



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

ŘÍZENÍ ROBOTICKÉHO MANIPULÁTORU

ROBOTIC MANIPULATOR CONTROL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Černík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Filip Černík

ID: 230461

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Řízení robotického manipulátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s robotickým ramenem BCN3D MOVEO, navrhnete koncept jeho řízení a vyberte vhodnou elektroniku pro realizaci. Robotické rameno zprovozníte a navrhnete řídicí systém. Vytvořte ukázkový program, kterým budete funkčnost demonstrovat.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 30.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá seznámením s projektem BCN3D-Moveo. Co to je a jakým způsobem funguje. Práci lze rozdělit do tří částí: konstrukční část, elektronická část a řídicí část. Do konstrukční části patří seznámení s konstrukcí ramene a obstarání jeho 3D modelu pro následný 3D tisk a sestavení. Elektronická část se zabývá výběrem a zapojením vhodné elektroniky, kvůli správnému fungování ramene. Poslední řídicí část zahrnuje problematiku ovládání celého robotického ramene a seznámení s ovládáním krokových motorů.

Klíčová slova

Robotické rameno, krokový motor, driver, Arduino

Abstract

The work deals with familiarization of the project called BCN3D-Moveo. What is it and how it works. The project can be divided into three parts: structural, electronic and control part. The construction part includes familiarization with robotic arm structures and obtaining its 3D model for consequential 3D printing and assembly. The electronic part deals with the selection and connection of the appropriate electronics, for the proper functioning of the robotic arms and. The last control part includes the issue of controlling the entire robotic arm and introduces the control of stepper motors.

Keywords

Robotic arm, stepper motor, driver, Arduino

Bibliografická citace

ČERNÍK, Filip. *Řízení robotického manipulátoru* [online]. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159750>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Petr Vyroubal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Filip Černík</i>
VUT ID studenta:	<i>230461</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2023/24</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Řízení robotického manipulátoru</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 30. května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce doc. Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za jeho trpělivost a cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne: 30. května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. TEORETICKÁ ČÁST	12
1.1 ROBOTICKÉ RAMENO.....	12
1.2 ŠESTIOSÝ ROBOT	13
1.2.1 Osa 1.....	14
1.2.2 Osa 2.....	14
1.2.3 Osa 3.....	15
1.2.4 Osa 4.....	15
1.2.5 Osa 5.....	15
1.2.6 Osa 6.....	15
1.3 KROKOVÉ MOTORY	15
1.3.1 Bipolární a unipolární krokové motory.....	16
1.3.2 Základní typy krokových motorů.....	17
1.3.3 Výhody krokových motorů.....	18
1.4 STEPPER DRIVER	19
1.4.1 Způsoby řízení pomocí driverů	19
1.5 SERVOMOTOR.....	21
1.6 ARDUINO	22
1.6.1 Komponenty na Arduino deskách.....	23
1.6.2 Arduino IDE.....	24
1.7 3D TISK	24
1.7.1 CAD Software	24
1.7.2 České zastoupení v technologiích 3D tisku	25
2. NÁVRH ROBOTICKÉHO RAMENE BCN3D-MOVEO	26
2.1 KONSTRUKCE ROBOTICKÉHO RAMENE	26
2.2 VÝBĚR ELEKTRONIKY.....	26
2.2.1 Krokové motory.....	26
2.2.2 Driver.....	26
2.2.3 Arduino	27
2.3 OVLÁDÁNÍ ROBOTICKÉHO RAMENE	27
2.4 SEZNÁMENÍ S POHYBEM KROKOVÝCH MOTORŮ POMOCÍ ARDUINO IDE	27
2.5 NÁVRH PRO POHYBOVÁNÍ ROBOTICKÝM RAMENEM BCN3D-MOVEO	29
2.5.1 Marlin firmware.....	29
2.6 VLASTNÍ NÁVRH PRO ŘÍZENÍ ROBOTICKÉHO RAMENE	30
2.6.1 MIT App Inventor.....	30
3. PRAKTICKÁ ČÁST	31
3.1 3D TISK A SESTAVENÍ ROBOTICKÉHO RAMENE.....	31
3.2 ZAPOJENÍ ELEKTRONIKY.....	33
3.2.1 Shield Ramps 1.4.....	36
3.2.2 HC-05.....	37

3.3	POPIS VYTVOŘENÉHO SKETCHE PRO SPRÁVNÉ ŘÍZENÍ ROBOTICKÉHO RAMENE	39
3.4	POPIS FUNGOVÁNÍ MOBILNÍ APLIKACE	42
4.	ZÁVĚR.....	45
	LITERATURA.....	46
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	48
	SEZNAM PŘÍLOH.....	49
	SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH.....	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 První robotické rameno [2].....	12
Obrázek 2 Cobot [3]	13
Obrázek 3 Šestiosý robot[4].....	14
Obrázek 4 Krokový motor [7].....	16
Obrázek 5 Zjednodušené schéma bipolárního krokového motoru [8]	16
Obrázek 6 Zjednodušené schéma unipolárního krokového motoru [8]	17
Obrázek 7 Krokový motor s proměnnou reluktancí [10]	17
Obrázek 8 Krokový motor s permanentním magnetem [10].....	18
Obrázek 9 Hybridní krokový motor [10]	18
Obrázek 10 Jednofázové řízení [11]	20
Obrázek 11 Dvoufázové řízení [11].....	20
Obrázek 12 Jedno-dvou fázové řízení [11]	21
Obrázek 13 Řízení servo motoru [13].....	22
Obrázek 14 Struktura servo motoru [13]	22
Obrázek 15 Arduino UNO [17]	23
Obrázek 16 Schéma zapojení driveru a krokového motoru	27
Obrázek 17 Sketch pro stálý pohyb krokového motoru	28
Obrázek 18 Sketch pro otáčení motoru v obou směrech.....	28
Obrázek 19 Sestavené robotické rameno	31
Obrázek 20 Shield Ramps 1.4 [25]	33
Obrázek 21 Blokové schéma zapojení driveru TB6600.....	34
Obrázek 22 shéma Shield Ramps 1.4 [26]	37
Obrázek 23 Schema zapojení HC-05	38
Obrázek 24 deklarace pinů pro připojené motory.....	40
Obrázek 25 Nastavení potřebných vlastností driverů	40
Obrázek 26 Nastavení rychlosti a Bluetooth komunikace	41
Obrázek 27 Příkazy k pohybům motorů	41
Obrázek 28 Prostředí vytvořené aplikace	42
Obrázek 29 Bloky pro spárování aplikace s Arduinem.....	43
Obrázek 30 Blok pro odesílání dat z posuvníků	43
Obrázek 31 Ukázka bloku s příkazem STOP.....	44

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Základní příkazy G-kodu	29
Tabulka 2 1/2 výpočet kroků pro posun o 1°	32
Tabulka 3 2/2 Výpočet kroků pro posun o 1°	33
Tabulka 4 Zapojení motorů NEMA 23	34
Tabulka 5 Zapojení ostatních krokových motorů	35
Tabulka 6 Nastavení mikrostepu driverů	35
Tabulka 7 Nastavení proudů pro krokové motory	35
Tabulka 8 Nastavení parametrů driverů.....	36

ÚVOD

Myšlenkou celé bakalářské práce je vytvořit robotické rameno, které bude sloužit jako výuková pomůcka do předmětu BPC-UIP. Pro tuto funkci bylo zvoleno robotické rameno BCN3D-Moveo. BCN3D-Moveo je veřejně dostupný projekt, který umožňuje vytvoření vlastního pětiosého robotického ramene pomocí 3D tisku a běžně dostupných součástek.

Robotické rameno BCN3D-Moveo je obvykle řízeno standardními metodami, které jsou poskytovány v návodu k jeho sestavení. Tato práce se zaměřuje na vytvoření vlastního řídicího systému, který by umožňoval uživatelům flexibilnější a efektivnější ovládání ramene.

Bakalářská práce obsahuje tři hlavní cíle. Prvním cílem je vybrat vhodnou elektroniku pro realizaci a sestavit rameno. Druhý cíl obsahuje návrh řídicího systému a jeho realizace. Třetím cílem je navržený systém otestovat a demonstrovat.

Pro dosažení těchto cílů byla zvolena platforma Arduino, která poskytuje širokou škálu možností pro řízení a programování robotických systémů. Dále byla vybrána vhodná elektronika pro realizaci řídicího systému, která umožňuje kontrolu motorů.

Tato práce poskytne užitečný základ pro další výzkum a vývoj v oblasti robotiky a automatizace, a také ukáže potenciál kombinace veřejně dostupných projektů a moderních technologií pro tvorbu inovativních a přístupných robotických systémů.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Robotické rameno

Průmyslové roboty lidstvo vyvíjí už přes půl století. Se stále rozvíjenou elektronikou, senzorikou a počítačovými softwary mají dnes průmysloví roboti využití v mnoha odvětvích jako jsou sváření, lakování, malování, montáž, balení, kontrola a testování. Hlavními důvody jejich zavádění do průmyslu jsou zvýšení produktivity a reprodukovatelnosti, zvýšení kvality, menší produkce odpadu, větší bezpečnost na pracovišti, automatizace, adaptabilita, z dlouhodobějšího hlediska menší cena a v poslední době také COVID-19. První robotická ramena byla pouze hydraulická a pneumatická (viz Obrázek 1). Využívala se pouze pro zvedání těžkých objektů, a i tak výrazně zvýšila produktivitu. S pokračujícím vývojem robotických ramen se z funkce pouhého zvedání začaly využívat hlavně pro svoji preciznost, tak se na trh dostali menší električtí roboti. Své využití také získali v člověku nepříznivých podmínkách, jako jsou například ocelárny pro své vysokoteplotní podmínky.[1]



Obrázek 1 První robotické rameno [2]

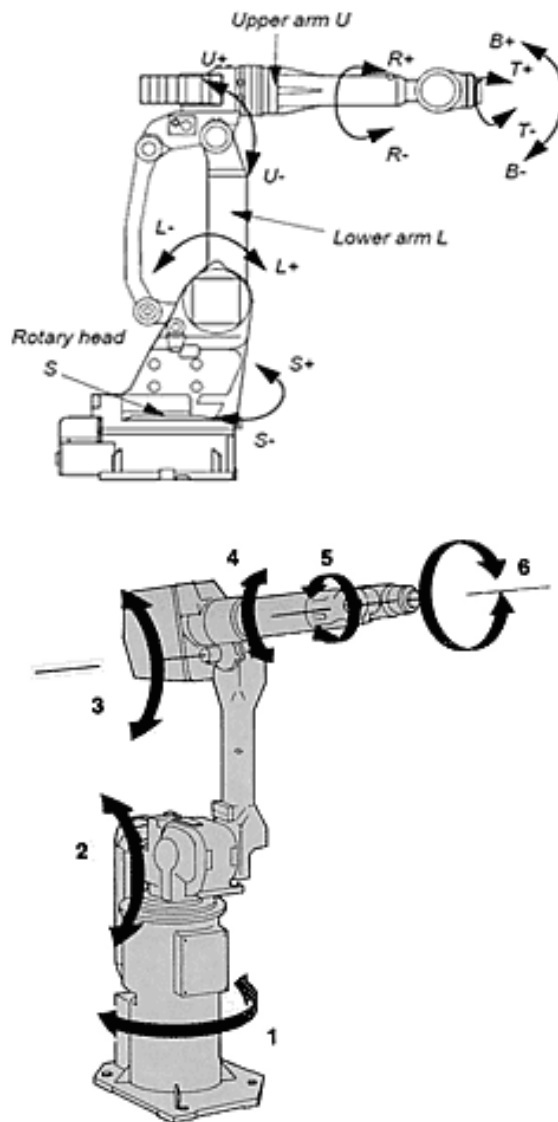
V 80. letech začal být trh s robotickými rameny, díky vývoji senzoriky a snižování cen počítačového hardwaru, velice konkurenční. Začátkem 21. století se s pokrokem v softwarech začala využívat robotická ramena ještě více. Nové oblasti, jako jsou umělá inteligence a strojové učení, dovolují další vývoj robotiky, kdy se robot dokáže vylepšovat a rozhodovat bez lidského řízení. Posledním trendem oblasti robotických ramen jsou coboti (kolaborativní roboti). Hlavní výhodou cobotů je bezpečné fungování v blízkosti lidí nebo v přímém kontaktu s nimi. Pomocí počítačového vidění detekují přítomnost člověka. Coboti (viz Obrázek 2) bývají menší než klasičtí průmysloví roboti, jsou lehce přenosní a využívají se pro specifické úkoly.[1]



Obrázek 2 Cobot [3]

1.2 Šestiosý robot

Existují různé druhy průmyslových robotů. Pro svoji velkou flexibilitu jsou jedni z nejpoužívanějších právě roboti s šesti osami, které se nazývají také šest stupňů volnosti. Pohyb zprostředkovává právě šest motorů, které umožňují pohyb do jakékoli pozice pracovního prostředí (viz Obrázek 3). [4]



Obrázek 3 Šestiosý robot[4]

1.2.1 Osa 1

Osa 1 se nachází na samotné základně robota. Umožňuje mu se otáčet po vodorovné ose zleva doprava. Umožňuje robotovi práci v jakékoli straně pracovního prostředí kolem robota.

1.2.2 Osa 2

Osa 2 je základem spodní části robota. V ideálním případě drží rameno postavené kolmo k desce, na které je robot připevněn. Umožňuje mu se vyklánět dopředu a dozadu.

1.2.3 Osa 3

Osa 3 umožňuje snížit a zvýšit horní část ramene a tím poskytuje přístup horního ramene k požadované práci.

1.2.4 Osa 4

Osu 4 lze přirovnat k zápěstí. Umožňuje natáčet horní část robota v kruhovém pohybu a tím pomáhá robotovi s precizní prací v závěrečném pohybu robota.

1.2.5 Osa 5

Osa 5 umožňuje pohyb nahoru a dolu v zápěstí robota.

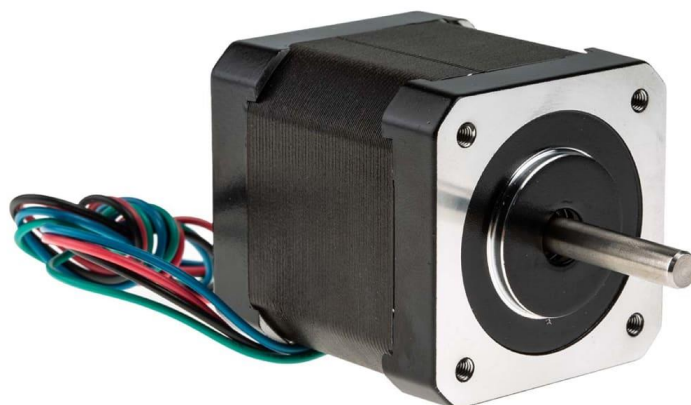
1.2.6 Osa 6

Poslední osa 6 se stará o volný kruhový pohyb samotného konce robota.

1.3 Krokové motory

Krokový motor patří do druhu bezkartáčových stejnosměrných motorů. Bezkartáčové motory jsou odlišné ve své konstrukci, kde jsou cívky navinuty na nehybném jádru (statoru) a permanentní magnety pracují jako pohyblivý rotor. Krokový motor je synchronní, jeho rotor se otáčí synchronně s točivým polem statoru. Hlavní výhodou krokových motorů je přesné řízení jejich polohy. Jeho pohyb určuje magnetické pole vzniklé zapínáním napájení jednotlivých pólových dvojic. Pólové dvojice určují, kolik kroků je potřeba pro celou otáčku rotoru. Rotor se tedy otáčí v určitých úhlech. Pokud má celá otáčka 180 kroků. Rotor se s každým krokem otočí o 2 stupně. Stupeň, se kterým se rotor otočí při jednom kroku, je dán parametry motoru jako jsou: počet cívek, počet pólů a počet zubů na magnetu rotoru. Nejčastěji vyráběné krokové motory jsou motory s krokem $1,8^\circ$, $0,9^\circ$ a $0,45^\circ$. S nejmenším krokem je tedy možno dosáhnout až 800 kroků na otáčku. Ke správnému pohybu krokového motoru je potřeba příslušná řídicí elektronika. Krokové motory lze dělit:

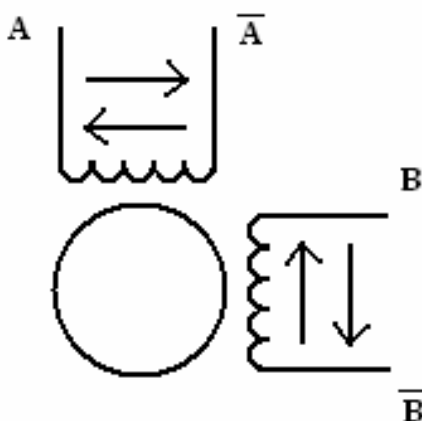
- Podle způsobu vynutí: unipolární a bipolární
- Podle jejich konstrukce: s proměnnou reluktancí, s permanentním magnetem a hybridní [5][6]



Obrázek 4 Krokový motor [7]

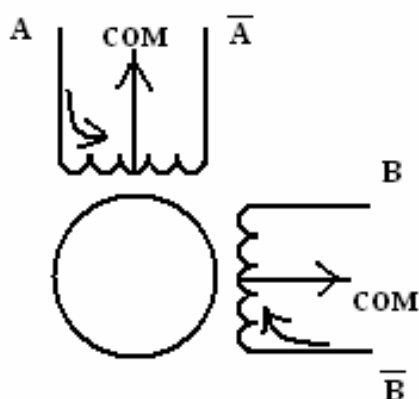
1.3.1 Bipolární a unipolární krokové motory

Krokové motory rozlišujeme na bipolární a unipolární. Dělení značí proud, který může téct v jednom (unipolární) nebo obou (bipolární) směrech. Bipolární krokový motor má většinou čtyři vývody značené: A, A⁻, B a B⁻. Mezi vývody A a A⁻ (stejně tak B a B⁻) je v motoru navinuta cívka (viz Obrázek 5). Elektrický puls může procházet v obou směrech (od A do A⁻, i od A⁻ do A). Bipolární krokové motory vykazují vyšší teploty, proto je důležité počítat i s odvodem tepla. [8][9]



Obrázek 5 Zjednodušené schéma bipolárního krokového motoru [8]

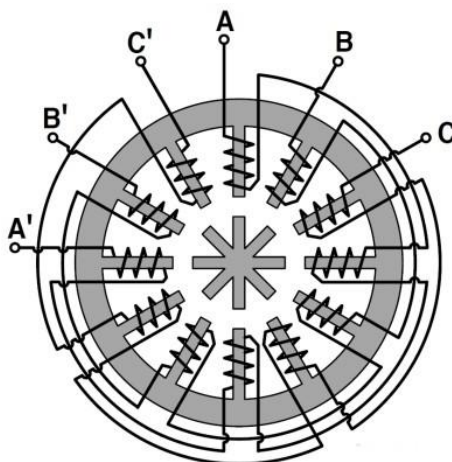
U unipolárních krokových motorů prochází proud pouze jedním směrem. Má šest vývodů. Cívky jsou navinuté stejně jako u bipolárního, akorát ve středu cívky je vyveden společný vodič (společná zem). Proud teče jedním z krajních vývodů cívky do motoru a společným vodičem ven (viz Obrázek 6). Protože unipolární krokové motory využívají vždy pouze polovinu vinutí, dosahují tak nižších výkonů a generují méně tepla. [8][9]



Obrázek 6 Zjednodušené schéma unipolárního krokového motoru [8]

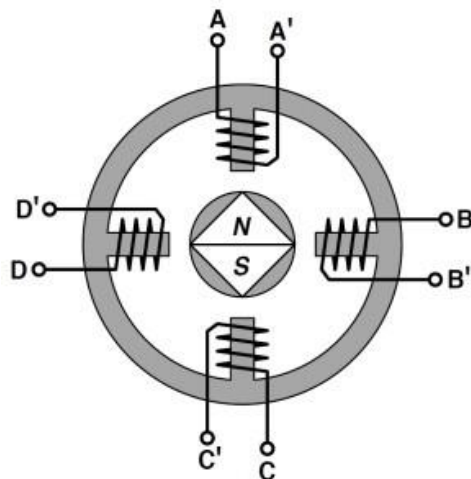
1.3.2 Základní typy krokových motorů

Nejstarší konstrukce krokového motoru se nazývá krokový motor s proměnnou reluktancí. Rotor i stator je složen z plechů. Na statorových nástavcích jsou vinuty jednotlivé fáze (viz Obrázek 7). Cívky statoru mohou být zapojeny sériově i paralelně. Motor má malý točivý moment a je vhodný v aplikacích kde není důraz na přesné polohování. [10]



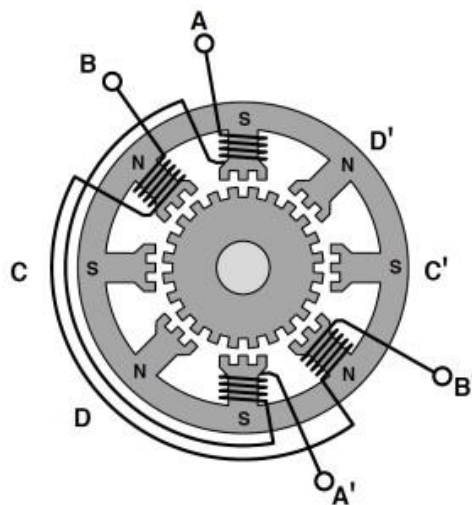
Obrázek 7 Krokový motor s proměnnou reluktancí [10]

Dalším krokovým motorem je motor s rotorem tvořeným permanentním magnetem. Rotor je tvořen pólováním permanentním magnetem, který má polovinu střídavých pólů, než počet pólů statoru (viz Obrázek 8). Konstrukce je jednoduchá a má využití ve spotřební a automobilové elektronice, kde nejsou potřeba malé kroky. Jeho výhodou vyšší hmotný výkon. [10]



Obrázek 8 Krokový motor s permanentním magnetem [10]

Třetím typem jsou hybridní krokové motory, které jsou v dnešní době nejpoužívanější. Jedná se o kombinaci konstrukcí předešlých dvou motorů a vykazuje jejich kladné vlastnosti: malý úhel kroku, velký točivý moment a velký hmotný výkon. Rotor je tvořen pólovými nástavci se zuby (viz Obrázek 9). Na nástavci je navinuta cívka. Rotor tvoří permanentní magnet uložený mezi pólovými nástavci. Obvod pólovaných nástavců je ozuben. Ozubení určuje velikost kroku. Obvykle se volí větší počet zubů na rotoru než na statoru. [10]



Obrázek 9 Hybridní krokový motor [10]

1.3.3 Výhody krokových motorů

Hlavními výhodami krokových motorů jsou přesné pozicování, kontrola řízení rychlosti a menší spotřeba, to lze využít hlavně při akumulátorových zařízeních. Reagují rychle a přesně na změnu směru otáčení. Při přetížení se motor zastaví bez poškození. Z konstrukčních důvodů dosahují větších životností, protože nemají komutátor a kartáče. Motory jsou tišší. Nevýhodami krokových motorů je vysoká rychlost a točivý moment.

Nejsou vhodné pro extrémní rychlosti a při určitých rychlostech rezonují. Jejich točivý moment je menší než u ostatních elektromotorů stejné velikosti.

Krokové motory mají hlavní využití v aplikacích, kde je potřeba řídit polohování. Široké využití mají také v počítačových zařízeních, skenerech, tiskárnách, 3D tiskárnách, CNC strojích, malé robotice a mnoha dalších zařízeních s vyžadovanou přesností polohování. [10]

1.4 Stepper Driver

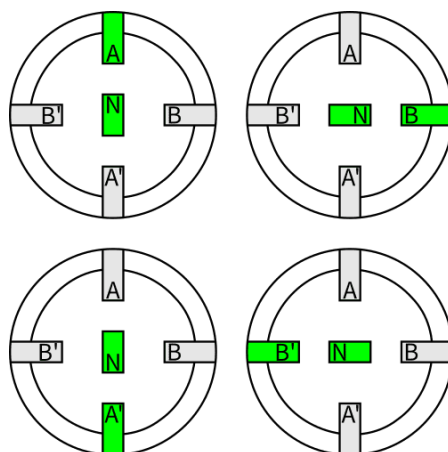
Stepper driver (budič) je elektronická součástka, která zajišťuje správný chod krokového motoru. Jeho funkce je posílat proudové pulzy do cívek krokového motoru pro řízení jeho pohybu. Stejně jako krokové motory se jejich drivery dělí na unipolární a bipolární, podle motoru, se kterým pracují. V dnešní době má největší využití bipolární driver se čtyřmi vývody. Šesti a osmi vývodové zapojení jsou již zastaralá. Řízení proudu tekoucího fázemi zajišťují tranzistory. Tranzistory plní funkci spínačů, kde báze ovládá tok proudu. Uvnitř bipolárních driverů se nachází H-můstek pro ovládání směru tekoucího proudu. Nejběžnější bipolární driver využívá technologii chopper budiče a pulsně šířkovou modulaci. Chopper vypíná a spíná vstupní napětí, aby udržoval proud na požadované hodnotě.[11]

1.4.1 Způsoby řízení pomocí driverů

Stepper drivery dělíme na 4 druhy podle jejich řízení krokového motoru:

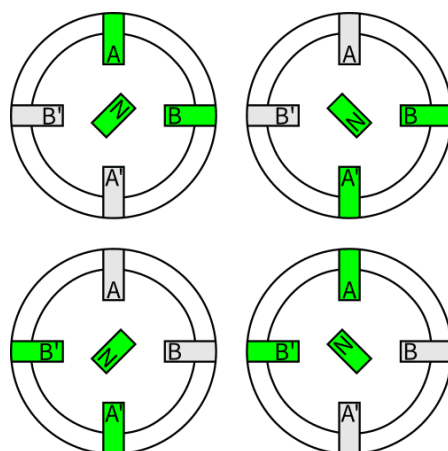
- Jedno fázové
- Dvou fázové
- Jedno-dvou fázové
- Mikrostep

Jedno fázové řízení používá pouze jednu fázi v určitý moment, a proto se sevarní pól magnetu rotoru natočí k jedné právě aktivní cívce chovající se jako pól jižní (viz Obrázek 10). Jednofázové řízení se téměř nepoužívá z důvodu malého rozlišení a malého točivého momentu.[11]



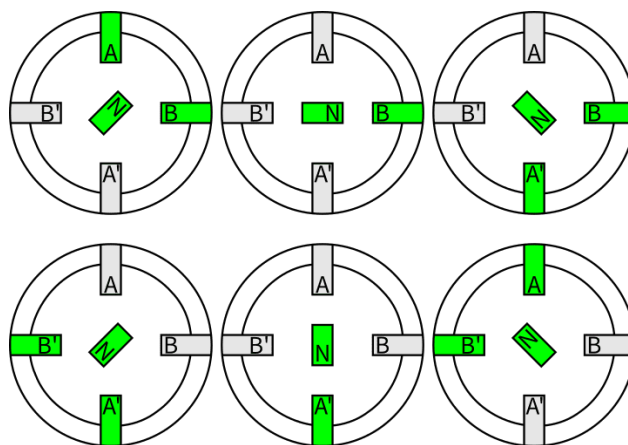
Obrázek 10 Jednofázové řízení [11]

Dvoufázové řízení pracuje se dvěma fázemi najednou. Pokud jsou napájeny dvě vedlejší cívky a mají opačný pól než magnet rotoru, bude se poloha rotoru nacházet právě uprostřed mezi 2 cívkami (viz Obrázek 11). Při následném aktivování dvou dalších pólů se opačný pól magnetu bude pohybovat vždy ve středu mezi cívkami. Dvoufázové řízení oproti jednofázovému nezajistí větší rozlišení křivkování, ale přinese větší točivý moment.[11]



Obrázek 11 Dvoufázové řízení [11]

Jedno-dvou fázové řízení spojuje aplikace předešlých dvou řízení, kdy v jeden moment je napájena pouze jedna cívka a magnet je tedy orientován k ní. V další moment jsou napájeny dvě cívky a opačný pól magnetu se tedy přemístí do středu mezi aktivní cívky (viz Obrázek 12). Tato metoda zajišťuje poloviční krokování. Toto řízení přináší větší rozlišení a při aktivních dvou fázích také větší točivý moment. Změny točivého momentu mohou způsobovat vibrace. [11]



Obrázek 12 Jedno-dvou fázové řízení [11]

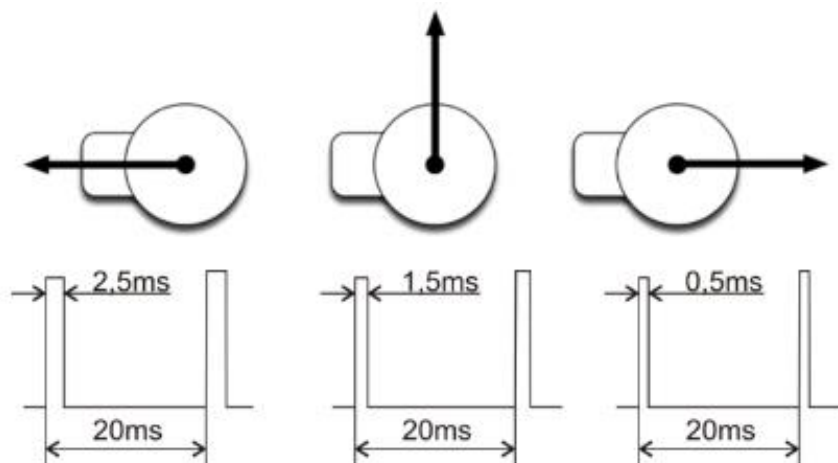
Mikrostep je řízení, které vykazuje nejvyšší rozlišení. Rotor se otáčí v krocích po určitých stupních. Toto řízení umožňuje rozdělit jeden krok na více menších a dosáhnout tak při nižších rychlostech větší hladkosti rotace. Mikrostep řízení používá pulzně šířkovou modulaci napětí pro ovládání proudů ve statorových cívkách.

Po připojení driveru k motoru je důležité ještě správné nastavení na driveru. Na driverech lze nastavit vhodné krokování a jmenovitý proud pro vhodnou aplikaci. Driver je potřeba proudově dimenzovat. Driver je schopen dodávat určité množství proudu, to značí špičkový proud. Pro drivery s polovičním a plným krokem je jmenovitý proud roven špičkovému proudu. U mikrostep driverů je špičkový proud 1,4krát vyšší než jmenovitý. [12]

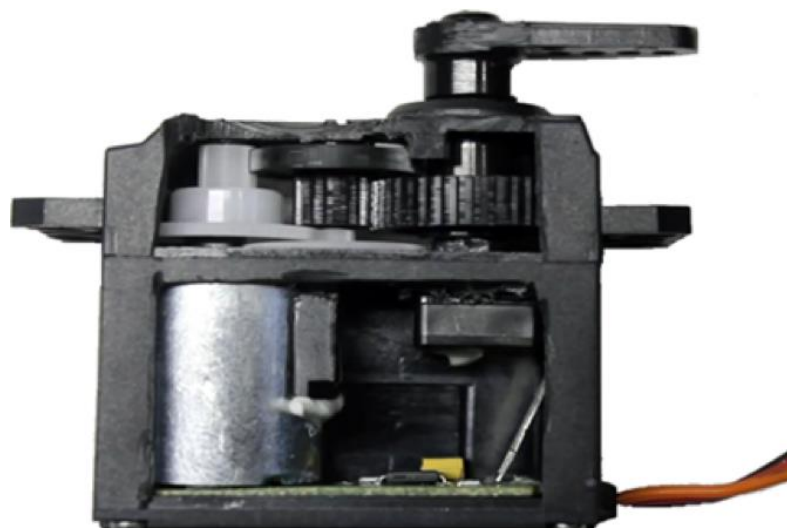
1.5 Servomotor

Servomotor je elektrický motor (viz Obrázek 14). Dokáže nastavit určitou polohu a dále ji udržet. Skládá se ze tří částí: rotor, stator a řídicí systém. Stejnosečné servomotory se používají pro ovládání robotických ramen, mechanických klapků a dalších aplikacích, kde je potřeba přesný a kontrolovaný pohyb. Je často používán pro přesné opakující se pohyby v automatizovaných systémech, modelářství a robotice. Výhodami jsou malé rozměry a hmotnost s relativně velkou silou.

Motory běžně neumožňují neustálé otáčení dokola, ale udržují úhel natočení, nejčastěji v rozsahu 0° až 180° (viz Obrázek 13). Požadovaný úhel se nastavuje pomocí PWM signálu. PWM signál se mění mezi dvěma hodnotami (vysokou a nízkou). Čím širší je doba trvání vysokého signálu, tím větší je natočení motoru.[13]



Obrázek 13 Řízení servo motoru [13]



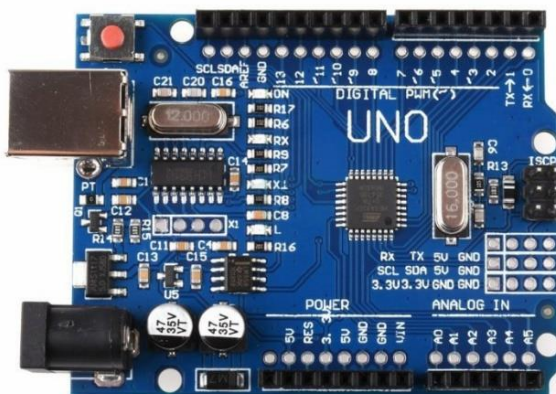
Obrázek 14 Struktura servo motoru [13]

1.6 Arduino

Arduino je vývojová platforma populární primárně u lidí, kteří s elektronikou začínají. Skládá se z fyzických programovatelných desek a softwaru Arduino IDE. Desek je na trhu plno, liší se primárně velikostí, počtem pinů, mikrokontrolerem a aplikací, pro které je deska navržena. Třemi nejčastěji používanými deskami jsou Arduino UNO (viz Obrázek 15), jeho menší verze Arduino NANO a naopak rozšířené Arduino MEGA. Hlavními důvody oblíbenosti těchto desek je zjednodušený programovací jazyk C++ a nepotřeba žádného dalšího hardwaru, jako je třeba programovací jednotka pro nahrávání nového kódu, desky komunikují s počítačem přes USB kabel. Software Arduino IDE je zdarma a desky jsou levné. Používání této platformy má své využití pro projekty, kde se pracuje s tlačítky, LED, motory, reproduktory, GPS jednotkami, kamerami a internetem.

Arduino od svého vzniku získalo širokou světovou komunitu a na internetu existují návody na nejrůznější projekty, to lze považovat za výhodu, protože jakýkoli nápad už pravděpodobně na internetu existuje.[14]

Lidé často mluví o Arduino jako o mikrokontroleru. To není pravda, protože samotná Arduino deska v sobě mikrokontroler obsahuje. Většinou deska využívá mikrokontrolery od společnosti Atmel. Mikrokontroler je jednočipový počítač. Čip obsahuje mikroprocesor, operační paměť (RAM), pevnou paměť (ROM, PROM nebo EPROM), vstupní a výstupní obvody a rozhraní pro periferie. Aplikace mikrokontroleru jsou různé od běžné domácí elektroniky až po využití ve vojenství a průmyslu. Jeho primární využití je pro provoz elektroniky pomocí přímého programu, který se nemění. Arduino je deska mikrokontroleru s vlastním softwarem a používá se primárně pro trénink a vývoj elektronických projektů.[15]



Obrázek 15 Arduino UNO [17]

1.6.1 Komponenty na Arduino deskách

Jak bylo dříve zmíněno, desky Arduino jsou odlišné, ale většina má své hlavní komponenty společné. Deska musí být nějakým způsobem napájena, proto bývá na kraji umístěn konektor typu B a Barrel Jack. Na krajích desky jsou umístěny piny, které mají různé vlastnosti: zem, piny pro napájení dalších komponent, analogové, digitální, PWM a pro analogovou referenci. Dále je na desce resetovací tlačítko, které ukončí všechny operace a restartuje nahraný kód, LED indikátory ukazující, zda je Arduino připojeno ke zdroji a jestli posílá a přijímá data, mikrokontroler a regulátor napětí, který kontroluje napětí vedoucí do desky. Způsob, jakým lze možnosti Arduina rozšířit, se nazývá shields. Arduino shields jsou přídavné desky s dalšími elektronickými součástkami, které se nasadí na původní desku. Mezi nejpoužívanější shieldy patří shield s LCD displejem nebo pro zajištění bezdrátové komunikace. [14]

1.6.2 Arduino IDE

Arduino IDE je software komunikující s deskami. Skládá se z textového editoru, pole pro zprávy, textové konzole, menu a lištu s příkazy. Kód v textovém editoru se nazývá sketch a ukládá se s koncovkou .ino. Konzole vypisuje výstupy z prostředí Arduina včetně informací o chybách. Sketch se skládá ze dvou hlavních částí, které jsou pojmenovány void setup a void loop. Příkazy z void setup proběhnou pouze po nahrání anebo spuštění desky Arduina. Příkazy z void loop pracují opakovaně až do vypnutí desky Arduina. Před nahráním sketche je potřeba v panelu nástrojů vybrat správný sériový port. Ve Windows bude na výběr sériový port COMx. S nahráváním sketche se deska automaticky resetuje. Součástí vývojového prostředí jsou také knihovny, které umožňují kvalitnější funkce sketche. Pokud nejsou knihovny součástí softwaru Arduina, je třeba knihovnu nejdříve importovat. Knihovny umožňují lepší manipulaci s daty, a fungování s hardwarem. [16]

1.7 3D Tisk

První zmínky o 3D tisku jsou z roku 1980 z Japonska, kde se experimentovalo s fotocitlivou pryskyřicí, která polymerovala pomocí UV záření a přidávala se po vrstvách. Tento experiment nebyl úspěšný a nepodařilo se mu získat patent. Patent byl udělen až o něco později Charlesi Hullovi za stereolitografii (SLA), jeho systém také spočíval ve vytvrzování fotocitlivé pryskyřice. Ve stejném roce byly také vynalezeny dva další systémy 3D tisku. Selective Laser Sintering (SLS), který využíval materiál v podobě prášku a byl vytvrzován laserem a dnes nejrozšířenější Fused Deposition Modeling (FDM nebo také FFF), které vytlačuje vlákno z rozeřáté trysky. [18]

V posledních 10 letech se 3D tisk výrazně rozšířil veřejnosti. S rostoucí kvalitou a klesající cenou začalo 3D tisk poznávat více lidí. Používané materiály a technologie se stále zlepšují a 3D tisk už není pouze jen o tisknutí malých plastových součástek. Prostorové tisknutí našlo využití v dalších oborech jako jsou automobilové a letecké strojírenství, lékařství, stavebnictví, design a mnoha dalších. Mimo finálních produktů se 3D tisk také využívá pro modely a prototypy. Vysoké uplatnění mají 3D tiskárny v medicíně. Lze tisknout implantáty, protézy, ortézy, naslouchátka a další. Výhodou je rychlá výroba a přizpůsobení pacientovi na míru. S vývojem technologií a materiálů souvisí i nahrazení materiálů, lze tisknout z různých materiálů jako jsou uhlíková vlákna, skleněná vlákna nebo třeba čokoláda. [18][19]

1.7.1 CAD Software

Tištění 3D objektů předchází model, který je potřeba na počítači vytvořit. K tomu jsou na trhu přes 30 let CAD (Computer-aided design) programy. CAD je cesta jak vytvořit 2D a 3D modely reálných produktů, než se vyrobí. Nabízí možnosti jako jsou sdílení, úpravy, simulace a analýzy modelů. CAD 3D programů existuje mnoho, liší se v možnostech,

náročnosti a jestli jsou monetizované nebo zdarma. Modelování 3D objektů se v posledních letech dostává i do škol, kde se o něm studenti učí v příslušných odborných předmětech. Nejznámější CAD 3D softwary jsou od společnosti Solidworks a Autodesk, protože se s nimi právě často seznamují lidé už na školách. Mimo tisknutí reálných objektů má 3D modelování také využití v odvětvích jako jsou počítačové hry nebo animace. [20]

1.7.2 České zastoupení v technologiích 3D tisku

Mezi jednoho z nejznámějších lidí v oblasti 3D tisku patří český Josef Průša se svojí společností Prusa Technology. Prusa Technology se v roce 2018 stala nejrychleji rostoucí technologickou firmou ve střední Evropě. Jejich úspěch stojí za tiskárnou Original Prusa i3. Velká část dílů tiskáren Original Prusa i3 je tištěná na dalších 3D tiskárnách a lze pomocí jedné tiskárny vytisknout další. Tyto tiskárny jsou open-source. Open-source vyjadřuje, že informace o hardwaru nebo softwaru jsou veřejně dostupné. Bez open-source prostředků by Prusa Technology nikdy nevznikl, a proto se firma rozhodla tento odkaz zanechat ostatním. [21]

2. NÁVRH ROBOTICKÉHO RAMENE BCN3D-MOVEO

BCN3D-Moveo je malé robotické rameno, které lze postavit na běžný pracovní stůl. Jeho hlavním úkolem je přesun předmětů. Pohyb ramene ovládá šest krokových motorů. A úchop předmětů poskytují kleště poháněné servomotorem. Elektronika je připojena k řídicí jednotce Arduino MEGA, ke které BCN3D Technologies poskytuje i software Merlin. Veškeré části budou dále popsány v následujících kapitolách. [22]

2.1 Konstrukce robotického ramene

Díly konstrukce ramene byly převzaty od BCN3D Technologies na webové stránce: github.com. Pro 3D tisk byl zvolen biologický materiál PLA (kyselina polylactonová). PLA je vhodný pro modely a prototypy, kvůli své ceně a snadné tisknutelnosti. Nevýhodou jsou teplotní, mechanická a chemická odolnost.

2.2 Výběr elektroniky

2.2.1 Krokové motory

- NEMA 23 SM57HT112-3004A
- NEMA 23 SM57HT112-3004A
- NEMA 17 SM42HT47-1684A
- NEMA 17 17HS19-1684SPG5
- NEMA 17 SM42HT33-1334
- NEMA 14 SM35HT36-1004A

Krokové motory byly zvoleny primárně podle svých velikostních a výkonových vlastností, aby se vešly přímo do konstrukce. Všechny zmíněné krokové motory zvládají krok s úhlem $1,8^\circ$. Největší a nejtěžší krokové motory NEMA 23 drží celou konstrukci a jsou umístěné v základně ramene. Naopak nejmenší motor NEMA 14 je umístěn na samotném konci ramene.[22]

2.2.2 Driver

- TB6600

Důvodem výběru driveru byla práce s většími proudy a cena. Driver je vhodný pro řízení dvoufázových bipolárních motorů, to v případě předešlého výběru krokových motorů odpovídá. Tyto drivery s funkcí mikrostep dokážou rozdělit 1 krok motoru na $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$,

1/16 a 1/32. Integrované obvody driveru generují teplo i při běžném chodu součástky, proto je třeba s tímto problémem při návrhu počítat. [22]

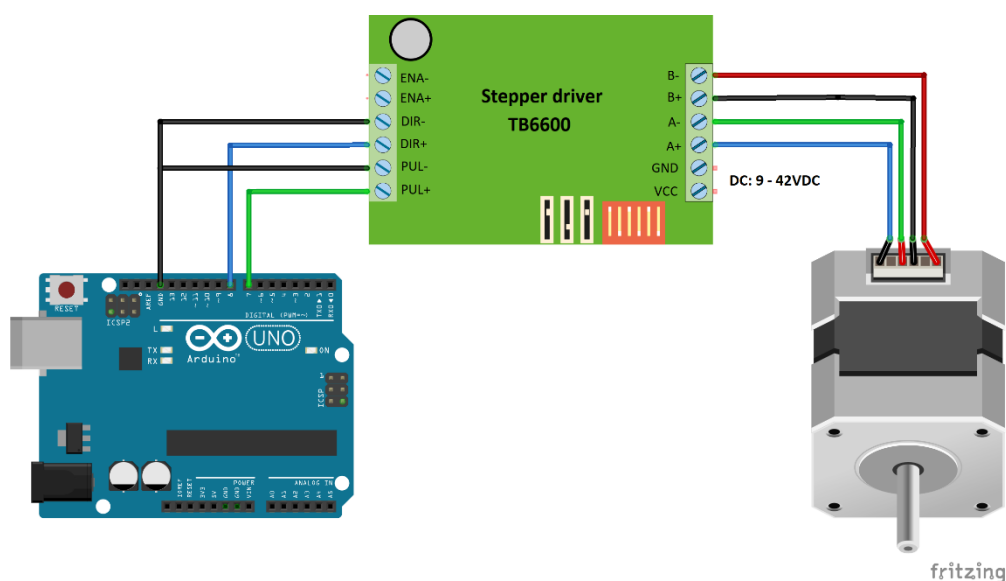
2.2.3 Arduino

- Arduino MEGA 2560

Arduino MEGA 2560 bylo vybráno z důvodu vysokého počtu výstupních digitálních pinů, na které budou připojeny všechny drivery. Je zde dostupných 54 I/O digitálních pinů z toho 14 s PWM technologií. Důvodem výběru platformy Arduino byly předešlé zkušenosti a kompatibilita s původním návodem BCN3D-Moveo ramene. [22]

2.3 Ovládání robotického ramene

Robotické rameno bude ovládáno pomocí sketchu sestrojeného v softwaru Arduino IDE. Hlavní funkcí kódu je správné ovládání všech krokových motorů pro pohyb ramene. Motory budou zapojeny podle schéma zapojení krokových motorů (viz Obrázek 16).



Obrázek 16 Schéma zapojení driveru a krokového motoru

2.4 Seznámení s pohybem krokových motorů pomocí Arduino IDE

Nejjednodušší kódy pro rozhybání krokových motorů jsou na pár řádků, kde stačí nastavit příslušné piny na výstup. A pomocí jednoduchého zapínání a vypínání výstupů motorem točit (viz Obrázek 17).

```

1 //*****
2
3 void setup() {
4   pinMode(2,OUTPUT); //nastavení pinu 2 na výstup
5   pinMode(3,OUTPUT); // nastavení pinu 3 na výstup
6   digitalWrite(2,HIGH); // určuje směr rotace driveru, při LOW rotuje opačným směrem
7 }
8
9 void loop() {
10  digitalWrite(3,LOW);
11  digitalWrite(3,HIGH); //neastavení motoru, aby udělal jeden krok
12  delayMicroseconds(60); //pauza
13 }

```

Obrázek 17 Sketch pro stálý pohyb krokového motoru

Kód je jednoduchý a pro reálné využití nepraktický. Je potřeba s ním dále pracovat. Pro přípravu na budoucí kód bude lepší využívat knihovnu AccelStepper, která vypomáhá v práci s krokovými motory (viz Obrázek 18). Knihovna umožňuje nezávislé pracování s více krokovými motory. Zjednodušuje nastavování rychlostí otáček, zjišťuje polohu při pohybu motoru a umožňuje rychlé a jednoduché přenastavování rychlostních a polohových parametrů při chodu programu. Knihovna je veřejně dostupná.

```

1 //*****
2 #include <AccelStepper.h>
3
4 AccelStepper stepper(1, 8, 9); // 1 krokový motor, pul+ --> pin 8, dir+ --> pin 9
5
6 void setup()
7 {
8   stepper.setMaxSpeed(1000); //nastavení maximální rychlosti
9   stepper.setAcceleration(50); //nastavení akcelerace
10  stepper.setSpeed(200); //nastavení rychlosti kroků za vteřinu
11  moveTo(3200); //1 otáčka při mikrostepu 1/16
12 }
13
14 void loop()
15 {
16   if(stepper.distanceToGo()==0)
17     stepper.moveTo(-stepper.currentPosition());
18     //otáčí směr při dosažení maximální povolené pozice, zde 3200 a -3200
19     //po první jedné otáčce provádí 2 otáčky než změní svůj směr
20   stepper.run(); //provede 1 krok
21 }

```

Obrázek 18 Sketch pro otáčení motoru v obou směrech

Takto se bude driver s krokem $1,8^\circ$, připojený vývody PUL, DIR a ENA na piny Arduina 8,9 a 1, při nastavení mikrostepu 1/16, otáčet v jednom směru o 3200 kroků. To je v tomto případě 720° tedy 2 celé otočky. Po dosažení této pozice vykoná stejný pohyb v opačném směru.

2.5 Návrh pro pohybování robotickým ramenem BCN3D-Moveo

Původní návod pro BCN3D-Moveo obsahuje sketch s názvem Marlin. Marlin je velmi komplexní sketch určený primárně pro práci s 3D tiskárnami. Marlin obsahuje obsáhlé množství nastavení a lze ho upravit pro pohyb všech pěti os ramene. Je k němu doporučeno použít program Pronterface, kde lze pomocí G-kódu pohybovat jednotlivými motory. [22]

2.5.1 Marlin firmware

Marlin je open-source firmware určený pro ovládání 3D tiskáren. Firmware byl vyvíjen komunitou vývojářů Rep Rap a stále se vyvíjí a aktualizuje. Využívá se v komerčních i domácích 3D tiskárnách. Jeho hlavní funkce je řízení pohybu tiskové hlavy, pohybu os a podávání filamentu. Umožňuje nastavení rychlosti pohybu, akcelerace, a zajištění přesného umístění. Dále jsou uživatelé pomocí firmwaru schopni ovládat teplotní řízení. Zejména teploty tiskové hlavy a podložky. Pomocí snímačů lze monitorovat aktuální teplotu a nastavit cílovou teplotu.[23]

Jeho výhodou je konfigurovatelnost. Podporuje různé typy tiskáren a je kompatibilní s řadou řídicích desek, mezi které patří i desky Arduino a Shield RAMPS 1.4. Uživatelé zajímá hlavně sekce configuration.h a configuration adv.h, kde se nastavují potřebné parametry.[23]

Ovládací jazyk firmwaru Marlin se nazývá G-kód. Příkazy G-kódu zadávají jednoduché akce jako jsou přesuny na určenou pozici určitou rychlostí, nahřívání topného tělesa na určitou teplotu nebo ovládání servo motoru (viz Tabulka 1). G-kód funguje jednoduchým zápisem. Např. příkazem:

```
G01 X10 Y10 F50
```

Příkazujeme stroji, aby provedl lineární pohyb na pozici X=10, Y=10 s rychlostí 50 jednotek za minutu. V tabulce jsou uvedeny základní příkazy pro ovládání.

Tabulka 1 Základní příkazy G-kódu

G-kód	Funkce
G00	rychlý posuv
G01	pracovní posuv
G02	kruhový posuv
G28	domovská pozice
G90	absolutní režim polohy
G91	relativní režim polohy
M280	ovládání servomotoru

Marlin může být kompletně ovládán hostujícím softwarem. Mezi tyto softwary patří například Pronterface nebo Repetier Host. K ovládání BCN3D-Moveo je podle návodu určeno používat Pronterface a upravenou verzi firmwaru Marlin, která je více přizpůsobena k ovládání robotického ramene. [22]

2.6 Vlastní návrh pro řízení robotického ramene

V práci bylo zvoleno nevyužít software z návodu od BCN3D, ale vytvořit vlastní řešení řízení robotického ramene. Řešení se skládá ze dvou částí. První část obsahuje Arduino sketch využívající zmíněnou knihovnu AccelStepper.h pro pohyb krokových motorů. Druhou část tvoří bezdrátová komunikace mezi Arduinem a Android telefonem pomocí Bluetooth modulu. Modul bude přijímat signály z telefonu s vlastní vytvořenou aplikací. Aplikace byla vytvořena ve webovém rozhraní MIT App Inventor. Pro zmíněnou komunikaci byla použita knihovna SoftwareSerial.h. Hlavní výhodou knihovny SoftwareSerial.h je vytváření dalších digitálních sériových portů na deskách, které mají omezený počet hardwarových sériových portů. Knihovna dále umožňuje nastavit potřebný baud rate pro nové digitální sériové porty. Podrobnější postup práce bude popsán v následující kapitole Praktická část.

2.6.1 MIT App Inventor

MIT App Inventor je platforma pro tvorbu aplikací pro Androidové telefony, iPhony a Androidové/iOS tablety. Jeho výhodou je jednoduchost a intuitivnost, kterých je dosaženo pomocí vizuálního programování. Vizuální programování nahrazuje psaní kódu, místo toho se pracuje s logickými bloky, které reprezentují různé funkce a operace. Tyto bloky lze spojovat a tím se vytváří požadované chování aplikace. Proces vytvoření aplikace přes MIT App Inventor se koná ve dvou částech. První část se nazývá Designer, kde se přetahují různé prvky do pracovního prostoru. Mezi tyto prvky patří tlačítka, textová pole, obrázky, senzory zvuky a mnoho dalších. Tyto prvky se přetahují do předpřipravené plochy znázorňující obrazovku telefonu, a lze s nimi dále pracovat. Druhou částí je již zmíněné spojování bloků, které určuje, jak se mají dané prvky chovat. Mit App Inventor funguje jako online platforma, není třeba nic instalovat, k používání stačí pouze připojení k internetu a webový prohlížeč. Po dokončení aplikace umožňuje MIT App Inventor testovací režim pomocí AI Companion aplikace v mobilním zařízení. Aplikaci v telefonu lze spojit s předpřipravenou aplikací ve webovém prostředí a otestovat ji. Po otestování lze hotovou aplikaci sdílet pomocí APK souboru a následně ji nainstalovat na dané zařízení. [24]

3. PRAKTICKÁ ČÁST

Kapitola popisuje, jak bylo postaveno, zapojeno a naprogramováno robotické rameno BCN3D-Moveo.

3.1 3D tisk a sestavení robotického ramene

Komponenty určené pro 3D tisk byly vytištěny na tiskárnách Ultimaker 2+ a Ultimaker 3 technologií FDM. Pro tisk byla použita tisková struna materiálu PLA modré, červené, oranžové a šedé barvy (viz Obrázek 19). Na 3D tiskárně bylo vytisknuto 39 dílů. Kompletace robotického ramene byla provedena podle dostupného návodu. Motory byly upevněny do vytištěných součástí pomocí spojovacího materiálu. Ozubené řemenice a řemeny byly použity s profilem T05.



Obrázek 19 Sestavené robotické rameno

Pro správnou funkčnost ramene bylo potřeba přepočítat o kolik stupňů se otočí jednotlivé části ramene při otočení pohybu o jeden krok. K výpočtu jsou potřeba znát čtyři hodnoty:

- Krokový motor: 200 kroků na otáčku
- Mikrostep: 1/16
- Obvod řemenice: 15,92 mm
- Poloměr základny: 160 mm

Nejdřív je potřeba znát posun řemenice při jednom kroku motoru:

$$pos_r = \frac{1,8^\circ}{360^\circ} * 15,92mm = 0,0796mm \quad (3.1)$$

Dále potřebujeme znát posun řemenice při jednom mikrostepu:

$$pos_{mc} = \frac{0,0796mm}{16} = 0,004975mm \quad (3.2)$$

Při známém posunu řemenice při jednom mikrostepu, lze spočítat úhlový posun ramene při jednom mikrostepu:

$$\alpha = \frac{0,004975mm}{160mm} = 0,0000311 \text{ rad} \quad (3.3)$$

Převod úhlového posunu na stupně:

$$\alpha = 0,0000311rad * 57,2958 \approx 0,00178^\circ \quad (3.4)$$

Počet mikrostepů potřebných k dosažení jednoho stupně:

$$\text{počet mikrostepů} = \frac{1^\circ}{0,00178^\circ} \approx 561 \quad (3.5)$$

V tabulce jsou uvedeny spočítané počty kroků, které jsou potřeba k posunu dané části ramene o 1°. Tyto hodnoty jsou důležité pro správné sestavení funkčního programu. Jeden z motorů je umístěn v rameni bez řemenice a otáčí ramenem o velikost svého nastaveného kroku (viz Tabulka 2 a Tabulka 3).

Tabulka 2 1/2 výpočet kroků pro posun o 1°

motor	I [A]	krok [°]	o(r) [mm]	r(r) [mm]	pos [mm]
NEMA 17	1,6	1,8	15,92	160	0,0796
NEMA 23	3	1,8	22,29	120	0,1115
NEMA 17	1,68	0,35	22,29	95	0,0217
NEMA 17	1,33	1,8	/	/	/
NEMA 14	1	1,8	15,92	70	0,0796

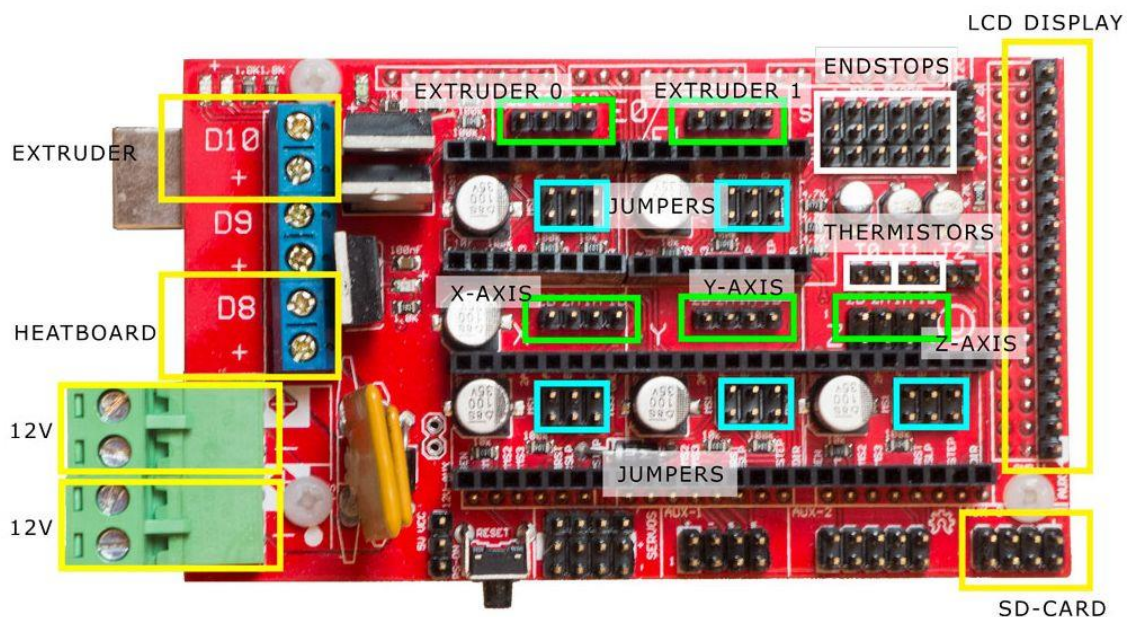
Tabulka 3 2/2 Výpočet kroků pro posun o 1°

motor	pos(mc) [mm]	α [rad]	α [°]	kroků na °
NEMA 17	0,0050	0,0000311	0,00178	561
NEMA 23	0,0070	0,0000580	0,00333	301
NEMA 17	0,0014	0,0000143	0,00082	1224
NEMA 17	/	/	0,11250	9
NEMA 14	0,0050	0,0000711	0,00407	246

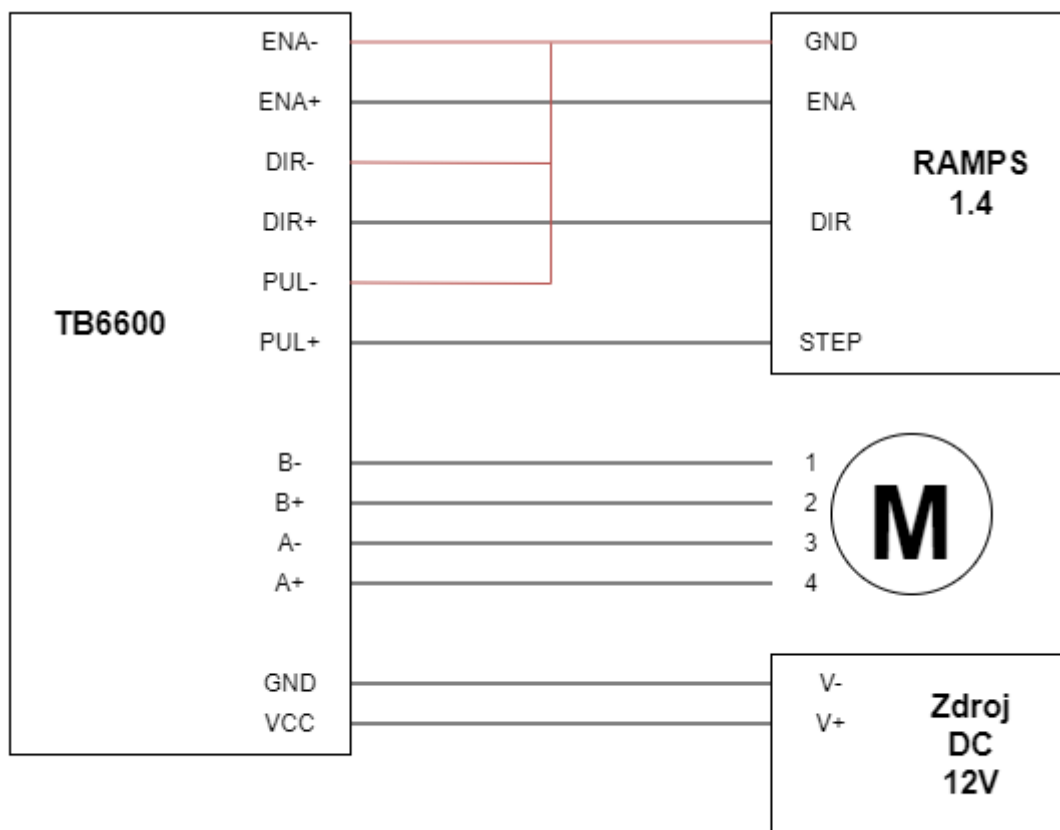
3.2 Zapojení elektroniky

Elektronické komponenty byly zapojeny podle schéma zapojení. S řídicí jednotkou Arduino Mega 2560 byl využit shield RAMPS 1.4 (viz Obrázek 20) pro jednodušší zapojení a následně úpravy kódu. Na RAMPS 1.4 byly využita hlavní funkce připojení pěti krokových motorů. Shield je navržen, aby se na něj dalo připojit pět malých driverů (A4988, DRV8825 a další) bez jakéhokoli propojení kabelů. Blokové schéma zapojení viz Příloha A -.

V projektu byly použity krokové drivery TB6600 s chladiči, které se k shieldu připojily přes ovládací piny ENA, DIR, a STEP. Zbylé piny ENA-, DIR- a STEP- byly spojeny a připojeny k pinu GND v patričném místě. K jednotlivým driverům byl připojen patričný krokový motor (viz Obrázek 21).



Obrázek 20 Shield Ramps 1.4 [25]



Obrázek 21 Blokové schéma zapojení driveru TB6600

V základně ramene jsou umístěny dva největší a nejvýkonnější krokové motory, které je třeba ovládat stejnými signály. Proto jsou na shieldu v místě ovládaní E1 připojeny dva drivery. V zapojení jsou tyto dva krokové motory umístěny zrcadlově. Kvůli opačnému směru rotace musí být jeden z motorů zapojen v opačném pořadí (viz Tabulka 4).

Tabulka 4 Zapojení motorů NEMA 23

Vinutí	Pin
B-	1/4
B+	2/3
A-	3/2
A+	4/1

Zbýlé krokové motory byly zapojeny podle schéma zapojení (viz Tabulka 5).

Tabulka 5 Zapojení ostatních krokových motorů

Vinutí	Pin
B-	1
B+	2
A-	3
A+	4

Všechny drivery jsou připojeny ke zdroji napětí 12V. Drivery TB6600 mají výhodu jednoduchého nastavení funkce mikrokrokování a dodávaných proudů pro patřičný krokový motor, pomocí šesti přepínačů a tabulky na ploché straně (viz Tabulka 6 a Tabulka 7).

Tabulka 6 Nastavení mikrostepu driverů

Microstep	Pulse/rev	Sw1	Sw2	Sw3
NC	NC	ON	ON	ON
1	200	ON	ON	OFF
2/B	400	ON	OFF	ON
2/A	400	OFF	ON	ON
4	800	ON	OFF	OFF
8	1600	OFF	ON	OFF
16	3200	OFF	OFF	ON
32	6400	OFF	OFF	OFF

Tabulka 7 Nastavení proudů pro krokové motory

Current(A)	PKCurrent	Sw4	Sw5	Sw6
0,5	0,7	ON	ON	ON
1,0	1,2	ON	OFF	ON
1,5	1,7	ON	ON	OFF
2,0	2,2	ON	OFF	OFF
2,5	2,7	OFF	ON	ON
2,8	2,9	OFF	OFF	ON
3,0	3,2	OFF	ON	OFF
3,5	4,0	OFF	OFF	OFF

Všechny motory byly nastaveny na mikrostep 1/16. Proudů byly nastaveny na nejnižší pracovní hodnotu jednotlivých proudů, aby krokové motory co nejméně hřály, ale stejně byly schopné správně pracovat (viz Tabulka 8).

Tabulka 8 Nastavení parametrů driverů

typ krokového motoru	I[A]	Sw1	Sw2	Sw3	Sw4	Sw5	Sw6
NEMA 23 SM57HT112-3004A	3	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF
NEMA 17 SM42HT47-1206A	1,2	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON
NEMA 17 17HS19-1684SPG5	1,33	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON
NEMA 17 SM42HT33-1334	1,68	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF
NEMA 14 SM35HT36-1004A	1	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON

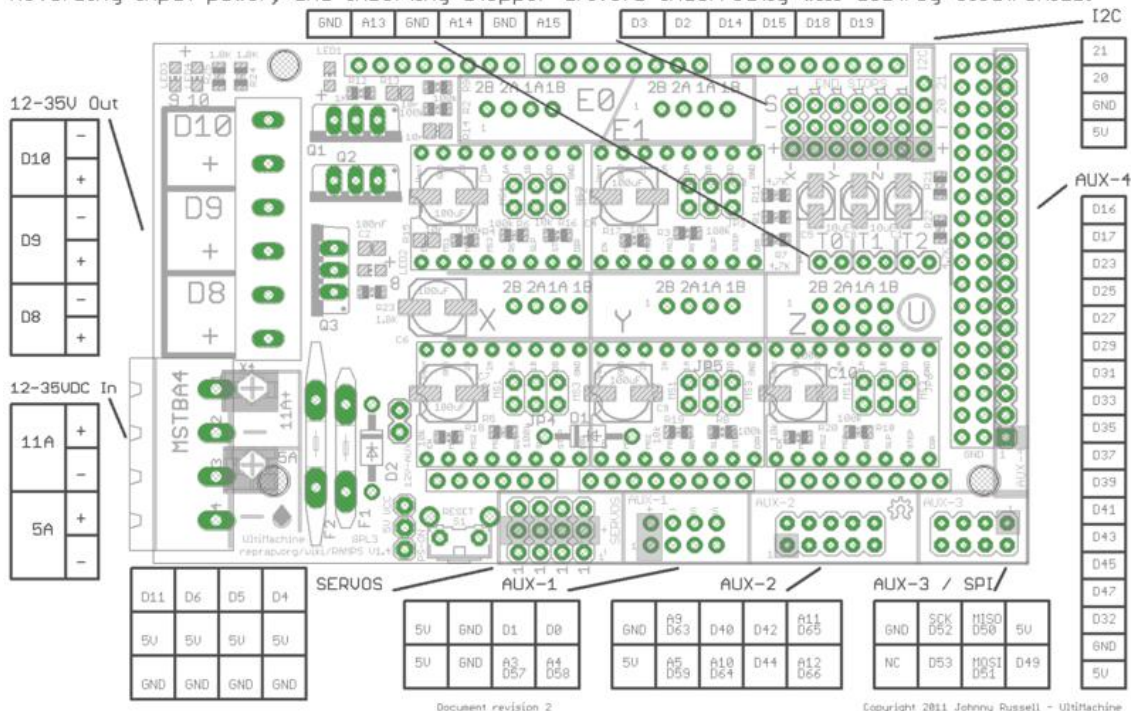
3.2.1 Shield Ramps 1.4

Shield ramps 1.4 je jedním z rozšiřujících shieldů pro desky Arduino, konkrétně Arduino Mega 2560. Plošná deska byla vyvinuta skupinou uživatelů Rep Rap. Deska šetří materiál a místo. Shield poskytuje rozhraní a funkce pro řízení 3D tiskáren. Usnadňuje ovládání motorů, snímačů, ohříváčů a dalších komponent spojených s 3D tiskárnami. RAMPS 1.4 se navzájem podporuje s firmwarem Marlin, který obsahuje nastavení právě pro tento shield.

RAMPS 1.4 poskytuje konektory a ovládací obvody pro připojení krokových motorů. Na desce jsou rozmístěny piny v sekcích X, Y, Z, E0, E1 pro pět driverů (viz Obrázek 26). Na ose Z je k dispozici 8 pinů, takže zde lze připojit dva krokové motory. Maximální počet motorů, které lze využít s RAMPS 1.4 je šest. V primárním použití 3D tiskáren se sekce E0 a E1 využívají pro krokové motory, které do extruderů dodávají materiál. Mezi piny pro připojení driverů se nachází tři dvojice pinů, které lze spojit propojkami a slouží jako nastavení mikrokrokování. Nejmenší hodnota kroku, kterou lze nastavit záleží na použití driveru, pro A4988 je to 1/16 a pro DRV8825 1/32.

Dále na desce můžeme najít piny pro připojení servomotorů, koncových snímačů, termistorů, větráků, ohřívacích prvků a LCD displeje. Na spodní části desky lze využít piny pro zapojení SD karty a modulu Bluetooth. Na desce lze nalézt také bezpečnostní prvky jako jsou pojistky a diody pro ochranu elektroniky před přepětím a k zajištění bezpečného provozu. Shield potřebuje vlastní 12V napájení. [26]

Reversing input power, and inserting stepper drivers incorrectly will destroy electronics.



Obrázek 22 shéma Shield Ramps 1.4 [26]

3.2.2 HC-05

Bluetooth modul HC-05 bývá používaný v elektronických projektech, které využívají bezdrátovou komunikaci. HC-05 je určen pro sériovou komunikaci UART. Může fungovat v režimech master nebo slave.

Klíčové vlastnosti HC-05:

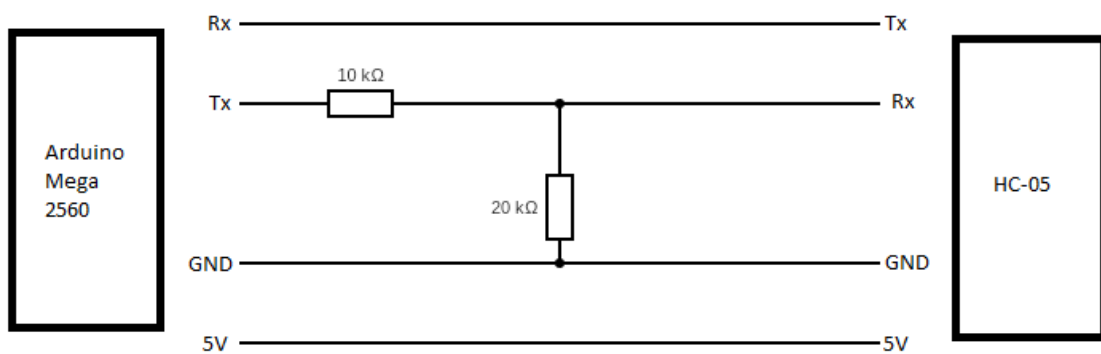
- Provozní napětí: 3,6V až 6V
- Komunikace: UART, přenosová rychlost od 1200 do 1382400 bps
- Dosah: až 10m (záleží na okolních podmínkách)
- Verze Bluetooth: V2.0+EDR
- Režimy: Master a Slave
- Podpora AT příkazů: pro konfiguraci modulů

Modul se používá v mnoha aplikacích, včetně bezdrátového ovládání robotů, komunikace mezi jinými mikrokontrolery a počítači a další. [27]

Bluetooth modul se připojuje k Arduino pomocí čtyř konektorů: Tx, Rx, GND a 5V. Rx a Tx lze připojit na určené digitální piny. K připojení velmi pomáhá Arduino knihovna SoftwareSerial.h, která umožňuje připojit Rx a Tx na větší množství digitálních pinů. Pro připojení v této práci byly připojeny na piny D50 a D51, které jsou umístěny podle schématu Shield Ramps 1.4 v pravém dolním rohu. Kolem těchto pinů se nachází

piny pro 5V a GND. Zároveň je lokace těchto pinů na kraji shieldu, to je výhodné, protože se zapojení modulu nepřekrývá se zapojením krokových motorů a lze se v něm lépe vyznat.

Při zapojování modulu je nutné dát si pozor, kam se připojuje Tx a Rx. Důvodem je opačné připojení na desce a na modulu, tedy Rx modulu je připojeno na Tx desky a Tx modulu je připojeno na Rx desky. Určení, který pin je Rx a Tx se následně definuje v Arduino IDE. Digitální piny desek Arduino pracují s napětím 5 V. To pro zapojení HC-05 není ideální, protože Rx modulu pracuje s napětím 3,3V. Proto je nutno mezi pin Arduino a modul vytvořit napěťový dělič na požadované napětí (viz Obrázek 23).



Obrázek 23 Schema zapojení HC-05

Výpočet hodnot rezistorů vychází z napěťového děliče:

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_2 + R_1}, \quad (3.6)$$

Cílem je převést napětí z 5 V na 3,3V:

$$3,3V = 5V * \frac{R_2}{R_2 + R_1}, \quad (3.7)$$

Z výše uvedeného vztahu lze vypočítat poměr mezi R1 a R2:

$$\frac{3,3V}{5V} = \frac{R_2}{R_2 + R_1}, \quad (3.8)$$

$$3,3V * (R_2 + R_1) = 5 * R_2, \quad (3.9)$$

$$3,3V * R_1 + 3,3V * R_2 = 5 * R_2, \quad (3.10)$$

$$3,3V * R_1 = 1,7 * R_2, \quad (3.11)$$

$$R_1 = \frac{1,7}{3,3} * R_2, \quad (3.12)$$

$$R_1 \approx 0,515 * R_2, \quad (3.13)$$

Pro tento napěťový dělič vychází po zaokrouhlení hodnota odporu R1 na polovinu hodnoty R2. Pro napěťový dělič byly zvoleny rezistory s hodnotami 10 kΩ a 20 kΩ. Pro ověření byly dosazeny hodnoty odporů zpět do vzorce pro výpočet napěťového děliče:

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_2 + R_1}, \quad (3.14)$$

$$V_{out} = 5 * \frac{20000}{20000 + 10000}, \quad (3.15)$$

$$V_{out} = 5 * \frac{20000}{30000}, \quad (3.16)$$

$$V_{out} = 3,33V, \quad (3.17)$$

Ověření vychází správně a rezistory s hodnotami 10 kΩ a 20 kΩ budou pro tento účel vyhovovat.

3.3 Popis vytvořeného sketchu pro správné řízení robotického ramene

První část programu deklaruje proměnné, definuje piny pro krokové motory a Bluetooth modul a importuje knihovny pro sériovou komunikaci a ovládání motorů. Většina příkazů se zde objevuje pětkrát, protože je potřeba pracovat s každým motorem. Proměnné dále budou sloužit pro ukládání dat, které Arduino bude přijímat z mobilní aplikace. Výhodou použití shield Ramps 1.4 je jednoduché definování pinů pro motory, které jsou k dané části připojeny. Z dokumentace shield Ramps 1.4 byly zjištěny potřebné piny na kterých jsou připojeny drivery (viz Obrázek 24).

```

1  #include <SoftwareSerial.h>
2  #include <AccelStepper.h>
3
4  // Definice pinů pro motory
5  const int stepPin1 = 26, dirPin1 = 28, enPin1 = 24; // motor 1
6  const int stepPin2 = 36, dirPin2 = 34, enPin2 = 30; // motor 2
7  const int stepPin3 = 60, dirPin3 = 61, enPin3 = 56; // motor 3
8  const int stepPin4 = 54, dirPin4 = 55, enPin4 = 38; // motor 4
9  const int stepPin5 = 46, dirPin5 = 48, enPin5 = 62; // motor 5
10
11  const int RX_PIN = 50, TX_PIN = 51;
12  SoftwareSerial bluetooth(RX_PIN, TX_PIN); // Arduino RX (50), TX (51) - HC-05 TX, RX

```

Obrázek 24 deklarace pinů pro připojené motory

Další blok sketche je void setup(), ten slouží k inicializaci a nastavení výchozích parametrů pro jednotlivé krokové motory a Bluetooth komunikace. Bylo zde třeba nastavit piny ENABLE na výstupní u všech motorů a následně je aktivovat (viz Obrázek 25).

```

30  void setup() {
31      // Nastavení pinů pro povolení motorů jako výstupní
32      pinMode(enPin1, OUTPUT);
33      pinMode(enPin2, OUTPUT);
34      pinMode(enPin3, OUTPUT);
35      pinMode(enPin4, OUTPUT);
36      pinMode(enPin5, OUTPUT);
37
38      // Povolení motorových driverů
39      digitalWrite(enPin1, LOW);
40      digitalWrite(enPin2, LOW);
41      digitalWrite(enPin3, LOW);
42      digitalWrite(enPin4, LOW);
43      digitalWrite(enPin5, LOW);

```

Obrázek 25 Nastavení potřebných vlastností driverů

Dále bylo důležité nastavit akceleraci a maximální rychlost pro jejich funkčnost(to lze právě pomocí knihovny AccelStepper.h). Posledním krokem ve void setup() je inicializovat Bluetooth komunikace a nastavit její baudrate. Jednotka baudrate udává počet změn signálu za 1 vteřinu (viz Obrázek 26).

```

45 // Nastavení maximální rychlosti a akcelerace pro každý motor
46 stepper1.setMaxSpeed(800); stepper1.setAcceleration(500);
47 stepper2.setMaxSpeed(800); stepper2.setAcceleration(500);
48 stepper3.setMaxSpeed(800); stepper3.setAcceleration(500);
49 stepper4.setMaxSpeed(800); stepper4.setAcceleration(500);
50 stepper5.setMaxSpeed(800); stepper5.setAcceleration(500);
51
52 // Inicializace Bluetooth komunikace s výchozí rychlostí 9600 baudů
53 Bluetooth.begin(9600);
54 Bluetooth.setTimeout(1); // Nastavení časového limitu pro čtení dat
55 }

```

Obrázek 26 Nastavení rychlosti a Bluetooth komunikace

Poslední nejdelší částí sketche je void loop(), který popisuje jak se mají veškeré motory a senzor v systému chovat. Na začátku void loop() přijímá Arduino data přes Bluetooth modul. Velkou částí tohoto bloku je obsáhlý if příkaz, který provádí pohyby motorů a ukládá pozice motorů podle dat získaných z mobilní aplikace. Může dostávat data stepX + číslo, kde x nabývá hodnoty 1 až 5 a určuje, který z pěti motorů se má hýbat. Číslo na konci značí, kolik kroků má daný motor udělat pro svůj pohyb. Následně se motor otočí do nově určené pozice. Díky knihovně AccelStepper.h dokáže Arduino rozeznat v jaké pozici je, a proto je jeho pohyb relativní. Pohyb určuje příkaz moveTo(). Na příklad, když je z mobilní aplikace poslána hodnota 80, motor udělá posun o 80 kroků, protože jeho počáteční hodnota je vždy 0. Při dalším poslání hodnoty z aplikace, např. 60, Arduino pozná v jaké je pozici vzhledem k nové hodnotě a v tomto případě se o 20 kroků vrátí (viz Obrázek 27).

```

76 void handleCommand(String dataIn) {
77 // Zpracování příkazů pro pohyb motorů
78 if (dataIn.startsWith("step1")) {
79 int steps = dataIn.substring(5).toInt(); // Extrakce počtu kroků z příkazu
80 stepper1.moveTo(steps); // Pohyb motoru 1 na zadanou pozici
81 runFlag = false;
82
83 } else if (dataIn.startsWith("step2")) {
84 int steps = dataIn.substring(5).toInt();
85 stepper2.moveTo(steps);
86 runFlag = false;

```

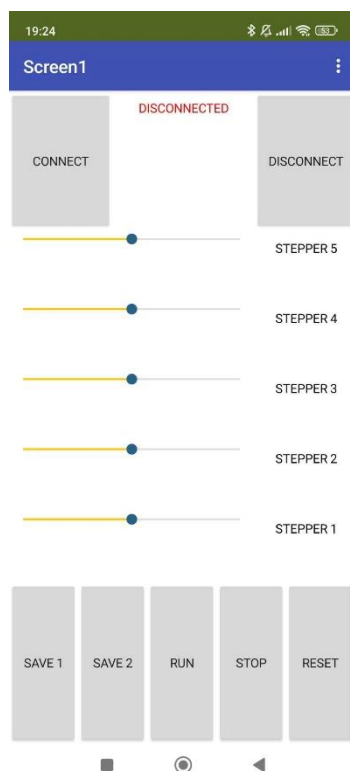
Obrázek 27 Příkazy k pohybům motorů

Další data, se kterými dokáže Arduino pracovat jsou čistě textové zprávy: save1, save2, run, stop a restart. Při přijetí save1 a save2 si Arduino do svých proměnných uloží současnou pozici motorů a čeká na signál run, ve kterém opakovaně přechází z pozice hodnot uložených v save1 do pozice hodnot v save2. Tento proces se opakuje, dokud aplikace nepošle žádný jakýkoli jiný signál. Pokud je potřeba robotické rameno při

pohybu zastavit, slouží k tomu signál *stop* a robotické rameno se zastaví. Poslední možností je *restart*. V tomto případě se vymažou všechny uložené pozice a rameno se vrátí do pozice ze které bylo spuštěno. Na konci jsou příkazy `stepper.run()`, které jsou potřeba k pohybu ramene.

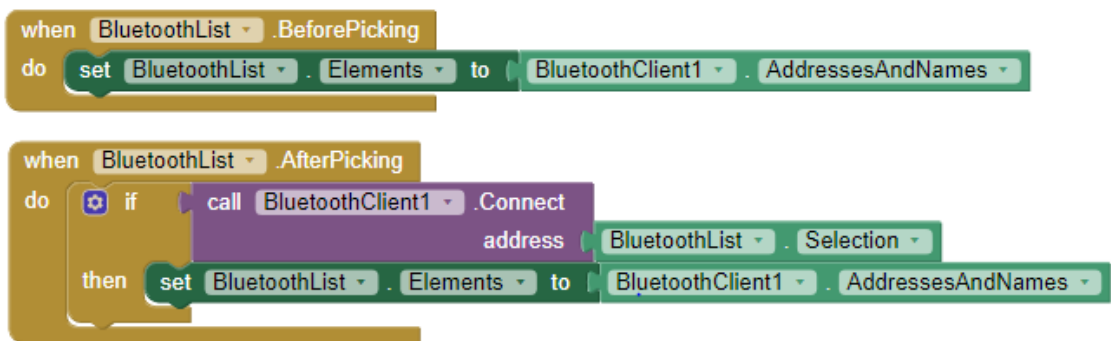
3.4 Popis fungování mobilní aplikace

Aplikace byla vytvořena ve webové platformě MIT App Inventor. Je složena z jejich základních prvků jako jsou tlačítka, textové bloky, posuvníky a ListPicker. Prvky jsou rozloženy po obrazovce, aby bylo ovládání jednoduché a intuitivní. Do aplikace byly přidány prvky Clock a BluetoothClient, které jsou neviditelné na obrazovce, ale pro správnou funkci nezbytné.



Obrázek 28 Prostředí vytvořené aplikace

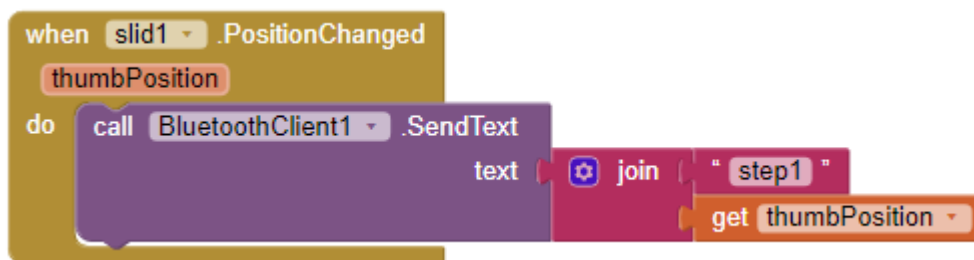
V horní části aplikace se nachází ListPicker s názvem CONNECT a tlačítko DISCONNECT. ListPicker funguje jako tlačítko, akorát po jeho stisknutí se objeví nové okno pro další používání. V případě této aplikace slouží ListPicker pro výběr Bluetooth zařízení, se kterým se má telefon spárovat (viz Obrázek 28).



Obrázek 29 Bloky pro spárování aplikace s Arduinem

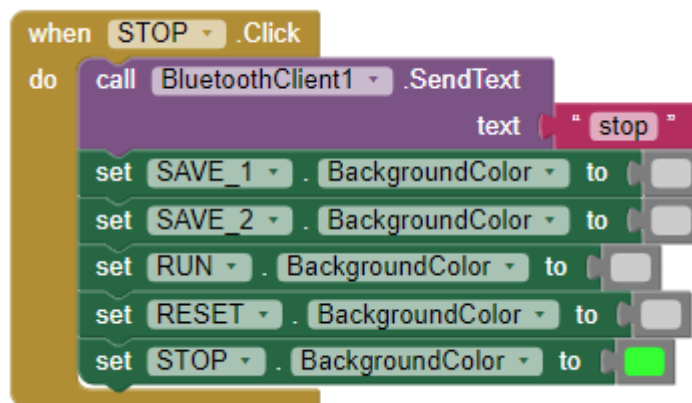
Na obrázku jsou vytvořené bloky pro spárování aplikace s Bluetooth zařízením, pomocí kterých aplikace vyhledá spárovatelné zařízení a po stisknutí ListPickeru se objeví okno, kde jsou vypsané jejich adresy (viz Obrázek 29).

Ve střední části aplikace se nachází pět posuvníků, které jsou v pravé straně popsány. Jsou nad sebou seřazeny tak, jak jsou krokové motory umístěny v robotickém rameni. Posuvník s názvem STEPPER 1 bude posílat signály pro motor umístěný v základně robotického ramene a stejnou logikou bude STEPPER 5 posílat signály pro ovládání motoru na konci ramene. Při posunutí posuvníku se odešle hodnota přímo úměrná počtu kroků motoru (viz Obrázek 30).



Obrázek 30 Blok pro odesílání dat z posuvníků

V poslední spodní části aplikace je umístěno pět tlačítek: SAVE1, SAVE2, RUN, STOP a RESET. Při stlačení tlačítka aplikace pošle stejnojmenný text pro Arduino, který s ním dále pracuje. Stisknuté tlačítko zezelená a změní barvu všech ostatních na šedou. Takto mění barvy vždy poslední stisknuté tlačítko, aby byl znát poslední krok (viz Obrázek 31).



Obrázek 31 Ukázka bloku s příkazem STOP

4. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvořit robotické rameno BCN3D-Moveo určené pro výukové účely v předmětu BPC-UIP. To zahrnovalo robotické rameno postavit, zapojit a navrhnout k němu vlastní řídicí systém. V rámci tohoto projektu se podařilo realizovat všechny plánované kroky od montáže hardware, přes vývoj řídicího systému, až po implementaci a testování řídicí aplikace.

Hlavními výsledky práce je funkční robotické rameno BCN3D-Moveo, které je ovládáno pomocí aplikace v mobilním zařízení. Tato aplikace umožňuje snadné intuitivní ovládání ramene, což je zlepšením oproti původnímu stavu s firmware Marlin. Funkčnost ramene byla úspěšně ověřena, rameno dokáže opakovat předdefinovaný pohyb z bodu A do bodu B.

Během testování se objevily dva hlavní nedostatky. Prvním nedostatkem je přehřívání krokových motorů při delším provozu. To by mohlo vést k poškození motorů, ale i konstrukce. Teploty byly po prvních testech sníženy mikro krokováním, ale problém je potřeba řešit dále. Druhým nedostatkem je omezená přesnost a plynulost trajektorie pohybu ramene, což by mohlo být způsobeno jak hardwarem, tak i nastavením řídicího softwaru.

V budoucnosti by bylo vhodné se zaměřit na optimalizaci chlazení. Další oblastí výzkumu by mohlo být zlepšení algoritmů pro řízení pohybu. Dále tato práce nezahrnuje žádné zpětné vazby systémů pro kontrolu rychlostí a poloh jednotlivých segmentů ramene.

Tato práce ukázala, že je možné využít alternativní přístupy k řízení robotických systémů, což může přinést nová řešení pro vývoj robotických aplikací.

LITERATURA

- [1] MISITI, Alex. A History of Industrial Robots. *Wewolver* [online]. wewolver, 2020 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.wewolver.com/article/a-history-of-industrial-robots>
- [2] History. *Kawasaki Robotics* [online]. Japan: Kawasaki Robotics, 2018 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: https://robotics.kawasaki.com/en1/anniversary/history/history_01.html
- [3] Servo Drives for Cobots. *A M C* [online]. Camarillo: A M C, 2020 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.a-m-c.com/servo-drives-cobots-top-benefits/>
- [4] *How 6 axis industrial robots work*. Online. Mechatronic. 2021. Dostupné z: https://www.mechatronic.me/2021/02/how-6-axis-industrial-robots-work.html?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAAR3s00W-yqg5-T7LK_S-X_shNKtHvyWPNKqRk0CHMwA6gtG4n3_kZ6N8-04_aem_AcbnMTlyhe6qlpNvIEDA3jRv0y10kBv_Oi2jrWB1zhULHr1TgrN7sAkxflmdjI_K8BCZ28J_RLDt1vOp97cUBvI. [cit. 2024-05-27].
- [5] Krokový motor: druhy a příklady aplikací krokových motorů. *DPS AZ* [online]. Liberec: CLIQUO & Binteractive, 2021 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/soucastky/id:75946/krokovy-motor-druhy-a-priklady-aplikaci-krokovych-motoru>
- [6] Bezkartáčový motor: konstrukce, provoz a silné stránky. *TME* [online]. Ostrava: TME, 2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/44880/bezkartacovy-motor-konstrukce-provoz-a-silne-stranky/>
- [7] Krokové motory. *RS* [online]. Varšava: RS [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://cz.rs-online.com/web/p/krokovy-motory/5350401>
- [8] Krokové motory. *ELUC* [online]. Olomouc, 2015 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/809>
- [9] FAQ: často pokládané otázky o krokových motorech. *Servo drive* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: https://www.servo-drive.cz/%C4%8Dasto_pokl%C3%A1dan%C3%A9_ot%C3%A1zky_o_krokov%C3%BDch_motorech.php#Co%20je%20to%20krokov%C3%BD%20motor%20a%20jak%20funguje%20?
- [10] Krokové motory 1: typy motorů. *RoboDoupě* [online]. RoboDoupě, 2013 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2013/krokovy-motory-1-typy-motoru/>
- [11] KHAN, Zak. FAQ: What are stepper drives and how do they work?. *Motioncontroltips* [online]. motioncontroltips, 2015 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-stepper-drives-and-how-do-they-work/>

- [12] COLLINS, Danielle. FAQ: What is microstepping?. *Linearmotiontips* [online]. linearmotiontips, 2017 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/microstepping-basics/>
- [13] *Servo motor*. Online. Navody.drateg.cz. Dostupné z: <https://navody.drateg.cz/arduino-projekty/servo-motor.html>. [cit. 2024-05-27].
- [14] What is an Arduino?. *Sparkfun* [online]. Colorado: sparkfun, 2013 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-an-arduino/all>
- [15] KHILLAR, Sagar. Difference Between Arduino and 8051 Microcontroller. *Differencebetween.net* [online]. differencebetween, 2019 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <http://www.differencebetween.net/technology/difference-between-arduino-and-8051-microcontroller/>
- [16] VODA, Zbyšek. Arduino IDE. *Bastlárna HWkitchen* [online]. Ostrava: HWkitchen, 2017 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://bastlirna.hwkitchen.cz/arduino-ide/>
- [17] *LaskaKit* [online]. Rychnov nad Kněžnou: LaskaKit [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-uno-r3--atmega328p--klon/>
- [18] When Was 3D Printing Invented? The History of 3D Printing. *BCN3D* [online]. Barcelona: BCN3D, 2020 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [19] VYUŽITÍ 3D TISKU. *PREAMO* [online]. Staré Město: PREMO, c2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.premocz.eu/vyuziti-3d-tisku>
- [20] Cad. *Ptc* [online]. ptc, c2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.ptc.com/en/technologies/cad>
- [21] O nás. *Prusa3d* [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/o-nas_77/
- [22] BCN3D-Moveo. Github [online]. 2016 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://github.com/BCN3D/BCN3D-Moveo>
- [23] *What is Marlin?* Online. Marlinfw. Dostupné z: <https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>. [cit. 2024-05-27].
- [24] *About us*. Online. MIT App Inventor. 2012. Dostupné z: <https://appinventor.mit.edu/about-us>. [cit. 2024-05-27].
- [25] *Ramps 1.4 shield*. Online. IC master. 2008. Dostupné z: <https://icmasteronline.com/product/ramps-1-4-shield/>. [cit. 2024-05-27].
- [26] *Ramps 1.4*. Online. RepRap. 2022. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4. [cit. 2024-05-27].
- [27] *Bluetooth modul HC-05*. Online. Láska kit. 2024. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/bluetooth-modul-hc-05-ttl/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw3tCyBhDBARIsAEY0XNltpTODht5yM1XQzNefDB6h4mLitD3TZebuiu-I5ZQHx2TD7HC5x7AaAqY0EALw_wcB. [cit. 2024-05-27].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

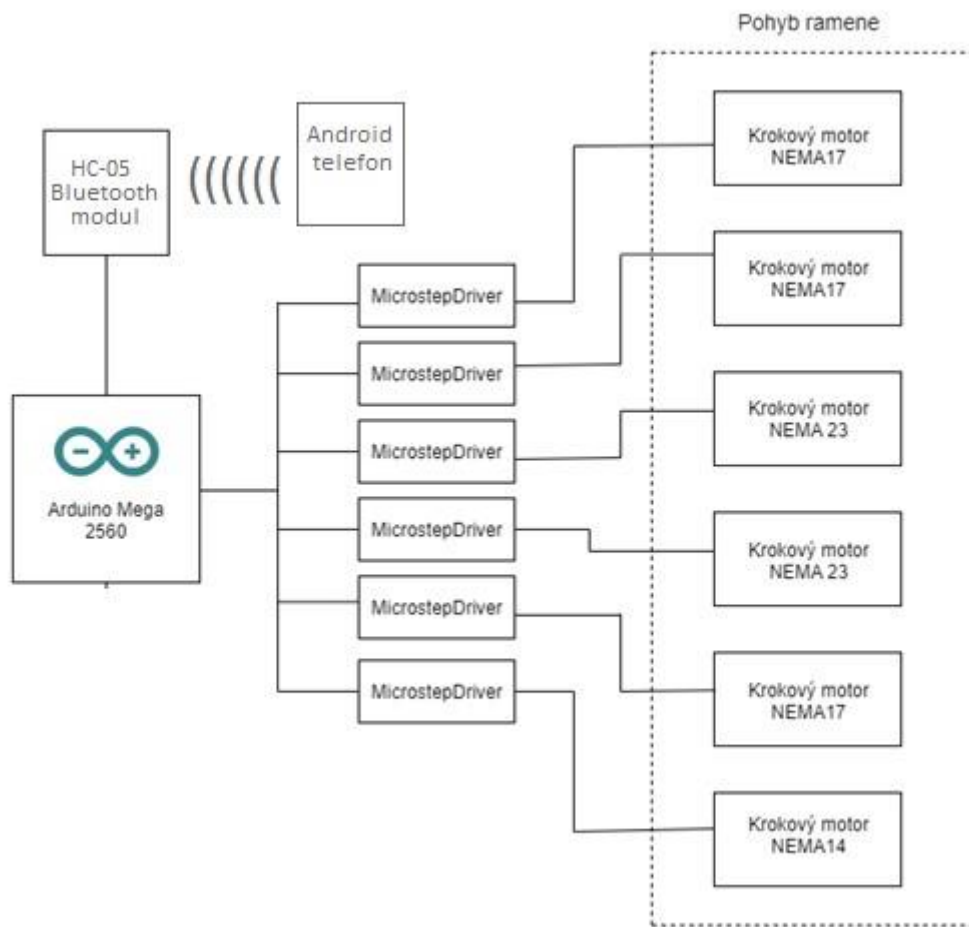
Symboly:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)
R	odpor	(Ω)
α	úhlový posun	(rad, °)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - BLOKOVÉ SCHÉMA	50
----------------------------------	----

Příloha A - Blokové schéma



SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH

Příloha 1: Arduino Sketch

Příloha 2: Aplikace vytvořená v MIT App Inventor

Příloha 3: Video demonstrující funkčnost ramene

Příloha 4: Foto robotického ramene