorý sú zapojené paralelne. Potrebne je podotknúť, že spínače musia mať pre ich správnu funkčnosť spoločnú zem s RPi, t.j. v tomto prípade GND pin na RPi. Z jednotlivých spínačov sú vyvedené signálove káblíky na príslušné GPIO piny na RPi.

Tabuľka 12 Priradenie GPIO pinov ku koncovým spínačom

GPIO pin	Os manipulátoru
23	X
10	Y
25	Z

3.6 Spínanie elektromagnetických ventilov

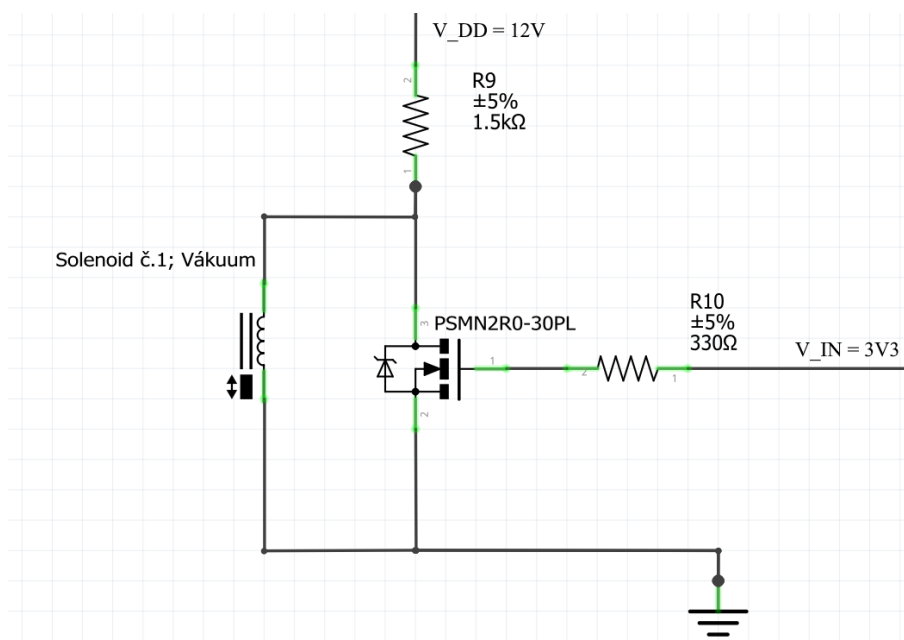
Tieto ventily sú plne otvorené keď je na ne privedené napätie 12V. Toto napätie ale nieje možné riadiť pomocou Arduino MEGA alebo RPi ako takých. Tým pádom sú potrebné v obode medzi nimi MOSFET tranzistory.

Prvotne bolo RPi zapojené k MOSFET tranzistorom, ktoré sa už nachádzali na manipulátore. Toto riešenie sa ukázalo ako nesprávane, z dôvodu, že signál log. 1 z RPi (3V3) nebol dostatočný pre zopnutie týchto daných tranzistorov. Tým pádom museli byť zvolené nové MOSFET tranzistory, pri ktorých výbere bolo prihliadnuté aby ich napätie potrebné na plné zopnutie bolo nižšie ako log 1. z RPi (3V3).

Tabuľka 13 Priradenie elektromag. ventilov k ich GPIO pinom a úkonom

Elektromagnetický ventil č.	GPIO pin	Úkon
1	4	Strih
2	18	Pohyb prísavky
3	27	Vakuum

Elektromagnetické ventily sú spínané pomocou privedenej log. 1 z GPIO pinu na ovládaciu časť MOSFET tranzistoru. V tomto obvode sú zakomponované diódy z dôvodu, aby pri vypnutí každého z týchto ventilov nedošlo k zhoreniu tranzistorov a cievka v tomto ventile sa mohla vybiť do medziobvodu. Presné zapojenie, konkrétne pre elektromagnetický ventil č.1, je vidieť na obrázku č. 3.11.



Obrázok 3.11 Schéma zapojenia MOSFET tranzistoru spolu s elektromagnetickým ventilom

3.7 Kryt

V poslednej fázy práce bol vyrobený kryt z akrylového skla, ktorý je vydiť na obrázku č. 3.12. Bol priprevený na zadnú stranu manipulátoru. Zamedzuje jednoduchému prístupu k elektrickému obvodu.



Obrázok 3.12 Vyhotovený kryt

4 Porovnanie nového stavu manipulátoru s pôvodným stavom

Táto časť práce sa zamerá na porovnanie spúšťania cyklu manipulátoru v pôvodnom stave so spúšťaním cyklu v novom prevedení manipulátoru. Taktiež bude porovnaná dĺžka doby jedného cyklu a to konkrétne v tomto prípade pre fóliu č. 3. Nakoniec bude porovnané osadenie novej riadiacej jednotky manipulátoru s tou pôvodnou.

4.1 Rozdiel v spúšťaní cyklu teraz/predtým

V staršej verzii manipulátoru bolo potrebné aby bol program spustený cez nadradené PC. Operátor manipulátoru musel v programe zvoliť správnu šablónu, ktorá bola umiestnená v pracovnom priestore manipulátoru a spustiť program. Po novom bude potrebné iba umiestniť fóliu do pracovného priestoru a spustiť hlavný program na RPi. Manipulátor sám pomocou QR kódu na fólii rozpozna fóliu, ktorá sa nachádza v pracovnom priestore a podľa nej zvolí správny program pre umiestnenie magnetických bodov.

4.2 Porovnanie dĺžky cyklu

Podľa pôvodného plánovania mala dĺžka jedného cyklu ostať podobná ako v pôvodnom prevedení. Toto ale skutočnosťou nieje. V novom prevedení je celkový čas na dokončenie jednej fólie o niečo dlhší ako tomu bolo v pôvodnom stave. Rýchlejší ale bude čas medzi jednotlivými spusteniami cyklov, keďže nebude potrebné voliť šablónu v počítači. V tabuľke č. 14 je viedieť porovnanie celkovej doby cyklu pre konkrétnu fóliu a to fóliu č.3.

Tabuľka 14 Porovnanie doby cyklu pre šablónu č. 3

	Pôvodný stav	Nový stav
Doba cyklu	2 min 12 s	3 min 28 s

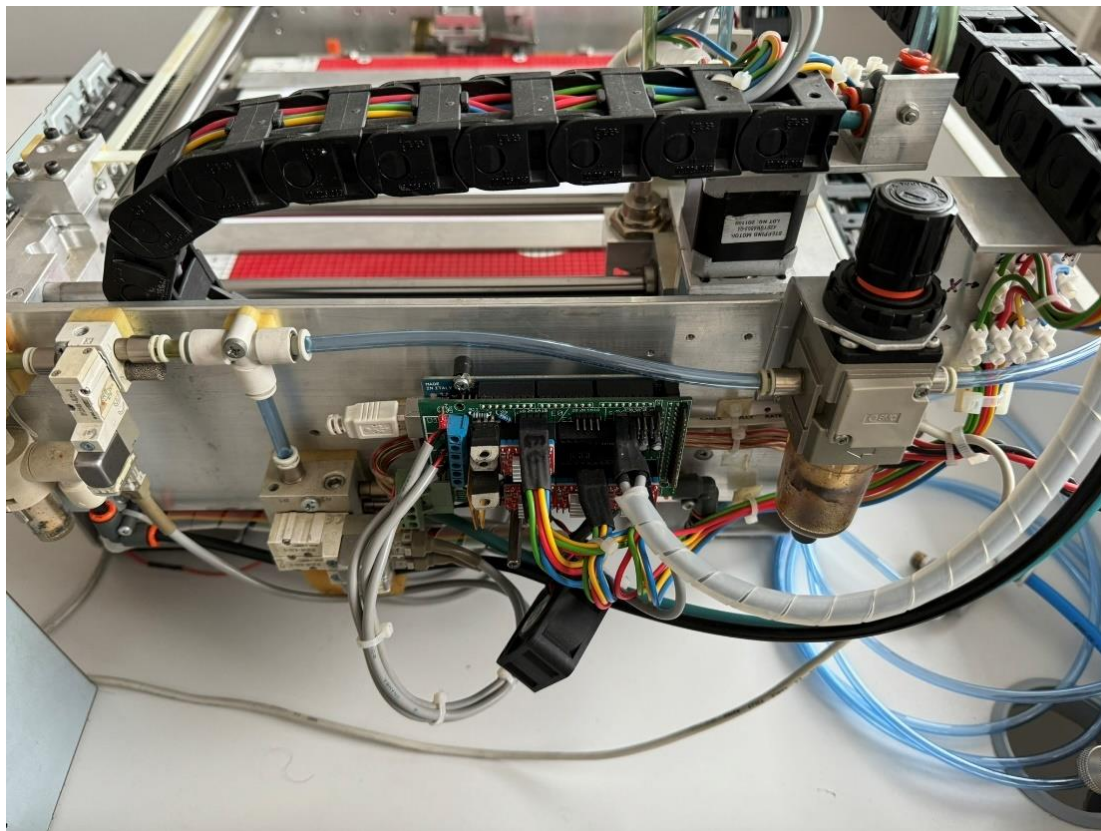
Najväčšie časové straty voči pôvodnému stavu manipulátoru boli zaznamenané, keď manipulátor dostal príkaz na skalibrovanie sa. Voči pôvodnému stavu trvá kalibrácia dlhšie. Jedným z dôvodov je, že manipulátor sa musí skalibrovať dvakrát. Prvý krát pri prvotnom spustení programu, kde sa manipulátor skalibruje a následne príde na polohu QR kódu. Po nasnímaní a dekodovaní manipulátor zvolí vhodný program na osádzanie magnetických bodov. Každý program na osádzanie týchto bodov pozostáva z príkazu na skalibrovanie sa a následne pokračuje už s umiestňovaním magnetických bodov. Toto druhé skalibrovanie je potrebné z dôvodu, že pri vyhotovení fotografie na dekodovanie sa vypnú krokové motory, a poloha pozicovacieho supportu sa zresetuje. Vypnutie krokových motorov je nevyhnutné pre odstránenie elektromagnetického rušenia ako je spomínané v kap. 3.2 č. na strane č. 22.

4.3 Osadenie riadiacej jednotky

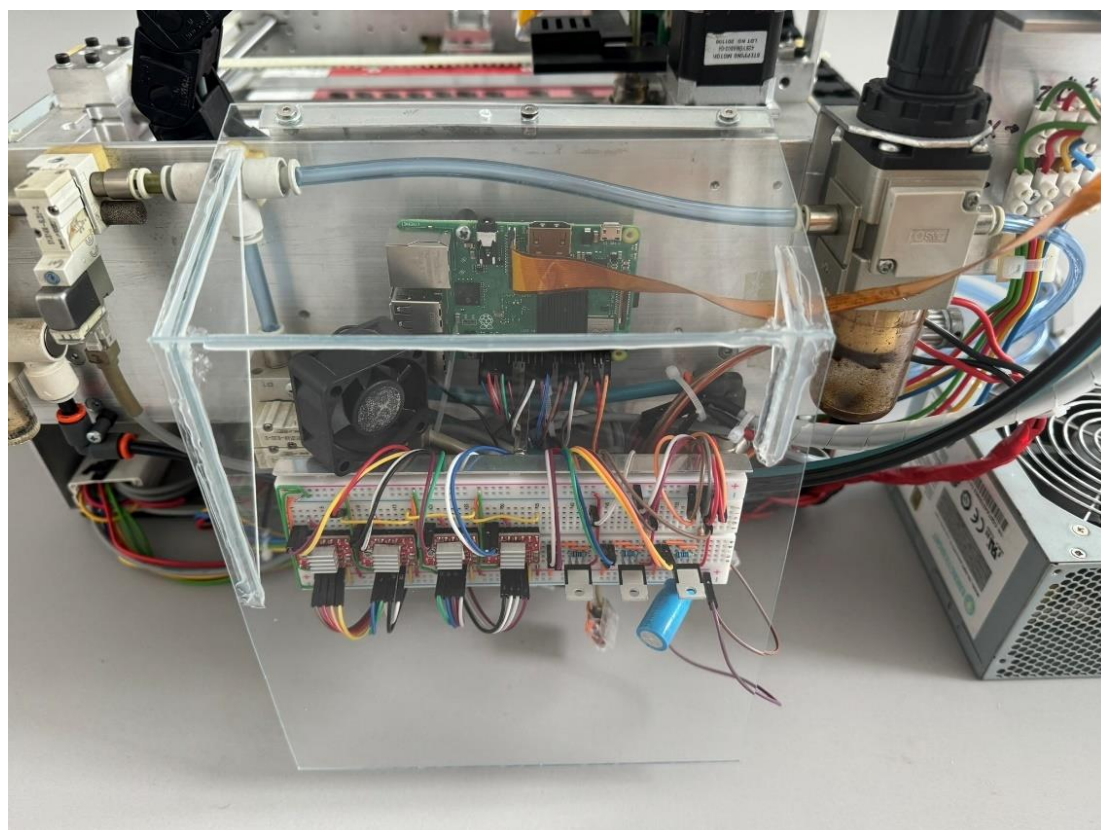
V pôvodnom prevedení pozostávala riadiaca jednotka z nadradeného počítaču, RAMPS v1.3 shieldu, na ktorom boli zakomponované budiče krokových motorov a Arduina MEGA 2560. Shield RAMPS spolu s Arduinom boli pripevnené na zadnej strane manipulátoru.

V novom prevedení boli využité závitové diery, od pôvodného prevedenia, do ktorých bolo RPi uchytené. Taktiež bol využitý držiak, na ktorom sa nachádzal malý ventilátor používaný na ochladzovanie budičov krokových motor. Na tento držiak bol pripevnený breadboard (z angl. doska pre integrované obvody), na ktorom sa nachádzajú všetky potrebné súčiastky na

zachovanie pôvodného stavu manipulátoru. Bol využitý aj už spomínaný malý ventilátor, ktorý bol upevnený z vrchnej časti breadboardu.



Obrázok 4.1 Riadiaca jednotka manipulátoru v pôvodnom stave



Obrázok 4.2 Riadiaca jednotka manipulátoru v novom stave

ZÁVER

Cielom tejto práce bolo zanalyzovať pôvodný stav manipulátoru na umiestňovanie magnetických bodov a jeho riadiacej jednotky. Bolo potrebné navrhnuť hardware, ktorý by zabezpečil pôvodnú funkcionálnosť celého systému, ako aj software, ktorým by tento manipulátor bol riadený.

V rešeršnej časti boli prebrané jednotlivé prvky manipulátoru, ktoré sa na ňom nachádzajú alebo ešte len budú na manipulátor nainštalované. Boli prebrané jednotlivé časti či už riadenia krokových motorov, rôznych častí pneumatického systému a optické koncové spínače.

Následne bol zhodnotený pôvodný stav manipulátoru. Bol posúdený pneumatický systém, ktorý sa na manipulátore nachádza. Boli popísané jednotlivé prvky tohto systému ako aj jeho celok. Taktiež bolo popísané ich zakomponovanie spolu s elektromagnetickými ventilmi, vďaka ktorým bol tento pneumatický systém riadený. Bola opísaná funkčnosť a aj zapojenie koncových spínačov, taktiež aj ich prídelenie k jednotlivým osiam manipulátoru.

V praktickej časti bolo nahradené Arduino MEGA 2560 s RAMPS v1.3 shieldom za RPi, ktoré bolo zakomponované ako riadiaca jednotka manipulátoru. Bol vytvorený hardware, ktorý sa skladal z niekoľkých nových prvkov, vďaka ktorým bola zachovaná pôvodná funkcionálnosť. Taktiež bol navrhnutý a aj zhotovený model držiaku pre kameru, ktorá bola ďalej osadená na pozicovací suport. Bol vytvorený software pre kameru ako aj pre riadenie manipulátoru. Software pre kameru sa skladal z nasnímania a z následného dekódovania QR kódov, ktoré boli umiestnené na fólii. Software pre riadenie manipulátoru sa skladal z niekoľkých blokov, kde ako prvé pri spustení hlavného programu sa manipulátor skalibroval pomocou koncových spínačov a podišiel na miesto QR kódu, ktorý nasnímal. Opäť sa skalibroval a spustil program pre konkrétnu fóliu, ktorá sa vzťahuje ku konkrétnemu dekódovanému QR kódu. Po skončení programu bola táto fólia vysunutá mimo pracovný priestor a taktiež aj pozicovací suport sa zasunul mimo pracovný priestor pre umožnenie vloženia novej fólie.

V poslednej kapitole bol porovnaný nový stav manipulátoru s tým pôvodným. Bolo zistené, že pridaním kamery sa zvýšil celkový čas spustenia jedného cyklu. Dlhší čas zaberá ešte skalibrovanie sa manipulátoru. Tento čas je dlhší kvôli pomalému posuvu pozicovacieho suportu smerom ku koncovým spínačom a taktiež aj kvôli dvojitej kalibrácii. Zjednodušilo sa ale zadávanie programu pre konkrétne fólie. Keďže v novom prevedení stačí vložiť požadovanú fóliu do pracovného priestoru a spustiť hlavný program manipulátoru. Všetko ostatné zariadenia manipulátoru sú rovnaké.

Ciele môžu byť považované za splnené.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] CRESSEY, Daniel. The DIY electronics transforming research. Online. *Nature*. 2017, roč. 544, č. 7648, s. 125-126. ISSN 0028-0836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/544125a>. [cit. 2023-11-09].
- [2] MITCHELL, Robin. *A Comparison of Popular Arduino Boards*. Online. Maker Pro. 2018. Dostupné z: <https://maker.pro/arduino/tutorial/a-comparison-of-popular-arduino-boards>. [cit. 2023-11-29].
- [3] *Arduino*. Online. Arduino. 2024. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?queryID=undefined>. [cit. 2024-04-26].
- [4] *Arduino Mega*. Online. Elektronikhobi. 2007. Dostupné z: https://elektronikhobi.net/arduino-kartlarini-taniyalim-1/arduino_mega/. [cit. 2024-05-21].
- [5] *RAMPS 1.3*. Online. RepRap. 2012. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.3. [cit. 2024-05-22].
- [6] *RAMPS v1.3*. Online. RepRap. 2010. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/File:RAMPS1_3.JPG. [cit. 2024-05-21].
- [7] SHEA, Sharon. *Microcomputer*. Online. TechTarget. 2018. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/microcomputer>. [cit. 2023-11-28].
- [8] KÖLLING, Michael. Educational Programming on the Raspberry Pi. Online. *Electronics*. 2016, roč. 5, č. 4. ISSN 2079-9292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/electronics5030033>. [cit. 2023-11-16].
- [9] *Raspberry Pi 3B+*. Online. Datasheets.raspberrypi.com. 2021. Dostupné z: https://datasheets.raspberrypi.com/rpi3/raspberry-pi-3-b-plus-product-brief.pdf?_gl=1*b6czb5*_ga*NDgwNTg5NDkxLjE3MTYzMTMyNDM.*_ga_22FD70LWDS*MTcxNjMxMzI0Mi4xLjAuMTcxNjMxMzI0Mi4wLjAuMA. [cit. 2024-05-21].
- [10] *Uvedený nový výkonnejší Raspberry Pi 3 Model B+ s gigabitovým Ethernetom*. Online. DSL. 2018. Dostupné z: <https://www.dsl.sk/article.php?article=20889>. [cit. 2024-05-21].
- [11] *Raspberry Pi Cameras*. Online. Raspberry Pi. 2024. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>. [cit. 2024-04-26].
- [12] KHABAROV, Nikolay. *PyCNC*. Online. Pypi.org. 2017. Dostupné z: <https://pypi.org/project/pycnc/>. [cit. 2024-04-22].
- [13] KHABAROV, Nikolay. *PyCNC: Project architecture*. Online. In: Pypi.org. 2017. Dostupné z: <https://pypi.org/project/pycnc/>. [cit. 2024-05-17].

- [14] KHABAROV, Nikolay. *How you can use Python to build your own CNC controller and 3D printer*. Online. FreeCodeCamp. 2017. Dostupné z: <https://www.freecodecamp.org/news/how-to-build-a-3-d-printer-using-cnc-controller-in-python-bd3cd5e28516/>. [cit. 2024-05-17].
- [15] *Everything You Need To Know About NEMA 17 Stepper Motors*. Online. MxElectron. 2024. Dostupné z: <https://mxelectron.com/everything-you-need-to-know-about-nema-17-stepper-motors/>. [cit. 2024-05-23].
- [16] *HB Stepper Motors*. Online. Kysan Electronics. 2022. Dostupné z: https://www.kysanelectronics.com/Catalog/HB_Step_Motors.pdf. [cit. 2024-05-23].
- [17] *Stepper Motor Hardware Interfacing*. Online. PicList. 2022. Dostupné z: <http://www.piclist.com/techref/io/steppers.htm>. [cit. 2024-05-23].
- [18] TEJA, Ravi. *Open Loop System*. Online. ElectronicsHub. 2021. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/open-loop-system>. [cit. 2023-11-23].
- [19] *Closed Loop System*. Online. ElectronicsHub. 2015. Dostupné z: https://www.electronicshub.org/closed-loop-system/#Practical_example_of_feedback_system. [cit. 2023-11-23].
- [20] KUMAR, Amrit. *Pneumatic System: Definition, Components, Working, Advantages*. Online. TheMechanicalEngineering. 2022. Dostupné z: <https://themechanicalengineering.com/pneumatic-system/>. [cit. 2024-05-17].
- [21] *What are Compressors? Definition, Meaning, Parts, Types, Working*. Online. MechStudies. 2024. Dostupné z: https://www.mechstudies.com/what-compressor-types-parts-working-principle/?utm_content=cmp-true. [cit. 2024-05-23].
- [22] *Air Suction Filter*. Online. SMC Europe. 2024. Dostupné z: <https://static.smc.eu/pdf/ZF.pdf>. [cit. 2024-05-23].
- [23] *Venturi effect*. Online. Www.tec-science.com. 2020. Dostupné z: <https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/venturi-effect/>. [cit. 2024-05-21].
- [24] *ISO cylinder*. Online. FESTO. 2024. Dostupné z: <https://www.festo.com/hk/en/a/download-document/datasheet/19257>. [cit. 2024-05-23].
- [25] *4/5 Port Solenoid Valve*. Online. SMCPneumatics. 2024. Dostupné z: https://www.smc Pneumatics.com/pdfs/SYJ_5PT.pdf. [cit. 2024-05-23].
- [26] *TCST1103*. Online. 2008. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/83764/tcst1103.pdf>. [cit. 2024-05-21].
- [27] *Driver A4988*. Online. Saisac. 2020. Dostupné z: <https://saisac.pe/producto/driver-a4988/>. [cit. 2024-05-21].
- [28] *A4988 Datasheet*. Online. ALLDATASHEET. 2024. Dostupné z: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/338780/ALLEGRO/A4988.html>. [cit. 2024-05-21].

- [29] O'CONNELL, Jackson. *3D Printer Endstop Switch vs Optical Endstop*. Online. All3DP. 2020. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-endstop-switch-optical-endstop/>. [cit. 2024-05-23].
- [30] *AW20-F01H-B*. Online. Smcpneumatics. 2022. Dostupné z: <https://www.smcpneumatics.com/pdfs/aw.pdf>. [cit. 2024-05-21].
- [31] *Solenoid Valve*. Online. Smcpneumatics. 2022. Dostupné z: https://www.smcpneumatics.com/pdfs/SYJ_5PT.pdf. [cit. 2024-05-21].
- [32] OKETOLA, Temitayo |. *Vacuum ejector: Understanding its working principle and some design parameters*. Online. Insights GlobalSpec. 2022. Dostupné z: <https://insights.globalspec.com/article/18359/vacuum-ejector-understanding-its-working-principle-and-some-design-parameters>. [cit. 2024-04-27].
- [33] *Vacuum Equipment*. Online. Smcpneumatics. 2022. Dostupné z: <https://www.smcpneumatics.com/pdfs/ZH.pdf>. [cit. 2024-05-21].
- [34] KOSTIANTY, Oliynyk. *Difference Between Arduino and Raspberry Pi [Comparison Table]*. Online. WebbyLab. 2023. Dostupné z: <https://webbylab.com/blog/arduino-vs-raspberry-pi-key-differences-comparison-table/>. [cit. 2024-05-23].
- [35] *RPi GPIO*. Online. Raspberry Pi. 2019. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>. [cit. 2024-04-26].

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1.1 Arduino MEGA2560 (prevzaté z [4])	2
Obrázok 1.2 RAMPS v.1.3 (prevzaté z [6]).....	3
Obrázok 1.3 RPi 3B+ (prevzaté z [10]).....	4
Obrázok 1.4 Architektúra projektu PyCNC, (prevzaté z [13])	4
Obrázok 1.5 Schematická značka vzduchového filtra	6
Obrázok 1.6 Schematická značka ejektora vakuá	6
Obrázok 1.7 Schematická značka piestu	6
Obrázok 1.8 Obvod koncového spínaču (prevzaté z [26])	7
Obrázok 2.1 Vyobrazenie súradnicového systému na manipulátore	8
Obrázok 2.2 Fólia č. 3 s magnetickými bodmi	9
Obrázok 2.3 Arduino MEGA s RAMPS v1.3 shieldom.....	9
Obrázok 2.4 Ovládač krokového motoru A4988 (prevzaté z [27]).....	10
Obrázok 2.5 Manipulátor s očíslovanými krokovými motormi.....	11
Obrázok 2.6 Ozubená kladka na výstupe krokového motoru	12
Obrázok 2.7 Koncové spínače na manipulátore.....	12
Obrázok 2.8 Koncový spínač TCST1103.....	13
Obrázok 2.9 Fotografia RESET tlačidla.....	14
Obrázok 2.10 Schematický popis pneumatického systému vykreslený v programe FluidSim	14
Obrázok 2.11 Rez filter-regulátorom (prevzaté z [30]).....	15
Obrázok 2.12 Schematická značka filter-regulátoru (prevzaté z [30]).....	15
Obrázok 2.13 Schéma elektromagnetického ventilu (prevzaté z [31])	16
Obrázok 2.14 Rez ejektorom vakuá (upravené podľa [33])	17
Obrázok 2.15 Fotografia deliaceho mechanizmu na strihanie magnetických bodov.....	18
Obrázok 2.16 Kód potrebný pre umiestnenie prvého magnetického bodu	18
Obrázok 3.1 Zakomponovanie RPi do manipulátoru	20
Obrázok 3.2 Popis GPIO pinov (prevzaté z [35])	21
Obrázok 3.3 Vymodelovaný držiak pre kameru v programe Autodesk Inventor Profesional	22
Obrázok 3.4 Držiak s kamerovým modulom uchytené na pozicovacom suporte.....	23
Obrázok 3.5 a) Fotografia s elektromag. rušením b) upravená fotografia bez elektromag. rušenia.....	23
Obrázok 3.6 QR kódy	24
Obrázok 3.7 Obsah priečinku s názvom enc zo softwaru pycnc.....	25
Obrázok 3.8 Vývojový diagram pre hlavný program manipulátoru	28
Obrázok 3.9 Testovacia fólia	29
Obrázok 3.10 Skutočná fólia.....	29
Obrázok 3.11 Schéma zapojenia MOSFET tranzistoru spolu s elektromagnetickým ventilom	30
Obrázok 3.12 Vyhotovený kryt.....	31
Obrázok 4.1 Riadiaca jednotka manipulátoru v pôvodnom stave.....	33
Obrázok 4.2 Riadiaca jednotka manipulátoru v novom stave	33

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Priradenie krokových motorov k ich osiam	11
Tabuľka 2 Priradenie koncových spínačov k ich osiam	13
Tabuľka 3 Popis častí nachádzajúc sa na obrázku č. Obrázok 2.10.....	15
Tabuľka 4 Popis častí filter-regulátoru (prevzaté z [30])	16
Tabuľka 5 Popis častí deliaceho mechanizmu	18
Tabuľka 6 DIR piny	21
Tabuľka 7 STEP piny	21
Tabuľka 8 Priradenie elektromag. ventilov k ich úkonom	21
Tabuľka 9 GPIO piny napojené na koncové spínače	22
Tabuľka 10 Rozmery pracovného priestoru	26
Tabuľka 11 Priradenie príkazov k ich funkciám.....	26
Tabuľka 12 Priradenie GPIO pinov ku koncovým spínačom.....	29
Tabuľka 13 Priradenie elektromag. ventilov k ich GPIO pinom a úkonom.....	30
Tabuľka 14 Porovnanie doby cyklu pre šablónu č. 3	32

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A – Zdrojový kód programu

PRÍLOHA B – Šablóny pre fólie

PRÍLOHA C – Schéma zapojenia RPi do systému manipulátoru

PRÍLOHA D – Fotodokumentácia navrhnutého riešenia