

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ROBOTICKÁ RUKA

ROBOTIC HAND

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Pizúr

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**
Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Lukáš Pizúr

ID: 173726

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Robotická ruka

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte konstrukci vzdáleně ovládané robotické ruky. Robotickou ruku navrhněte tak, aby ji bylo možné ovládat vzdáleně pomocí vhodného softwarového a hardwarového vybavení. Robotickou ruku vybavte snímači a kamerou pro snazší ovládání. Navržené zařízení realizujte, vytvořte ovládací software a ověřte jeho funkčnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4. 2. 2019

Termín odevzdání: 21. 5. 2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Cílem této práce je návrh robotické ruky, která bude ovládána pomocí bezdrátové technologie Wi-Fi, bude vybavena kamerou a pro snadnější ovládání bude navržena ovládací rukavice. První část práce je teoretický rozbor, jsou popsány různé varianty snímačů, které lze využít pro snímání pohybů, jednotlivé pohonné jednotky a jejich řízení. Další kapitoly jsou zaměřeny na použité elektronické moduly a mikrokontroléry. Druhá část je praktická a je věnována mechanickému návrhu robotické ruky s pěti prsty a jejímu upevnění na robotické rameno. Popsána je také navržená řídicí elektronika celé robotické ruky a naprogramovaný firmware. Dále je popsán návrh a realizace ovládací rukavice. V poslední kapitole je popsána naprogramovaná aplikace pro operační systém Android.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akcelerometr, ARM, ATmega, gyroskop, hydraulické systémy, kamera, robotická ruka, servomotor, senzory ohybu, Wi-Fi

ABSTRACT

The aim of this work is to design a robotic hand, which will be controlled by wireless Wi-Fi, will be equipped with a camera and for easier operation will be designed control glove. The first part of the thesis is a theoretical analysis, various variants of sensors are described, which can be used for motion detection, each drive units and their control. Next chapters are focused on used electronic modules and microcontrollers. The second part is practical and is focused on the mechanical design of a five-finger robotic hand and fixing to a robotic arm. Also described is the control electronics of the entire robotic hand and the programmed firmware. Next, the design and implementation of the control glove is described. The last chapter describes the programmed application for the Android operating system.

KEYWORDS

Accelerometer, ARM, ATmega, camera, flex sensor, gyroscope, hydraulic systems, robotic hand, robotic arm, servomotor, Wi-Fi

PIZÚR, Lukáš. *Robotická ruka*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119424>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Pavel Šteffan.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma **robotická ruka** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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: 21. května 2019

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

Dále bych chtěl poděkovat svému otci Karlovi Pizúrovi za značnou pomoc při výrobě mechanických dílů robotické ruky.

V Brně dne 21. května 2019

.....

podpis autora

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072
Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
ÚVOD	12
1 TEORETICKÁ ČÁST	13
1.1 Snímače robotické ruky	13
1.1.1 Mechanický dorazový snímač a odporový snímač polohy	13
1.1.2 Indukční a kapacitní dorazové snímače	14
1.1.3 Snímače polohy pístů	14
1.1.4 Optické reflexní snímače a rotační enkodéry	16
1.2 Snímače ovládací rukavice	17
1.2.1 Gyroskop a akcelerometr	17
1.2.2 Senzor ohybu	19
1.3 Pohony	20
1.3.1 Modelářský servomotor	20
1.3.2 Krokový motor	22
1.3.3 Hydraulický systém	23
1.4 Možnosti výroby mechanických částí	25
1.4.1 Výroba dílů na 3D tiskárně	25
1.4.2 Plasmové a laserové řezání	26
1.5 Řídicí mikrokontroléry	28
Mikrokontrolér ATmega328P	28
1.5.1 Mikrokontrolér STM32F303CCT6	28
1.6 Bezdrátová komunikace	29
1.7 Kamera	31
2 PRAKTICKÁ ČÁST	32
2.1 Návrh mechanické konstrukce	32
2.1.1 Návrh ruky a jednotlivých prstů	38
2.2 Návrh řídicí desky robotické ruky	42
2.2.1 Napájecí část řídicí desky	43
2.2.2 Ovládání servomotorů mikrokontrolérem ATmega328P	46
2.2.3 Řízení krokových motorů	46

2.2.4	Regulátor hydraulického čerpadla	47
2.2.5	Zapojení Wi-Fi modulu a kamery	49
2.2.6	Zapojení mikrokontroléru STM32F303CCT6	50
2.3	Firmware řídicí desky robotické ruky	51
2.3.1	Možnosti nahrávání firmware do mikrokontrolérů	51
2.3.2	Firmware Wi-Fi modulu	52
2.3.3	Firmware mikrokontroléru servomotorů ATmega328P	53
2.3.4	Firmware hlavního mikrokontroléru STM32F303CCT6	55
2.4	Návrh ovládací rukavice	59
2.4.1	Realizace snímače ohybu	59
2.4.2	Řídicí deska ovládací rukavice	60
2.4.3	Firmware řídicí desky ovládací rukavice	62
2.5	Návrh řídicího softwaru	63
2.5.1	Aplikace pro operační systém Android	63
2.5.2	Aplikace pro debugování	65
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	68
	SEZNAM PŘÍLOH	70

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Koncový spínač používaný v průmyslu [1].....	13
Obr. 2: Mikrospínač	13
Obr. 3: Precizní potenciometr [1]	13
Obr. 4: Příklad indukčních a kapacitních snímačů používaných v průmyslu	14
Obr. 5: Reedův magnetický senzor přiblížení	15
Obr. 6: Princip Hallova jevu.....	15
Obr. 7: Pololu 38 kHz IR Proximity Sensor [6]	16
Obr. 8: Princip rotačního optického enkodéru [7].....	17
Obr. 9: Princip kapacitního akcelerometru [9].....	18
Obr. 10: Působení Coriolisovy síly na mechanický gyroskop [10]	18
Obr. 11: Realizace gyroskopu v technologii MEMS [10]	19
Obr. 12: MPU-6050 [11]	19
Obr. 13: Uspořádání odporového senzoru ohybu [13]	19
Obr. 14: Flex sensor Spectra Symbol 2,2" [14].....	20
Obr. 15: Blokové schéma řídicí elektroniky servomotoru [15]	21
Obr. 16: Závislost natočení servomotoru na šířce řídicího impulsu	21
Obr. 17: Principiální konstrukce dvoufázového krokového motoru [19].....	22
Obr. 18: Pololu A4988	23
Obr. 19: Principiální schéma jednočinného a dvojčinného hydraulického válce	24
Obr. 20: Zubové čerpadlo od firmy MAGOM HRC	24
Obr. 21: Šesti sekční rozvaděč od firmy MAGOM HRC	25
Obr. 22: 3D tiskárna Anet A6.....	26
Obr. 23: Domácí CNC plazmová řezačka	27
Obr. 24: Bluetooth modul HC-05 [28].....	29
Obr. 25: Modul ESP8266	30
Obr. 26: Modul ArduCam Mini s OV5642 [32].....	31
Obr. 27: Blokové schéma kamery Arducam Mini s OV5642 [32].....	31
Obr. 28: Konstrukce robotické ruky navrhnutá v programu SolidWorks	32
Obr. 29: Realizovaná konstrukce celé robotické ruky	32
Obr. 30: Tělo robotické ruky	33
Obr. 31: Připevnění těla ke stojanu a ozubený převod	33

Obr. 32: Připevnění ramene k tělu a detail ramenního senzoru	34
Obr. 33: Upevnění předloktí, detaily kloubu a spojení dvou částí předloktí	35
Obr. 34: Umístění planetové převodovky v předloktí	36
Obr. 35: Navržená dvojitá planetová převodovka	36
Obr. 36: Dvojitá planetová převodovka vytisknutá na 3D tiskárně	36
Obr. 37: Návrh upevnění a snímání polohy zápěstí	37
Obr. 38: Pohyb prstu pomocí vhodné sestavy pák (ExoHand) [33]	38
Obr. 39: Návrh jednoho prstu složeného ze tří článků	39
Obr. 40: Návrh dlaně a prstů v programu SolidWorks (pohled shora)	39
Obr. 41: Realizovaná dlaň a prsty	39
Obr. 42: Návrh dlaně a prstů v programu SolidWorks (pohled zespod)	39
Obr. 43: Realizovaná dlaň a prsty	39
Obr. 44: Blok hydraulických válců pro ovládání prstů	40
Obr. 45: Hydraulický válec ovládající články palce	41
Obr. 46: Hydraulický válec pohybující palcem	41
Obr. 47: Blokové schéma elektroniky robotické ruky	42
Obr. 48: Vyrobená řídicí deska robotické ruky	42
Obr. 49: Blokové schéma zdrojové části	43
Obr. 50: Zapojení DC-DC měniče s obvodem TPS54531	44
Obr. 51: Zapojení lineárních stabilizátorů napětí	45
Obr. 52: Osazení miniaturního spínaného zdroje	45
Obr. 53: Zapojení mikrokontroléru ATmega328P	46
Obr. 54: Zapojení jednoho z driverů krokových motorů	47
Obr. 55: Zapojení regulátoru hydraulického čerpadla	48
Obr. 56: Zapojení Wi-Fi modulu a kamery	49
Obr. 57: Zapojení mikrokontroléru STM32F303CCT6	50
Obr. 58: Vývojový diagram hlavní programové smyčky Wi-Fi modulu	52
Obr. 59: Vývojový diagram hlavní programové smyčky mikrokontroléru servomotorů	54
Obr. 60: Vývojový diagram generování řídicích impulsů pro servomotory	55
Obr. 61: Příklad komunikačního rámce pro dvoubajtový příkaz	57
Obr. 62: Příklad komunikačního rámce pro dvoubajtový příkaz	58
Obr. 63: Realizovaná ovládací rukavice	59

Obr. 64: Vyrobený senzor ohybu	60
Obr. 65: Blokové schéma řídicí desky ovládací rukavice	61
Obr. 66: Zhotovená řídicí deska ovládací rukavice	61
Obr. 67: Vývojový diagram hlavní programové smyčky ovládací rukavice	62
Obr. 68: Struktura rámce posílaného ovládací rukavicí	63
Obr. 69: Ovládací aplikace pro Android – výchozí okno	64
Obr. 70: Ovládací aplikace pro Android – okno po připojení ovládací rukavice	64
Obr. 71: Program pro kalibraci robotické ruky	65

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Parametry modulu Pololu IR Proximity Sensor [6]	16
Tab. 2: Parametry integrovaného obvodu MPU-6050 [11]	19
Tab. 3: Parametry flex sensoru Spectra Symbol 2,2" [14]	20
Tab. 4: Parametry servomotoru EMAX ES08MD [16]	21
Tab. 5: Posloupnost bučích signálů pro krokový motor	23
Tab. 6: Parametry modulu Polu A4988 [20]	23
Tab. 7: Základní tiskové parametry 3D tiskárny Anet A6	26
Tab. 8: Parametry mikrokontroléru ATmega328P [25]	28
Tab. 9: Parametry mikrokontroléru STM32F303CCT6 [26]	28
Tab. 10: Parametry obvodu HC-05 [28]	29
Tab. 11: Parametry obvodu ESP8266 [31]	30
Tab. 12: Parametry modulu Arducam Mini s OV5642 senzorem [32]	31
Tab. 13: Příkazy hlavního mikrokontroléru – dvoubajtové	57
Tab. 14: Příkazy hlavního mikrokontroléru – čtyřbajtové	58

ÚVOD

Robotika je v dnešní době rychle se rozvíjející obor a nachází široké uplatnění v mnoha odvětvích. Je například nedílnou součástí automatizace v průmyslové výrobě, kde je snaha nahradit lidskou práci stroji a zrychlit tak výrobní proces. Zde se vyskytuje mnoho různých robotů od velkých robotických ramen, která umožňují manipulaci s předměty, sestavování a svařování konstrukcí, až po jednodušší CNC stroje (řezací plasmu, obráběcí stroje atd.). Náročnější aplikace robotiky lze nalézt ve zdravotnictví, například robot, který umožňuje provádět operace na dálku a který je nezbytný pro složitější zákroky, které by bez něj chirurg nezvládl. Vojenská a vesmírná technika je dalším odvětvím, kde lze robotiku nalézt, ovšem zde se vyskytují spíše pohybliví se roboti, kteří umožňují průzkum terénu či různé špionáže. V těchto náročnějších aplikacích je kladen velký důraz na spolehlivost, přesnost a schopnost práce robota v obtížnějším prostředí, terénu.

Pohybliví roboty můžeme například rozdělit podle typu podvozku nebo systému, který jim umožňuje pohyb. Každý pohybový aparát má své výhody i nevýhody a je nutné vybírat vhodný typ podle terénu, do kterého bude robot nasazen. Například robot pohyblivý se pomocí kol bude rychlejší, méně náročný na řízení a výrobu. Robotické manipulátory a ramena mají rozdílný pohybový aparát. K rozpohybování velkého ramene, které představuje páku, je mnohdy potřeba velká síla. Pro tento typ pohybu jsou používány motory s převodovkou, velké servomotory, lineární pohony (například mechanické – šroub, matice nebo hydraulické). Každý z těchto pohonů má samozřejmě svoje výhody i nevýhody, se kterými je nutné při návrhu konstrukce počítat.

Dále je nutné každého robota vybavit různými snímači, jak pro zjištění aktuální polohy ramene, natočení, tak i pro analýzu okolních vlivů. Robot, který se má v terénu pohybovat sám, musí být vybaven detektory překážek. Robot, který manipuluje s předměty musí znát aktuální polohu, natočení, rychlost svého ramene. K těmto účelům slouží řada senzorů a snímačů, které budou probrány v příslušných kapitolách.

Tato práce se zabývá robotickou rukou, kterou bude možné ovládat bezdrátově, nebo bude schopna provádět naprogramované pohyby autonomně. Pro jednoduché manuální ovládání bude navržena ovládací rukavice s několika senzory. Robotická ruka bude vybavena kamerou, která umožní vzdálené ovládání bez fyzické přítomnosti operátora.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Tato část se zabývá výběrem vhodných řešení při návrhu robotické ruky. První část se věnuje snímačům, které mohou být využity jako zpětná vazba pro řídicí obvody při pohybu robotické ruky. Dále jsou popsány snímače, které jsou použity pro ovládací rukavici. Další kapitola se věnuje akčním členům a hydraulickým systémům, které mohou být při návrhu robotické ruky použity. Následují kapitoly řeší výrobní procesy, které budou použity při výrobě mechanické konstrukce robotické ruky. Tato část je zakončena výběrem vhodných mikrokontrolérů, objasněním použitých bezdrátových technologií a výběrem vhodné kamery.

1.1 Snímače robotické ruky

Každé vykonané natočení, naklonění, otočení pohonným systémem je potřeba ověřit, zda se opravdu fyzicky vykonalo, a k tomu je potřeba zavést do systému zpětnou vazbu. Je nezbytné převést výsledný mechanický pohyb na elektrický signál, který může vyhodnotit řídicí elektronika. K tomuto účelu jsou využívány různé snímače. Některé z nich umí určit přesnou polohu (například pístu), jiné slouží pouze jako dorazové snímače. Dále to mohou být snímače dotykové (například spínač, potenciometr) a bezdotykové (indukční, optické).

1.1.1 Mechanický dorazový snímač a odporový snímač polohy

Mechanický dorazový snímač musí mít fyzický kontakt s objektem. Výhodou je jednoduchá realizace a řízení. Nevýhodou může být menší přesnost a nutnost fyzického kontaktu s objektem dříve, než je detekován, a není možné měřit vzdálenost objektu. Na obrázku č. 1 je uveden mechanický koncový snímač, který je používán v průmyslovém odvětví. Mikrospínač uvedený na obrázku č. 2 by v návrhu robotické ruky, mohl být použit jako bezpečnostní koncový spínač a v případě jeho sepnutí by došlo k zastavení vykonávaného pohybu a tím i k zabránění možného mechanického poškození konstrukce.



Obr. 1: Koncový spínač používaný v průmyslu [1]



Obr. 2: Mikrospínač



Obr. 3: Precizní potenciometr [1]

Odporový snímač polohy lze použít pro měření délkového posunutí nebo úhlového natočení. Odporový snímač spojitý je vlastně proměnlivý rezistor a měřená poloha se nastavuje polohou jezdc (například potenciometr uveden na obrázku č. 3). Jezdec potenciometru je pevně spojen například s hřídelí motoru, jehož polohu odměřujeme. Výhodou těchto snímačů je jednoduchá realizace, řízení a vyhodnocování. Ovšem nevýhodou může být životnost a tepelná stabilita.

1.1.2 Indukční a kapacitní dorazové snímače

Indukční a kapacitní snímače umožňují bezkontaktně detekovat přiblížení předmětů na vzdálenosti od desetin mm po jednotky mm. Tyto snímače jsou určeny pouze k detekci předmětu nebo dorazu, nedokáží měřit vzdálenost od objektu. Indukční snímače jsou omezeny pouze na detekci elektricky vodivých materiálů na rozdíl od kapacitních snímačů, které reagují i na nevodivé materiály. Tyto snímače jsou oproti odporovým složitěji realizovatelné, neboť musí obsahovat oscilátor, vyhodnocovací obvod a koncový stupeň. Při práci s těmito snímači je nutné znát materiál detekovaného objektu, protože každý druh materiálu má tzv. redukční činitel a snímač může na objekt reagovat v rozdílné vzdálenosti. [2] [3]

Výhodou oproti odporovým mechanickým snímačům je jejich menší opotřebení při provozu. Nedochozí u nich k mechanickému spínání plošek kontaktů spínačů nebo pohybu jezdce po odporové dráze. Nevýhodou je potřeba napájení snímače a vyšší cena. V návrhu robotické ruky by bylo možné je použít místo mechanického dorazového spínače (mikrospínače).



Obr. 4: Příklad indukčních a kapacitních snímačů používaných v průmyslu

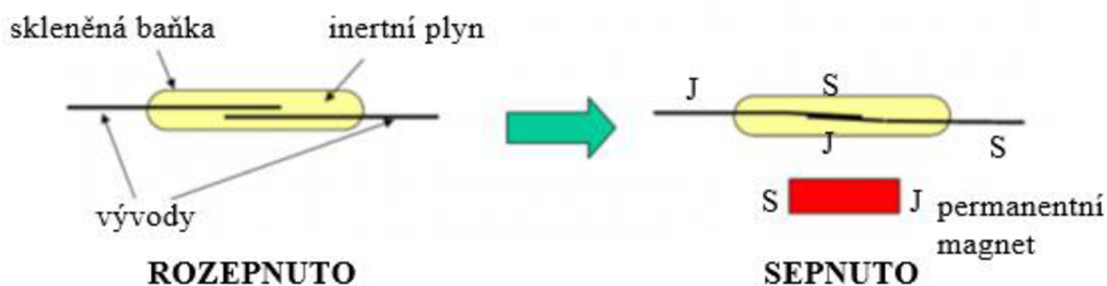
1.1.3 Snímače polohy pístů

Pro detekci polohy pístů v pneumatických válcích (nejčastěji polohy plného vysunutí a zasunutí) v automatických průmyslových systémech, se obvykle používají magnetické senzory. Většinou jsou použity dva senzory na jednom válci. Jeden sensor indikuje zasunutí pístu a druhý jeho plné vysunutí. Nevýhodou této konfigurace je to, že řídicí kontrolér nedokáže určit přesnou polohu pístu, dokáže určit pouze výše zmíněné dorazy.

Reedův magnetický senzor přiblížení

Jedná se o nejjednodušší provedení magnetického senzoru, které lze využít v jednoduchých aplikacích. Byl vynalezený ve společnosti Bell Telephone Laboratories panem W. B. Ellwoodem v roce 1936.

Skládá se ze dvou feromagnetických jazýčků, které jsou uloženy ve skleněné baňce s inertním plynem. Tyto kontakty jsou citlivé na vlivy magnetických polí, které mohou být vytvářeny permanentním magnetem, cívkou nebo procházejícím elektrickým proudem. Elektrická indukce od přiloženého magnetického pole vytváří na jazýčkách opačnou magnetickou polaritu a jazýčky přitáhne, což vytvoří elektricky vodivé spojení obou kontaktů. Po odstranění magnetického pole se jazýčky vrátí do své výchozí rozpojené pozice, tedy rozepnutí kontaktů. Grafické znázornění funkce senzoru je uvedeno na obrázku č. 5.



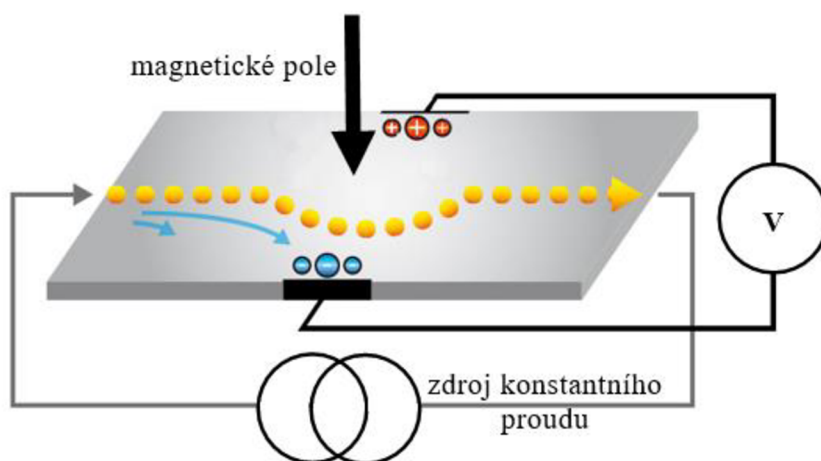
Obr. 5: Reedův magnetický senzor přiblížení

Povrch kontaktů je potažen kvalitním materiálem (zlato, rhodium, wolfram), který podle zvoleného povlaku umožňuje napájení nízkonapěťových obvodů nebo vedení silně indukční zátěže. Tak lze spínat napětí v rozsahu 10~30 V DC nebo 20~240V AC. A právě možnost přímého spínání i napětí až 250 VAC při celkových rozměrech senzoru jen několik milimetrů je hlavní praktická výhoda jejich použití v průmyslu. [4]

Tento typ senzoru vyniká svou jednoduchostí a cenou, ovšem může fungovat pouze jako detektor dorazů pístu ve válci. Následující typ senzoru řeší problémy s neznámou polohou pístu.

Lineární senzor pro měření polohy pístu pneumatických válců

Tento typ senzoru je založen na Hallova principu (obrázek č. 6), což poskytuje výstupní signál přímo úměrný poloze pístu pneumatického válce. Princip Hallova jevu spočívá v tom, že příčné magnetické pole působí na polovodič, jímž prochází elektrický proud. Magnetická indukce je vytvořena pomocí permanentních magnetů umístěných na pístu. Magnetické pole vychyluje elektrony pohybující se vodičem z přímé dráhy a způsobuje jejich nerovnoměrné rozdělení napříč vodičem. To má za následek vznik měřitelného napětí na stranách polovodiče.



Obr. 6: Princip Hallova jevu

Lineární senzor pro měření polohy pístu umožňuje měřit i aktuální polohu pístu ve válci na rozdíl od Reedova senzoru přiblížení. Další výhodou je, že oproti skokově spínaným magnetickým sensorům, umožňuje měřit správný dojezd pístu do koncové polohy a tím plynuleji sladit chod s dalšími funkcemi / pohyby stroje. Dále dokáže zaznamenat pokles tlaku (např. netěsnost pístu). [5]

1.1.4 Optické reflexní snímače a rotační enkodéry

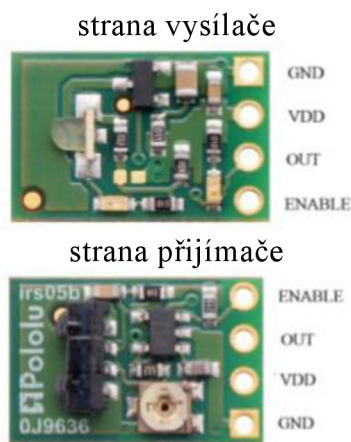
Další možností detekce objektu je využití odrazu infračerveného záření od objektu. Senzor vysílá infračervené záření (např. s vlnovou délkou 940 nm) do okolního prostředí. Množství odraženého světla dopadající zpět na optický detektor, umístěný hned vedle vysílače, je detekováno nebo měřeno. Měří se světelný výkon nebo úroveň amplitudy a porovnává se s nastavenou hodnotou. Tímto způsobem lze zjistit nejen vzdálenost, ale i jiné optické parametry (např. kontrast, barvu).

Modul Pololu IR Proximity Sensor

Tento modul obsahuje na jedné desce přijímač i vysílač. Senzor je snadno ovladatelný, stačí pouze přivést napájecí napětí a vstupem „enable“ lze snímač spustit nebo vypnout. Pokud dojde k detekci překážky výstupní pin bude nastaven do vysoké logické úrovně. Výstupní signál má pouze dva stavy (vysoká a nízká úroveň), z čehož je patrné, že snímač umí pouze podávat informaci o tom, zda se překážka vyskytuje v nastavené vzdálenosti. Nevýhodou je, že senzor může být spuštěn cizím IR zářením z nějakého jiného okolního zdroje. Parametry snímače jsou uvedeny v tabulce č. 2 a provedení senzoru na obrázku č. 8. Tento senzor by mohl být použit při návrhu robotické ruky, jako koncový detektor nebo detektor specifické vzdálenosti. Případně jej lze využít pro detekci otáček motoru a jeho úhlového natočení.

Tab. 1: Parametry modulu Pololu IR Proximity Sensor [6]

Velikost	10,16 x 15,24 x 5,08 mm
Hmotnost	0,6 g
Maximální měřená vzdálenost	60 cm
Vzorkovací frekvence	1 kHz
Průměrný vstupní proud	8 mA (16 mA) při napájecím napětí 5 V DC



Obr. 7: Pololu 38 kHz IR Proximity Sensor [6]

Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu

Rotační senzory (enkodéry) jsou zařízení, která se obecně mohou použít v aplikacích, kde se měří délka, pozice, rychlost, úhel natočení nebo všechny veličiny, které na ně lze převést. Provádějí přeměnu mechanického pohybu na elektrické signály. Oproti odporovým snímačům mají výhodu v tom, že nedochází k mechanickému poškození, ovšem vyhodnocování polohy může být složitější. Většinou výstupní signál informuje pouze o pohybu nikoliv o přesné pozici. Zpravidla fungují na principu, že při rotačním pohybu generují pulsy, jejichž určitý počet odpovídá určité vzdálenosti. Proto při zapnutí musí být zařízení uvedeno do výchozí pozice. Ve složitějším provedení existují i senzory, které již generují pro

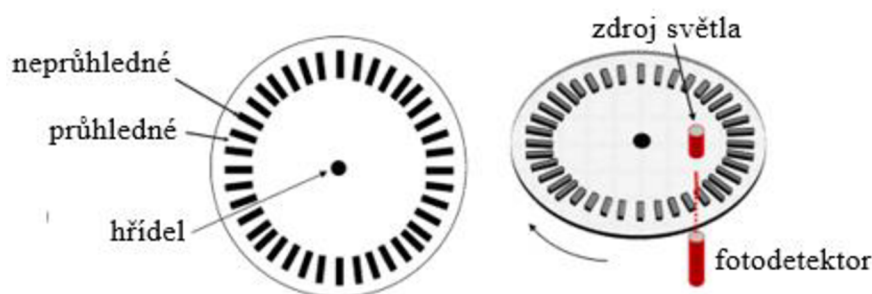
každou pozici natočení konkrétní číselnou hodnotu, tedy v každém momentě je přesně definováno, v jakém úhlu natočení se enkodér nachází. [7]

Princip rotačního optického enkodéru pro měření natočení

Principiálně se jedná o elektromagnetický převodník, který převádí rotační pohyb na sekvenci elektrických impulsů. Převodník je složen z:

- disku s posloupností opticky průhledných a neprůhledných otvorů nebo odrazivých a neodrazivých plošek,
- optického vysílače – například LED dioda,
- optického přijímače – fotodioda nebo fototranzistor,
- případně optikou pro zaostření paprsku.

Disk je spojen s otočnou hřídelí enkodéru, která je poté v praxi připevněna k motoru nebo jinému otočnému systému. Poté co se například připojený motor začne otáčet, začne se současně otáčet i disk. Optický vysílač je umístěn před diskem a optický přijímač za diskem. Světlo vysílané optickým vysílačem může procházet pouze otvory v disku. Při otáčení disku vznikají světelné impulsy, které dopadají na optický přijímač, který je následně převádí na elektrické impulsy.



Obr. 8: Princip rotačního optického enkodéru [7]

1.2 Snímače ovládací rukavice

Tato kapitola se zabývá snímači, které budou použity při návrhu ovládací rukavice. Je potřeba snímat především ohnutí jednotlivých prstů a pohyb ruky a její natočení ve všech třech osách.

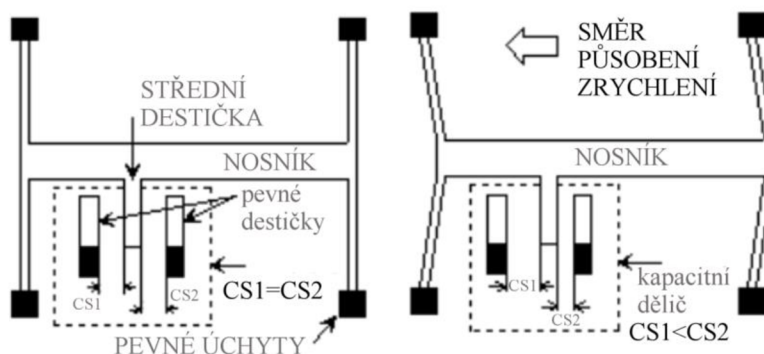
1.2.1 Gyroskop a akcelerometr

Akcelerometr

Akcelerometr je zařízení, pomocí něhož je možné měřit zrychlení sil. Tyto síly mohou být statické (tíhová síla) nebo dynamické, které jsou způsobeny pohybem akcelerometru. Z těchto dat je poté možné zjistit: zrychlení, náklon, sklon, rotaci, vibrace. [8]

Je mnoho způsobů, jak akcelerometr realizovat. Například je možné využít piezoelektrickou strukturu, která při zrychlení začne generovat elektrické napětí. Dalším způsobem je snímání kapacity. Princip kapacitního akcelerometru je uveden na obrázku č. 13. Základem jsou dvě pevné elektrody a jedna volná. Tyto elektrody tvoří kapacitní dělič a v klidovém stavu jsou obě kapacity stejné. V případě působení

zrychlení dochází k pohybu nosníku a volná elektroda se přibližuje k jedné z pevných. Dochází ke změně kapacit v děliči a obě kapacity nejsou nyní stejné. Tuto změnu vyhodnotí elektronika v senzoru a pošle k dalšímu zpracování. [9]

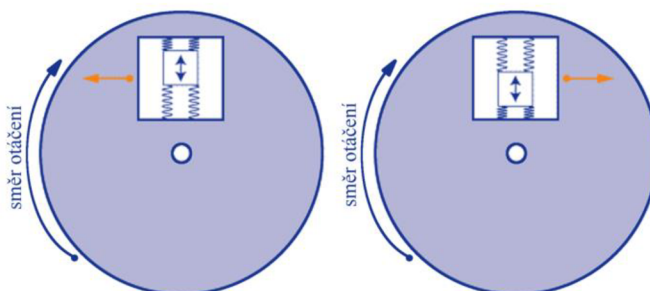


Obr. 9: Princip kapacitního akcelerometru [9]

Gyroskop

Pomocí gyroskopu je možné určit změnu polohy nebo natočení, podobně jako u akcelerometru, ale princip funkce zařízení je odlišný. Gyroskopy měří úhlovou rychlost, kterou je typicky možné měřit ve všech třech osách. Gyroskopy vyráběné jako integrované MEMS obvody pracují na principu Coriolisovy síly.

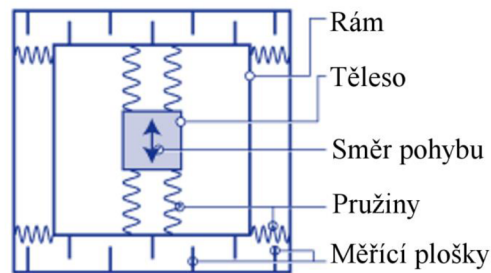
Coriolisova síla je virtuální síla, která působí na pohybující se těleso v soustavě rotující kolem osy. Princip je znázorněn na obrázku č. 14. Zde při pohybu objektu, upevněného na pružinách uvnitř rámu, směrem ven (k okraji rotujícího kotouče) na něj působí Coriolisova síla směrem doleva, při opačném směru pohybu objektu pak doprava. Protože velikost a směr této síly je úměrný i rychlosti a směru otáčení, lze tento systém snadno využít pro měření velikosti úhlové rychlosti. [10]



Obr. 10: Působení Coriolisovy síly na mechanický gyroskop [10]

Princip integrovaných MEMS gyroskopů

Do rámu je pomocí pružin umístěno periodicky se pohybující těleso. Za předpokladu, že směr otáčení je kolmý ke směru pohybu, začne působit na těleso Coriolisova síla, která způsobí stlačení vnějších pružin rámu, a dojde k vzájemnému posuvu měřících plošek, které fungují jako elektrody vzduchových kondenzátorů. Výstupem je tedy změna kapacity úměrná úhlové rychlosti otáčení $^{\circ}/s$. [10]



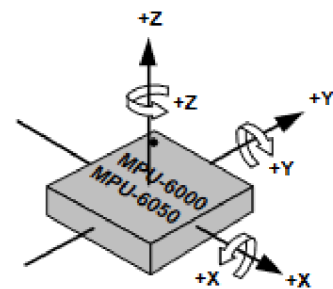
Obr. 11: Realizace gyroskopu v technologii MEMS [10]

Integrovaný obvod MPU-6050

Tento integrovaný obvod obsahuje tříosí akcelerometr a tříosí gyroskop. Obvod komunikuje pomocí I²C sběrnice. Citlivost gyroskopu i akcelerometru je možné měnit pomocí příkazů. Obvod MPU-6050 obsahuje i vlastní procesor DMP (Digital Motion Processor), který provádí veškeré výpočty úhlů ze surových dat z gyroskopu a akcelerometru. Ale je možné číst přímo surová data z akcelerometru i gyroskopu. [11] [12]

Tab. 2: Parametry integrovaného obvodu MPU-6050 [11]

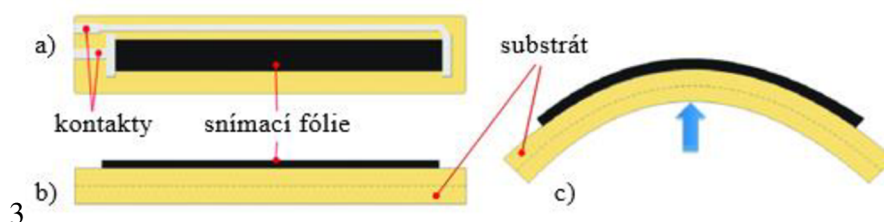
Napájecí napětí	2,375V - 3,46V
Měřící rozsah akcelerometru	± 2, ± 4, ± 8, ± 16 g
Měřící rozsah gyroskopu	250, 500, 1000, 2000 °/s
Spotřeba při provozu	3,6 mA
Pouzdro	24 vývodů QFN



Obr. 12: MPU-6050 [11]

1.2.2 Senzor ohybu

Senzor ohybu převádí změny ohybu na elektrický signál. Podle principu, na kterém senzory ohybu pracují, je lze rozdělit do kategorií: odporové, polovodičové, optické, kapacitní. Základním principem odporového ohybového senzoru je změna odporu na základě mechanické deformace. Čím více je substrát senzoru ohnut, tím vyšší je odpor vodivé součásti, který roste lineárně s ohnutím. Nelinearita v elektrickém chování je závislá pouze na poškození či vzniku prasklin odporového prvku v průběhu mechanického namáhání. [13] Na obrázku č. 13 je uvedeno uspořádání ohybového senzoru. Kde a) je pohled shora, b) je boční pohled a c) ohýbání substrátu, které způsobuje změnu elektrického odporu.



Obr. 13: Uspořádání odporového senzoru ohybu [13]

Pro snímání ohybů prstů ovládací rukavice bude použit senzor ohybu od společnosti Spectra Symbol. Jedná se o technologii, kterou má tato firma patentovanou a tyto senzory byly použity v Nintendo Power Glove. Senzory se vyrábí ve dvou provedeních, které se liší svou délkou 2,2" nebo 4,5".

Tab. 3: Parametry flex sensoru Spectra Symbol 2,2" [14]

Odpor v klidovém stavu	25 k Ω \pm 30 %
Odpor v ohnutém stavu	45 k Ω - 125 k Ω
Spotřeba	0,5 W (1 W špičkově)
Životnost	> 1 milion cyklů
Výška	<0,43 mm
Délka x šířka	73,66 mm x 6,35 mm
Teplotní rozsah	-35 °C až +80 °C



Obr. 14: Flex sensor Spectra Symbol 2,2" [14]

1.3 Pohony

Další nedílnou součástí při návrhu robotické ruky je výběr vhodných pohonných jednotek, a právě o tomhle pojednává tato kapitola.

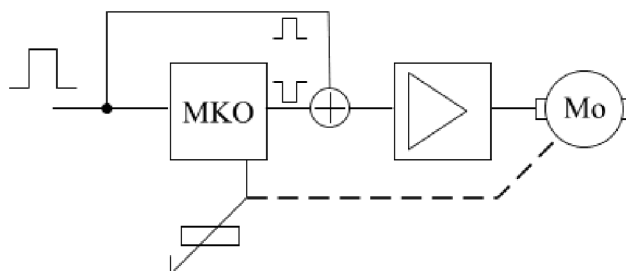
Při návrhu robotické ruky je možné vybírat z několika možností: motory s převody, servomotory, hydraulické nebo pneumatické systémy a jiné lineární pohony. Pro funkčnost hydraulických motorů je nutné rozvádět tlakovou tekutinu, což se na první pohled může zdát zbytečně složité, ovšem pro pohyby, které vykonává robotická ruka, je hydraulický válec velmi vhodné řešení. Značnou výhodou je právě velká síla malého pístu a jeho lineární pohyb, který je vhodný právě pro zvedání ramene nebo tahání za lanka prstů. Regulace průtoku tlakové tekutiny bude řízena ventilem, který ovládá modelářský servomotor. Podrobněji bude hydraulický systém probrán v kapitole níže. Rotační pohyby bude provádět krokový motor, který bude vhodným způsobem zpřevodován.

1.3.1 Modelářský servomotor

Modelářský servomotor, dále jen servo, umožňuje natočení hřídele do požadované polohy a tuhle polohu dále držet, pokud nedojde pokyn ke změně. Servo obsahuje elektromotor s převodovkou a řídicí elektroniku.

Na obrázku č. 15 je uvedeno blokové schéma řídicí elektroniky, která ovládá elektromotor. Princip je takový, že na vstup přichází obdélníkový pulz o patřičné délce, který spustí monostabilní klopný obvod (MKO), ten vygeneruje impuls odpovídající aktuální poloze serva. Tento impuls je opačné polarity než vstupní. Oba tyto pulzy jsou porovnány v rozdílovém členu. Výstup z rozdílového členu je zesílen zesilovačem a přiveden na elektromotor. Pokud jsou oba impulsy stejné, signál přicházející na elektromotor bude nulový a nedojde k jeho roztočení. V případě nenulového rozdílového signálu se motor začne otáčet jedním nebo druhým směrem (podle toho, zda je rozdíl kladný nebo záporný). Současně dochází k otáčení

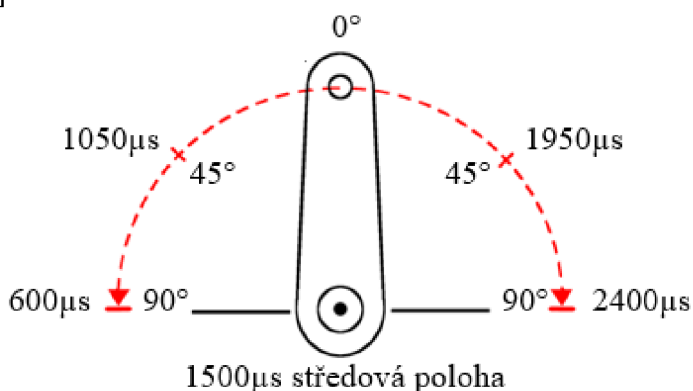
potenciometru, který dělá zpětnou vazbu pro MKO. Elektromotor se otáčí, dokud nebudou oba impulzy stejné. [15]



Obr. 15: Blokové schéma řídicí elektroniky servomotoru [15]

Používají se převážně serva, které pracují s kladnými řídicími impulzy. Délka impulzu může být mezi 1–2 ms a opakovací frekvence by měla být 50 Hz. Střední poloha by měla odpovídat délce impulzu 1,5 ms. Na obrázku č. 16 je znázorněna závislost natočení hřídele na délce řídicího pulzu. [15]

Dále se serva dělí na dvě hlavní skupiny, a z hlediska řídicí elektroniky, na analogové a digitální. Digitální serva obsahují mikrokontrolér a je možné u nich nastavovat různé parametry. Například rychlost, reset serva, směr otáčení, poloha bez signálu atd. [15]



Obr. 16: Závislost natočení servomotoru na šířce řídicího impulzu

Servomotor EMAX ES08MD

Servomotor EMAX ES08MD, je digitální servomotor s kovovými převody. Servomotor patří do kategorie mikroserv. Parametry tohoto serva jsou uvedeny v tabulce č. 4. Výhodou tohoto serva je jeho velikost, váha a cena. Servo váží pouhých 12 g a disponuje tahem 2 kg/cm při napájecím napětí 6 V. Servo bude použito pro ovládání hydraulického ventilu.

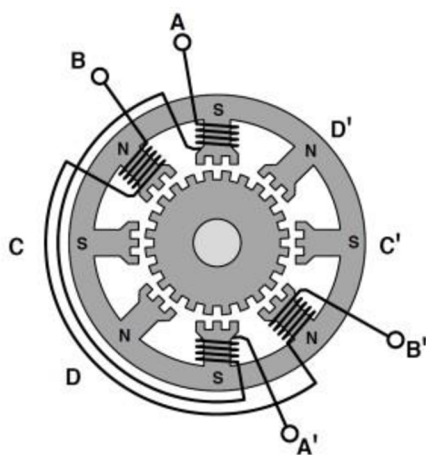
Tab. 4: Parametry servomotoru EMAX ES08MD [16]

Velikost	32 x 11,5 x 24 mm
Váha	12 g
Napájecí napětí	4.8-6.0 V
Šířka řídicího impulzu	1500–1900 µs
Statický tah	1,6 kg/cm při 4,8V, 2 kg/cm při 6 V
Provozní rychlost	0,12 s/60° při 4,8V, 0,10 s/60° při 6 V

1.3.2 Krokový motor

Krokový motor je synchronní motor, což v praxi znamená, že se rotor točí stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole ve statoru. U krokového motoru není magnetické pole vytvářeno střídavým proudem, nýbrž postupným zapínáním jednotlivých cívek statoru. Pólové nastavce rotoru a statoru jsou vzájemně posunuty, takže při vyvolání magnetického pole ve statoru se rotor pootočí právě o rozdíl vzdálenosti mezi příslušnými pólovými nastavci statoru a rotoru. Rotor se pohybuje po krocích a jejich velikost je dána konstrukcí motoru a generováním budících impulsů.

Podle způsobu vinutí je možné dělit motory na unipolární (proud cívkou může téct pouze jedním směrem) a bipolární (proud cívkou může téct oběma směry). Podle počtu vinutí lze motory dělit na dvoufázové, třífázové a vícefázové motory. V tomto návrhu robotické ruky bude použit bipolární dvoufázový motor. Konstrukce takového motoru je principiálně znázorněna na obrázku č. 17. [17] [18]



Obr. 17: Principiální konstrukce dvoufázového krokového motoru [19]

Rotor krokového motoru se skládá z hřídele z nemagnetického materiálu, na kterou jsou nalisovány dva pólové nastavce. Mezi pólovými nastavci je uložen permanentní magnet, který zmagnetuje každý z pólových nastavců na opačnou polaritu. Rotorové pólové nastavce mají na svém obvodu drážky tvořící ozubení, jejichž počet určuje velikost kroku (například pro 30 rotorových zubů bude velikost kroku 12°). Rotorové pólové nastavce jsou polarizovány pomocí cívek, která je na nich navinutá a jejich polarita je dána polaritou řídicího napětí.

Generování řídicích signálů

Pro rozpočívání a roztočení krokového motoru je potřeba zařídit správné generování budících signálů pro cívky. Realizací může být naprogramování mikrokontroléru, který generuje posloupnost budících signálů nebo vytvoření pomocí obvodu pomocí číslicových obvodů. Další možností je využití již vytvořeného komerčního budiče pro krokové motory (například A4988, DRV8880). Posloupnost budících signálů pro motor uvedený na obrázku č. 17 je uvedena v tabulce č. 4.

Tab. 5: Posloupnost bučích signálů pro krokový motor

Krok	A	B	A'	B'
1	+	+	-	-
2	-	+	+	-
3	-	-	+	+
4	+	-	-	+

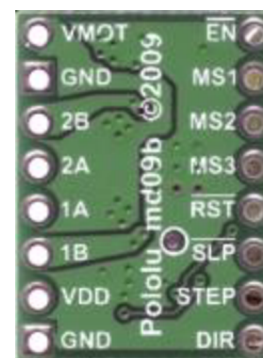
V případě provázení kroků od shora dolů se bude motor otáčet protisměru hodinových ručiček. Změna otáčení se provádí opačným pořadím provádění kroků. Frekvence přepínání jednotlivých kroků udává rychlost otáčení motoru.

Řídicí obvod A4988

Obvod určený pro řízení bipolárních krokových motorů s maximálním proudovým odběrem 2 A. Tento obvod je velice populární pro 3D tiskárny typu RepRap. Obvod disponuje několika ochrannými prvky, například: ochrana proti zkratu, přehřátí a podpětí. Dále lze nastavit maximální výstupní proud, který může krokový motor odebírat. Obvod se ovládá pomocí dvou hlavních vstupů. Přivedením pulsu na vstup „STEP“ (o minimální šířce 1 μ s) provede motor jeden krok. Směr otáčení je ovládán vstupem „DIR“. Vstupy MS1, MS2, MS3 nastavují velikost jednoho kroku. Řídicí obvod lze zakoupit jako hotový modul například od firmy Pololu. Modul je uveden na obrázku č. 18 a jeho parametry v tabulce č. 5.

Tab. 6: Parametry modulu Polu A4988 [20]

Napájecí napětí	8–35 V
Maximální proud na jednu fázi	1 A
Maximální špičkový proud na jednu fázi	3-5,5 A
Rozlišení mikro kroků	1; 1/2; 1/4; 1/8; 1/16
Rozměry modulu	15,24 x 20,32 mm
Hmotnost	1,3 g



Obr. 18: Pololu A4988

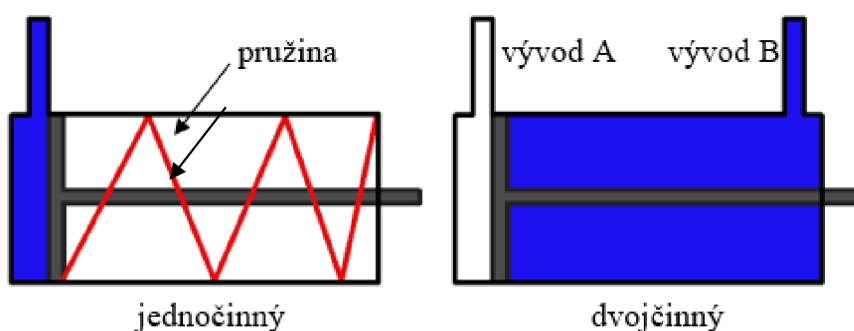
1.3.3 Hydraulický systém

Hydraulické stroje využívají přenášení síly pomocí tlaku nestlačitelné kapaliny (hydraulický olej). Tlak v potrubí hydraulického systému je vytvářen pomocí hydraulického čerpadla. Kapalina působí tlakem například na píst, který je tlakem vytlačován a působí silou na rameno.

Hydraulický válec

Hydraulický válec je mechanické zařízení používané pro převod síly stlačené kapaliny na mechanický pohyb. Výsledná mechanická síla je přímo úměrná rozměrům pístu. Hydraulické válce lze rozdělit na jednočinné a dvojčinné. Na obrázku č. 19 je uvedeno principiální znázornění jednotlivých druhů pístů. Jednočinný válec má pouze jeden vývod a zpětný pohyb je realizován pružinou, příkladem mohou být válce brzdové. Dvojčinný hydraulický válec má dva vývody.

Pokud je tlak kapaliny na vývodu A větší než na vývodu B, dochází k vysouvání pístu, naopak pokud je větší tlak kapaliny na vývodu B, dochází k zasouvání pístu.



Obr. 19: Principiální schéma jednočinného a dvočinného hydraulického válce

Elektrické hydraulické čerpadlo

Hydraulické čerpadlo dodává kapalinu do součástí systému. Tlak v systému se vyvíjí v reakci na zatížení. To znamená, že čerpadlo o maximálním tlaku 1,8 MPa, dokáže udržovat tok kapaliny proti zatížení 1,8 MPa. Čerpadlo je poháněno elektrickým motorem. Čerpadla lze rozdělit na:

- **Zubové čerpadlo:** levné, odolné, jednoduché, ovšem méně výkonné, je vhodné pro tlaky nižší než 20 MPa.
- **Lopátkové čerpadlo:** levné a jednoduché, spolehlivé, dobré pro nižší tlaky s vyšším průtokem.
- **Rotační pístová čerpadla:** I když princip pístových čerpadel je samozřejmě založen na posuvném pohybu pístu ve válci, jejich zdvih je poháněn rotující hřídelí s externím pohonem. Dalším významným znakem rotačních čerpadel je obvykle použití velkého množství malých pístů umístěných do kruhu. Podle toho, zda se hýbají (vysouvají) ve směru podélném či kolmém k poháněné hřídeli čerpadla se rozdělují na radiální a axiální provedení. Výhodou je generování velmi vysokého tlaku i při relativně nízkých otáčkách. Nevýhodou může být, že dosahují jen velmi malých průtoků (menší než zubová čerpadla). [21]

Pro tuto práci bylo vybráno čerpadlo od firmy MAGOM HRC, uvedené na obrázku č. 20. Jedná se o zubové čerpadlo poháněné bezkartáčovým elektro motorem. Maximální tlak, který je čerpadlo schopné dodávat je 1,8 MPa. Čerpadlo je určeno pro RC modely a je vhodnou volbou pro tento návrh robotické ruky.

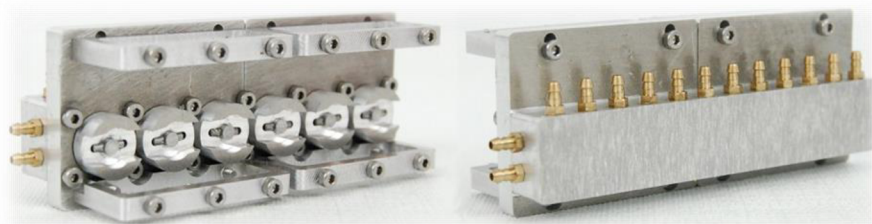


Obr. 20: Zubové čerpadlo od firmy MAGOM HRC

Hydraulický rozvaděč

Hydraulický rozvaděč zajišťuje řízení proudů tlakové tekutiny do jednotlivých hydraulických válců. Na vstup rozvaděče je připojeno hydraulické čerpadlo a výstupy z rozvaděče jsou připojeny na hydraulické válce. Jednotlivé ventily jsou ovládány servomotorem a je patrné, že každý hydraulický válec může být ovládán nezávisle na ostatních.

Pohyby robotické ruky budou realizovány celkem devíti hydraulickými válci, což vyžaduje použití devítisekčního rozvaděče. V tomto návrhu bude devítisekční rozvaděč tvořen kombinací šestisekčního (uvedený na obrázku č. 21) a třísekčního rozvaděče od firmy MAGON HRC. Tyto rozvaděče jsou schopny pracovat až do tlaku 3 MPa, přičemž doporučená hodnota je 0,5-1,8 MPa.



Obr. 21: Šesti sekční rozvaděč od firmy MAGOM HRC

1.4 Možnosti výroby mechanických částí

Tato kapitola se zabývá výběrem vhodných materiálů a technologií pro výrobu mechanických dílů robotické ruky. Složitější a méně namáhané tvary je možné realizovat pomocí 3D tisku. Ploché díly, které představují v podstatě 2D tvar, budou vyráběny plasmovým řezáním, u přesnějších tvarů bude využito laserové řezání. Tyto procesy jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách. Některé díly budou vyráběny ručním obráběním pomocí soustruhu nebo frézky (například velké pístnice, které budou soustruženy).

1.4.1 Výroba dílů na 3D tiskárně

Tato technologie se stává čím dál více dostupnou. Díl vzniká pokládáním souvislých vrstev materiálu, jedná se o tzv. aditivní výrobu, naopak při obrábění dochází k postupnému odstraňování materiálu. K výrobě je potřeba pouze digitální předloha, podle které se vytváří fyzický model. [22]

Materiály pro 3D tisk:

- **ABS** (acrylonitrile butadiene styrene) je nejpoužívanější materiál pro 3D tisk. Tento typ plastu vykazuje dobrou tepelnou odolnost a vysokou pevnost. Je odolný do teplot až 100 °C bez velkých ztrát na pevnosti. Nevýhodou je jeho tepelná roztažnost, která představuje velký problém při tisku větších předmětů.
- **PLA** (polylactic acid) je vyrobený z kukuřičného škrobu. Oproti ABS má menší teplotní roztažnost a při jeho tisku není potřeba vyhřívaná podložka. Je to jediný plast, který se dá použít pro tisk větších předmětů. Nevýhodou je

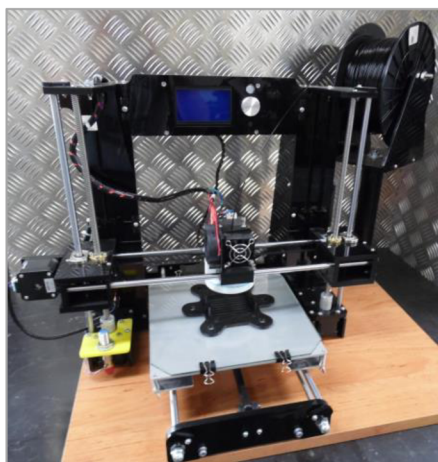
větší křehkost v porovnání s ABS a také menší teplotní odolnost. Nicméně tento plast byl použit při tisku mechanických dílů robota.

- **PET** (polyethylene terephthalate) tento plast si bere všechny dobré vlastnosti z PLA a ABS. Má velkou pevnost, stálost a nízkou tepelnou roztažnost. Opět není nutná vyhřívaná podložka. Nevýhodou může být dostupnost pouze v číré variantě a cena.
- **Ostatní materiály** většinou experimentální. Například: PLA s příměsí dřeva, Nylon nebo dokonce vodivé materiály. Ovšem tyto materiály nejsou pro tuhle konkrétní aplikaci potřeba. [22]

Technologií 3D tiskem budou vyráběny články prstů a složitější tvary, které by bylo nutné vyrábět složitějším obráběním. Materiál pro tisk bude použit PLA, kvůli svým dobrým vlastnostem při tisku. Problém může nastat v případě vystavení dílů vyšší teplotě, která může způsobit jejich roztavení. Díly budou tisknuty na 3D tiskárně Anet A6, jedná se o tiskárnu typu RepRap a je uvedena na obrázku č. 22. Její základní parametry jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tab. 7: Základní tiskové parametry 3D tiskárny Anet A6

Velikost tiskové plochy	Rychlost tisku	Průměr trysky	Přesnost v osách X, Y	Přesnost v ose Z
220 x 220 x 250 mm	100 mm/s	0,4 mm	0,012 mm	0,004 mm



Obr. 22: 3D tiskárna Anet A6

1.4.2 Plasmové a laserové řezání

Tyto technologie budou použity pro výrobu 2D dílů konstrukce robotické ruky. Díly budou vyřezávány z hliníkové tabule nebo ocelového plechu. Obě technologie jsou založeny na tepelném dělní materiálu, pracují na principech lokálního tavení, spalování nebo odpařování.

Laserové řezání

Obrábění a opracování materiálů laserem je založeno na přeměně světelné energie na energii tepelnou. Principem laseru je zesílení světla pomocí principu

indukované emise (vynuceného záření). Indukovaná emise je vyvolána dopadem záření na atom prvku, kdy záření donutí elektron, který obíhá kolem jádra, přijmout energii, což způsobí posun elektronu na vyšší oběžnou dráhu. Další příjem energie a rovnováha sil v atomu přinutí elektron vrátit se na svoji původní oběžnou dráhu a vyzářit přijatou energii do prostoru. Takto vzniklé záření je monochromatické (tzn. má jednu, přesně definovanou vlnovou délku) a koherentní. [23]

Plazmové řezání

Základem řezání plazmatem je ohřev nebo tavení materiálu za extrémně vysokých teplot, které vznikají rozkladem molekul plynu při jejich průchodu elektrickým obloukem. Oblouk hoří mezi netavící se katodou, která je vyrobena z wolframu, a anodou, která představuje opracováváný materiál, nebo tělesem hořáku.

Pojem plazma představuje čtvrtý stav hmoty a představuje speciální stav plynu. Plazma je vysoce žhavý, elektricky vodivý plyn, který je tvořený pozitivními a negativními ionty, elektrony a také vybuzenými a neutrálními atomy a molekulami.

Jako plazmový plyn může být používán jednoatomový plyn argon anebo dvouatomové plyny vodíku, kyslíku, dusíku, vzduchu. Volba plazmového plynu pro:

- konstrukční ocel: kyslík, vzduch,
 - vysoce legovaná ocel: argon/vodík, argon/vodík/dusík, argon/dusík, vzduch, dusík,
 - neželezné kovy: argon/vodík, vzduch,
 - kompozitní materiály: argon/vodík, argon/vodík/dusík, vzduch, kyslík.
- [24]

Plazmový CNC stroj, který je použit při výrobě některých mechanických dílů je uveden na obrázku č. 23. Jedná se o domácí výrobu CNC plazmové řezačky.



Obr. 23: Domácí CNC plazmová řezačka

1.5 Řídicí mikrokontroléry

Tato kapitola je zaměřena na výběr vhodných mikrokontrolérů pro řízení robotické ruky, ovládání servomotorů a mikrokontroléru pro ovládací rukavici. Základem ovládací rukavice je mikrokontrolér ATmega328P. Jeho hlavním úkolem je převádět pomocí A/D převodníku signály z flex senzorů a posílat jejich hodnoty přes Bluetooth. Mikrokontrolér ATmega328P bude použit i jako generátor řídicích signálů pro servomotory a zpracovávání signálů ze senzorů poloh. Hlavním mikrokontrolérem, který bude zpracovávat komunikaci mezi všemi perifériemi (wifi, řídicí jednotka servomotorů, drivery krokových motorů atd.) bude mikrokontrolér STM32F303CCT6.

Mikrokontrolér ATmega328P

Jedná se o 8bitový mikrokontrolér s architekturou AVR, který obsahuje dva 8bitové čítače a jeden 16bitový. Maximální taktovací frekvence je 20 MHz. Obvod má celkem 23 vstupních/výstupních linek. Velikost napájecího napětí může být v rozsahu 1,8 - 5,5 V. Více parametrů je uvedeno v tabulce č. 8. [25]

Tab. 8: Parametry mikrokontroléru ATmega328P [25]

Napájecí napětí	1,8 – 5,5 V
Maximální taktovací frekvence	20 MHz
Paměť programu Flash	32 kB
EEPROM paměť	1 kB
SRAM paměť	2 kB
Některé ostatní periférie	2x 8 bit čítač, 1x 16 bit čítač, 6x PWM
	8 kanálový 10 bit AD převodník
	1x UART, 1x I ² C

1.5.1 Mikrokontrolér STM32F303CCT6

Mikrokontrolér STM32F303CCT6 s architekturou ARM Cortex-M4 je 32bitový mikrokontrolér s řadou periférií. Hlavními požadavky byly minimálně dva sériové porty UART, I²C sběrnice a port USB. Například mikrokontrolér typu AVR od firmy Atmel byl s těmito požadavky, převážně kvůli portu USB, značně dražší a méně dostupný. A proto byl vybrán právě tento mikrokontrolér, který se může zdát na první pohled zbytečně „výkonný“ pro tuhle aplikaci. Hlavní parametry jsou uvedeny v tabulce č. 9. [26]

Tab. 9: Parametry mikrokontroléru STM32F303CCT6 [26]

Architektura	ARM Cortex-M4
Maximální taktovací frekvence	72 MHz
Napájecí napětí	2 – 3,6 V
Paměť Flash	256 kB
Paměť SRAM	40 kB
Počet V/V linek	20

Další periférie	CAN, 2x I ² C, 3x SPI, 3x USART, USB
	5x 16 bit časovač, 1x 32 bit časovač
	2x DAC převodník
	4x 12 bit ADC převodník
	7x komparátor a 4x operační zesilovač

1.6 Bezdrátová komunikace

Robotická ruka bude ovládána bezdrátově prostřednictvím technologie Wi-Fi. Přes Wi-Fi bude také posíláno video z kamerového modulu do koncového zařízení (například smartphonu). Ovládací rukavice je vybavena Bluetooth modulem, pomocí něhož jsou data ze senzorů bezdrátově odesílána a uživatel nebude omezován přírodními kabely.

Bluetooth

Tato technologie je definována standardem IEEE 802.15.1 a spadá do kategorie osobních počítačových sítí, tzv. PAN (Personal Area Network). K přenosu využívá rádiové vlny s kmitočtem 2,4 GHz. Existuje několik tříd Bluetooth, které se liší svou výkonností a maximálním dosahem signálu (od 1 m do 100 m). Rychlost přenosu je do 24 Mb/s. [27]

Bluetooth modul HC-05

HC-05 je komunikační modul, který používá Bluetooth SPP (Serial Port Protocol). Bluetooth modul komunikuje pomocí sériové linky a pomocí AT příkazů ho lze různě nakonfigurovat. Při výchozím nastavení funguje v podstatě jako „převodník“ Bluetooth na sériový port. Vzhledem k velikosti modulu je i anténa poměrně malá a maximální dosah je omezen na 10 metrů, ovšem pro využití v tomto projektu je naprosto dostačující. Více parametrů je uvedeno v tabulce č. 10.

Tab. 10: Parametry obvodu HC-05 [28]

Napájecí napětí	1,8 – 3,6V
Proudový odběr	30-40 mA (10 mA, když je spárovaný)
Maximální přenosová rychlost	3 Mbps
Výkon	Class 2 (cca 4dBm/2,5mW)
Frekvenční pásmo	2,4 GHz
Ostatní periférie	UART s nastavitelnou rychlostí (9600-460800 baud)
	GPIO/LED
Velikost	12,7 x 27 x 1,5 mm



Obr. 24: Bluetooth modul HC-05 [28]

Wi-Fi

Tato technologie je podobná technologii Bluetooth a spadá do standardu IEEE 802.11. Jedná se o bezdrátovou náhradu za drátový Ethernet. Pracuje na stejné frekvenci jako Bluetooth 2,4 GHz, anebo 5 GHz. U Wi-Fi sítě rozlišujeme dvě základní topologie. Prvním je hvězdicová topologie, kde je potřeba přístupový bod (AP), ke kterému se připojují ostatní zařízení. Druhý typ spojení se nazývá Ad-Hoc, nepotřebuje žádný přístupový bod, koncová zařízení se spojují přímo mezi sebou. [29]

V tomto návrhu bude pro hlavní bezdrátový přenos dat použita právě technologie Wi-Fi, neboť existuje velké množství levných modulů, které splňují veškeré požadavky. Jedním z požadavků je, že modul musí mít možnost vytvoření přístupového bodu, na který se poté koncové zařízení připojí.

Wi-Fi modul ESP8266

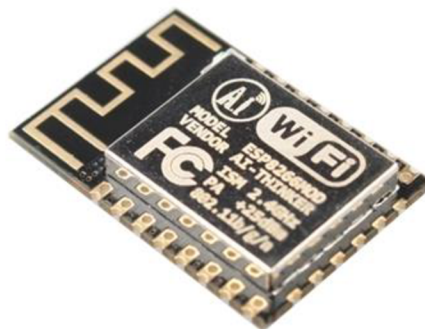
ESP8266 je velmi levný modul, který je díky své rozšiřitelnosti jednoduše programovatelný a lze do něj nahrát i vlastní firmware. Dokonce je možné do modulu nahrát firmware, pomocí něhož ho lze programovat jako Arduino. Toho je využito právě v tomto návrhu, neboť pomocí platformy Arduino lze k modulu snadno připojit kameru Arducam. [30]

Tento modul vytváří Wi-Fi hotspot, na který je možné se pomocí zařízení s Wi-Fi připojit. Při použití vhodného firmwaru je možné z modulu udělat i webový server. Čip má totiž dostatečný výkon a prostředky nejen k samotné bezdrátové komunikaci, ale i pro spuštění nějakého dalšího programu, který je do něj nahrán.

Obvod ESP8266 obsahuje 2,4 GHz přijímač a vysílač. Dále je vybaven mikrokontrolérem Tensilica L106. Jedná se o 32bit mikrokontrolér a je taktován na frekvenci 80 MHz. Hlavní parametry modulu jsou uvedeny v tabulce č. 11.

Tab. 11: Parametry obvodu ESP8266 [31]

Napájecí napětí	3,0V – 3,6V
Odběr proudu	80 mA
Frekvenční rozsah	2,4 – 2,5GHz
Wi-Fi módy	Station/SoftAP/SoftAP+ Station
Zabezpečení	WPA/WPA2
Ostatní periférie	UART/SDIO/SPI/I ² C/I2S GPIO/ADC/PWM/LED
Velikost	16 x 24 x 3 mm



Obr. 25: Modul ESP8266

1.7 Kamera

Pohyb robotické ruky bude možné sledovat pomocí kamery, což znamená, že operátor bude moci manipulovat s rukou i bez fyzické přítomnosti. Kamera Arducam Mini s CMOS senzorem OV5642 je vhodným řešením pro tuhle aplikaci. Kamera umožňuje zachytávat snímky s rozlišením až 5 MP. Výhodou tohoto kamerového modulu je snadné ovládání a přenos zachycených obrázků. Při menším rozlišení je možné dosáhnout i videa s 10–15 FPS. Více parametrů tohoto modulu je uvedeno v tabulce č. 12. [32]

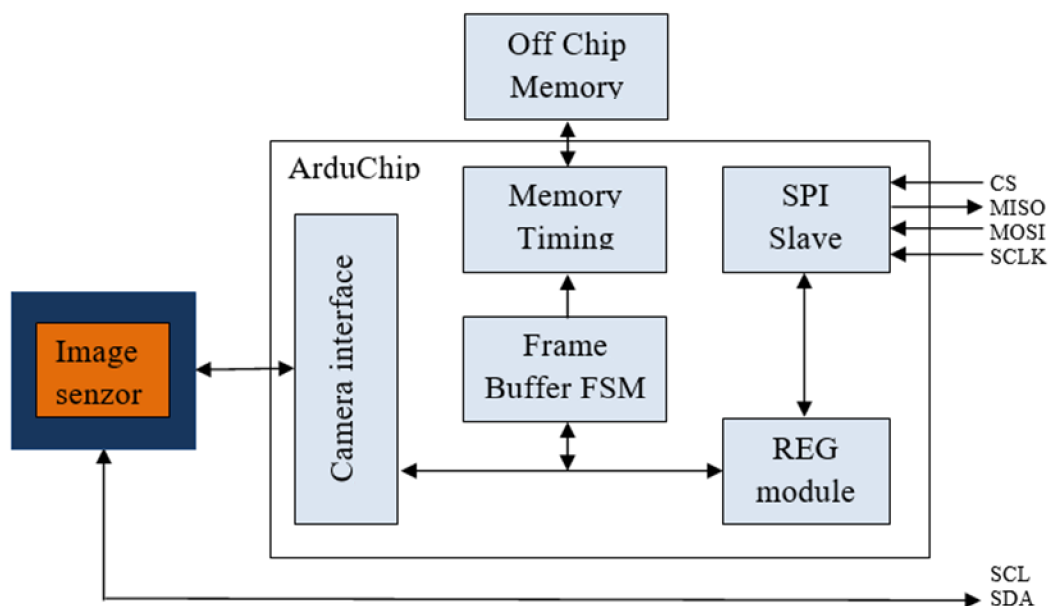
Tab. 12: Parametry modulu Arducam Mini s OV5642 senzorem [32]

Zachycovací senzor	OV5642
Maximální rozlišení	2592x1944
Závěrka	štěrbínová
Rychlost SPI	8 MHz
Velikost frame bufferu	8 MByte
Rozměry modulu	34 x 24 mm
Hmotnost	20 g
Napájení	3,3 – 5 V / 390 mA



Obr. 26: Modul ArduCam Mini s OV5642 [32]

Senzor OV5642 se ovládá přes sběrnici I²C a je možné nastavit různé rozlišení obrazu, formát výstupních dat a mnoho dalších parametrů senzoru. Data ze senzoru jsou zpracovávána v obvodu „ArduChip“ a jsou přenášena pomocí sběrnice SPI. Takže je zřejmé, že pro připojení modulu jsou potřeba obě tyto sběrnice. Na obrázku č. 26 je blokové schéma celého kamerového modulu. Modul je uveden na obrázku č. 27.



Obr. 27: Blokové schéma kamery Arducam Mini s OV5642 [32]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

Tato kapitola pojednává o praktické realizaci robotické ruky. První část je věnována návrhu mechanické konstrukce a ovládní jednotlivých prstů na robotické ruce. Dále jsou popsány základní elektronické celky, které realizují řízení robotické ruky, a naprogramovaný firmware pro použité mikrokontroléry. Na závěr je popsán návrh ovládací rukavice se senzory a aplikace pro systém Android.

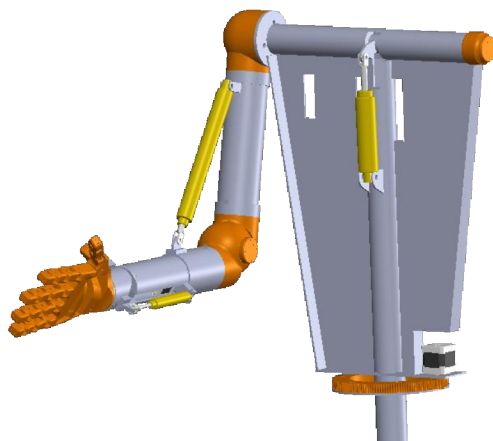
2.1 Návrh mechanické konstrukce

Mechanická konstrukce robotické ruky je vyrobena převážně z kovových materiálů, a to z hliníku (hliníkové trubky, hliníkové desky) nebo oceli (ocelová trubka, ocelové plechy). Některé složitější části (např. loketní a ramenní kloub) nebo různé držáky snímačů, které by byly obráběním složitěji realizovatelné, byly vytisknuty na 3D tiskárně. Pro 3D tisk byl použit materiál PLA.

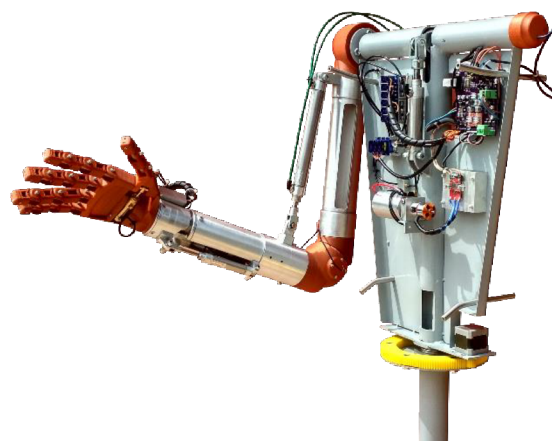
Na obrázku č. 28 je uveden návrh konstrukce robotické ruky, který byl proveden v programu SolidWorks. Základem konstrukce je tělo, které je umístěno na podstavci s ozubeným převodem, který umožňuje otáčení celé konstrukce. Na levé straně těla se nachází ramenní kloub, který je připevněn k ocelové kulatině, která prochází trubkou až ke druhému rameni, kde je spojena se snímačem polohy (odporový snímač polohy – lineární potenciometr). Pohyb ramene zajišťuje píst, který je uprostřed ke kulatině připevněn. K ramennímu kloubu je potom připevněn zbytek celé paže a ruky s pěti prsty.

V celé konstrukci bylo použito celkem devíti hydraulických válců a dvou krokových motorů. Šest hydraulických pístů se nachází na ruce a jejich úkolem je pokrčení a narovnání jednotlivých prstů. Zbylé tři písty realizují pohyb zápěstí, lokte a ramene. Jeden z krokových motorů je použit pro otáčení celé konstrukce a druhý zajišťuje otáčení loktu.

Na obrázku č. 29 je možné vidět prakticky realizovanou konstrukci celé robotické ruky. Jedná se o kompletní realizaci včetně elektroniky a hydraulického systému.



Obr. 28: Konstrukce robotické ruky navrhnutá v programu SolidWorks



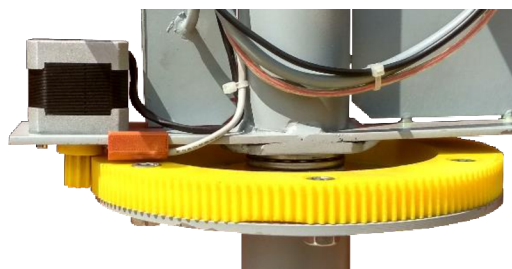
Obr. 29: Realizovaná konstrukce celé robotické ruky

Tělo robotické ruky je vyrobeno ze dvou ocelových trubek o průměru 48 mm, které jsou svařeny do tvaru T a ocelového plechu tloušťky 3 mm. Na obrázku č. 30 je možné vidět tělo robotické ruky a jeho součásti. Vlevo nahoře se nachází dva hydraulické rozvaděče (typ je uveden v teoretické části práce), které jsou řízeny mikro servomotory. Napravo je umístěna hlavní řídicí deska robotické ruky, která obsahuje téměř veškeré elektronické součásti nutné pro chod robota a její detailnější popis bude probrán v kapitole níže. Mezi těmito částmi se nachází hydraulický válec, který zajišťuje pohyb ramene nahoru a dolů. Pod hydraulickým válcem se nachází hydraulické čerpadlo s nádrží na hydraulickou kapalinu, jehož funkcí je zajistit požadovaný tlak v celém hydraulickém systému.



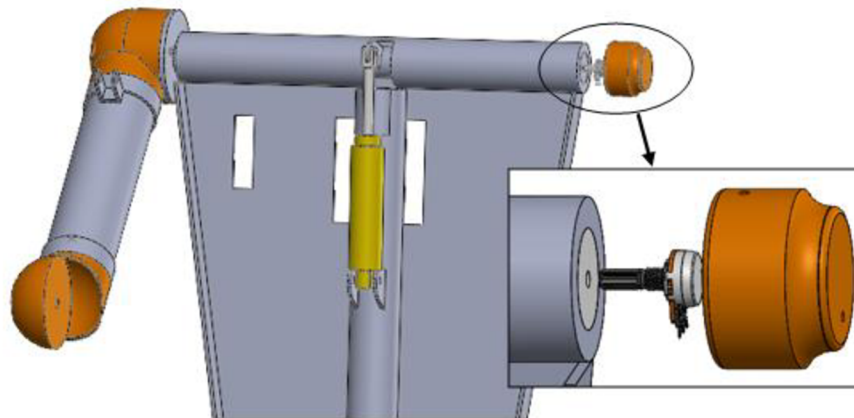
Obr. 30: Tělo robotické ruky

Tělo robotické ruky je připevněno ke stojanu a celý tento mechanismus je uveden na obrázku č. 31. Mezi stojan a tělo bylo vsazeno axiální ložisko, které zajistí snížení tření a větší pevnost při otáčení. Otáčecí pohyb zajišťuje soustava dvou ozubených kol. Tento převod ozubených kol je poháněn krokovým motorem, k němuž je připevněno menší ozubené kolo. Menší ozubené kolo je tvořeno 9 zuby a větší jich má 144. Výsledný převod je tedy 1:16 a následkem je 16krát zvýšení kroutícího momentu motoru, ovšem dojde i 16krát ke snížení rychlosti otáčení. Dále je možné si na obrázku č. 31 všimnout upevnění koncového snímače, který je zasunut do držáku (vytisknutý držák měděné barvy vlevo u motoru). Jedná se o magnetický senzor, který je v případě vystavení magnetickému poli sepnut, a proto bylo potřeba do velkého ozubeného kola umístit malý neodymový magnet. Snímač slouží pouze ke kalibraci polohy, zjištění výchozího bodu, od kterého je následně v závislosti na počtu kroků, které motor vykonal, počítána poloha.



Obr. 31: Připevnění těla ke stojanu a ozubený převod

Paže robotické ruky je vyrobena z hliníkové trubky o průměru 70 mm s tloušťkou stěny 5 mm. Část trubky byla zúžena na průměr 66 mm a po stranách do ní byly vyfrézovány drážky pro odlehčení. Na spodní straně trubky je nasazena polovina loketního kloubu, která byla vytisknuta na 3D tiskárně. Vrchní část trubky zakončuje ramenní kloub, který byl taktéž vyroben technologií 3D tisku. Ramenní kloub je pomocí tří šroubů spojen s kolem, které bylo vyřezáno CNC plazmovou řezačkou a následně obrobena na soustruhu. Na takto vyrobené kolo je navařena ocelová kulatina, která prochází skrz trubku těla robota. Mezi trubkou a kulatinou jsou na začátku a na konci vloženy dvě radiální kuličková ložiska, které zajišťují minimální tření a vycentrování kulatiny v trubce. Na konci trubky je připevněn potenciometr, který má za úkol snímat polohu ramene. Na obrázku č. 32 je patrné znázornění celé popsané konstrukce a umístění snímače. Potenciometr je umístěn pod krytem, který je nasazen a přišroubován k trubce, a jeho úkolem je nejen potenciometr chránit před poškozením, ale také jej fixovat, aby docházelo pouze k otáčení jeho hřídele. Pohyb paže je realizován pomocí hydraulického válce, který se nachází uprostřed těla a jehož píst je připevněn ke kulatině přes páku, která je navařena v polovině kulatiny.



Obr. 32: Připevnění ramene k tělu a detail ramenního senzoru

Zdvih ramenního pístu je 50 mm a průměr pístní tyče je 10 mm. Průměr válce je 25 mm. Sílu pístu při výsunu lze vypočítat jako:

$$F_{výsun} = \frac{r^2 \cdot \pi}{100} \cdot p = \frac{12,5^2 \cdot \pi}{100} \cdot 18 = \underline{88,4kg} \quad (1)$$

a při zasouvání jako:

$$F_{zasouvání} = \frac{(r^2 - rp^2) \cdot \pi}{100} \cdot p = \frac{(12,5^2 - 5^2) \cdot \pi}{100} \cdot 18 = \underline{74,2kg} \quad (2)$$

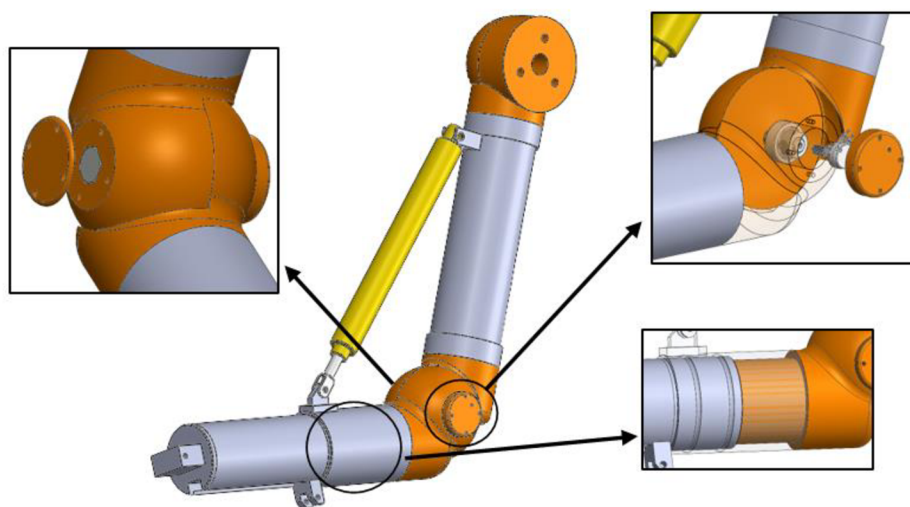
kde r poloměr válce [mm],
 rp poloměr pístní tyče [mm],
 p tlak [bar].

píst je připojen k ose otáčení přes páku o délce 45 mm a délka ramene je 340 mm tzn. že maximální sílu na konci ramene lze odhadnout jako:

$$F_{max} = \frac{l_1}{l_2} \cdot F_{výsun} = \frac{45}{340} \cdot 88,4 = \underline{11,7kg} \quad (3)$$

kde l_1 [mm] je délka páky pístu, l_2 [mm] je délka paže a $F_{výsun}$ [kg] je síla pístu.

Předloktí robotické ruky je vyrobeno ze stejné hliníkové trubky jako paže. Předloktí se skládá ze dvou částí, které jsou do sebe zasunuty. První část trubky je osoustružena na průměr 66 mm a byla do ní vyfrézována drážka na píst, který pohybuje zápěstím. Druhá část má vnější průměr 72 mm a na jednom konci je do ní zasunuta druhá část loketního kloubu. Na konci první a na začátku druhé části jsou po obvodu vysoustruženy dvě drážky na kuličky. Po zasunutí obou částí do sebe jsou drážky naplněny kuličkami, které drží obě části pohromadě. Kuličky jsou vloženy dvěma děrami, které jsou vyvrtány na boku širší části. Kuličky zajistí, že části budou držet pohromadě a zároveň vznikne něco jako kuličkové ložisko, které vycentruje obě části a zajistí minimální tření mezi nimi. Drážky je možné vidět vlevo dole na obrázku č. 33.

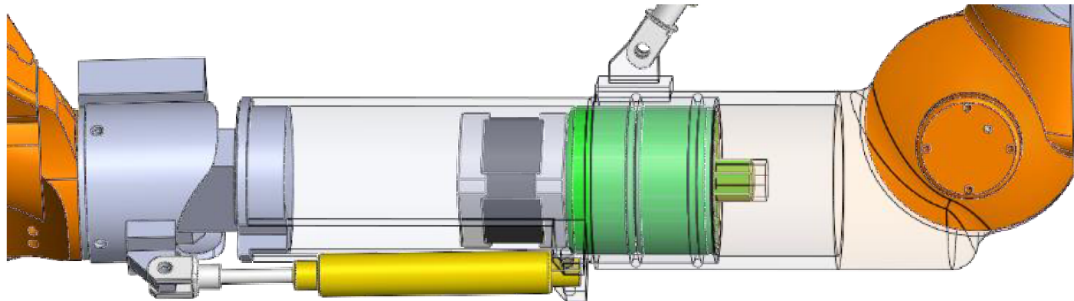


Obr. 33: Upevnění předloktí, detaily kloubu a spojení dvou částí předloktí

Předloktí je s paží spojeno loketním kloubem a zároveň je v loketním kloubu umístěn snímač pro měření polohy předloktí. Obě půlkulaté části kloubu jsou zasunuty do sebe a mezi nimi je vymežovací podložka. Části jsou spojeny šroubem, který je na jedné straně pevně fixován (hlava šroubu zapadá do šestihřanné díry v kloubu) a na straně druhé, v druhé polovině kloubu, je vloženo nejprve axiální ložisko a poté zajišťovací matka. Takto vytvořený spoj zajistí, že se předloktí může pohybovat, ale šroub zůstává pevně fixován a ani nedochází k nežádoucímu povolování matice. Dále je ve šroubu vyvrtána díra, do které je zasunuta hřídel potenciometru, který snímá pohyb předloktí. Potenciometr je přes kryt pevně spojen s polovinou kloubu, která se pohybuje s předloktím. V případě pohybu předloktí dochází k pootočení potenciometru, což má za následek změnu jeho odporu, která je dále vyhodnocována a převedena na polohu předloktí.

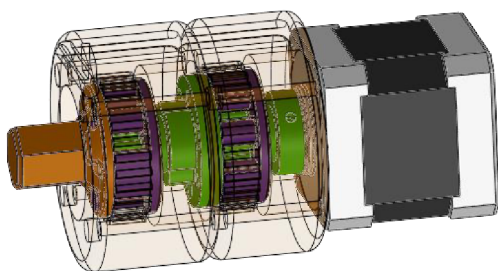
Hydraulický válec, který zprostředkovává pohyb předloktí je upevněn pod ramenním kloubem a jeho píst je upevněn ve vzdálenosti 138 mm od osy loketního kloubu. Píst má zdvih 160 mm a průměr pístní tyče je 10 mm. Průměr hydraulického válce je stejný jako u ramenního pístu 25 mm, což znamená, že má i stejnou sílu.

Jelikož jsou obě části předloktí spojeny pouze kuličkami v drážkách, a druhá část předloktí je pevně spojena s loketním kloubem, je možné s první částí otáčet. Na obrázku č. 34 je možné vidět umístění planetové převodovky v předloktí. Planetová převodovka je pevně přišroubována k užší části předloktí a unašeč satelitů druhé převodovky je spojen s pevnou částí předloktí.

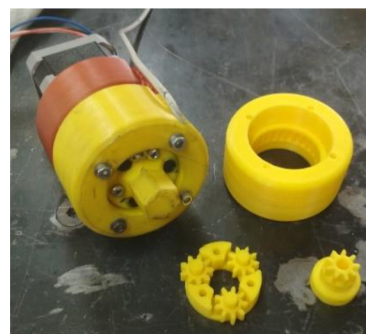


Obr. 34: Umístění planetové převodovky v předloktí

Planetová převodovka je tvořena planetovým převodem, v tomto konkrétním případě se jedná o vícestupňovou planetovou převodovku, neboť jsou sestaveny dvě planetové převodovky za sebou. Každá z planetových převodovek je tvořena centrálním kolem, unašečem satelitů, satelity a korunovým kolem (dvě velké zelené části na obrázku č. 34). Satelity jsou uloženy na unašeči satelitů a jsou v záběru v korunovém i centrálním kole. Unašeč satelitů, centrální kolo a korunové kolo mají společnou osu otáčení. Korunové kolo je v tomto případě pevně přišroubováno k užší části předloktí a nedochází k jeho otáčení. Zelená část na obrázku č. 35 u krokového motoru je centrální kolo (pastorek), který slouží jako vstup do první převodovky. Fialové části jsou unašeče satelitů. Druhá zelená část je výstup první převodovky (spojena s unašečem satelitů první převodovky) a vstup (centrální kolo) pro druhou převodovku. Výstupem je hnědá část, která je připevněna k unašeči satelitů druhé převodovky. V této části je také zabudován malý neodymový magnet, který spolu s magnetickým snímačem, umístěným v obalu centrálního kola, zajistí detekci výchozí polohy při kalibraci. Po kalibraci je poloha zjišťována dle počtu vykonaných kroků krokového motoru. Na obrázku č. 36 je možné vidět realizovanou dvojitou planetovou převodovku. Všechny části planetové převodovky, včetně ozubených kol, byly vytisknuty na 3D tiskárně a jejich pevnost je pro tuhle aplikaci velmi dostačující.



Obr. 35: Navržená dvojitá planetová převodovka



Obr. 36: Dvojitá planetová převodovka vytisknutá na 3D tiskárně

Podle počtu zubů centrálního a korunového kola lze vypočítat převodový poměr jedné převodovky. Centrální kolo má 9 zubů a korunové kolo má 27 zubů. Převodový poměr jedné planetové převodovky pro tenhle případ (zabrzdné korunové kolo) lze vypočítat jako:

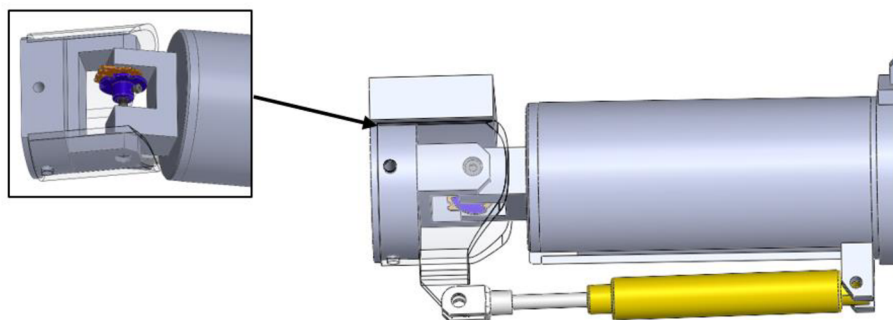
$$\text{převodový poměr} = \frac{PC+PK}{PC} = \frac{27+9}{9} = 4 \quad (4)$$

kde PC..... počet zubů centrálního kola [-],

PK..... počet zubů korunového kola [-].

Kroutící moment je odebírán z unašeče satelitů, což znamená, že převod snižuje rychlost rotace a zvyšuje kroutící moment. Jelikož jsou převodovky řazeny dvě za sebou výsledný převodový poměr sestavy je 16 (16 otáček motoru na vstupu se rovná 1 otáčke na výstupu). V podstatě se jedná o stejný převodový poměr, jaký byl použit pro ozubený převod, který zajišťuje otáčení celé konstrukce. Hlavní výhodou oproti předchozímu jednoduchému ozubenému převodu je velikost planetové převodovky, která se se svými rozměry vejde do předloktí.

Zápěstí robotické ruky se skládá z několika částí. První částí je vysoustružená kruhová zátka, která zapadá do první poloviny trubky předloktí, k tomuto tvaru je přišroubovaný vyfrézovaný profil ve tvaru U, který má po stranách díru na přišroubování zápěstí. Druhá část je tvořena z trubky o stejném průměru jako užší část předloktí a horní a spodní strana je vyfrézována, aby bylo možné ohýbat zápěstí v celém rozsahu. Do tohoto tvaru je zasunuta zátka, která je zakončena U profilem, který zapadá do části na předloktí, a obě tyto části jsou po stranách sešroubovány k sobě. Vrchní strana těchto částí je ofrézována do roviny, na které je připevněný blok se čtyřmi písty. Takto vytvořenou konstrukci znázorňuje obrázek č. 37.



Obr. 37: Návrh upevnění a snímání polohy zápěstí

Poloha zápěstí je opět snímána spojitě pomocí potenciometru, ovšem aby bylo možné potenciometr použít, bylo nutné jej nejprve upravit. Potenciometr byl rozebrán a část s odporovou dráhou byla přilepena k U profilu předloktí. Část s jezdcem byla překreslena a upravena v programu SolidWorks, tak aby ji bylo možné nasadit a upevnit na šroubu se závitem M4, který tvoří hřídel zápěstí. Takto upravená část byla vytisknuta na 3D tiskárně a byl k ní připevněn původní jezdec. Na obrázku č. 37 vlevo nahoře znázorněno popsané uspořádání, přičemž hnědý díl je část s odporovou dráhou a modrý díl je vytisknutá část s jezdcem. Ochrana potenciometru proti poškození a prachu je realizována ochranným krytem, který byl navržen přesně pro tuhle aplikaci a opět vytisknut na 3D tiskárně.

O pohyb zápěstím se stará hydraulický válec s průměrem 16 mm, zdvihem pístu 50 mm a s průměrem pístní tyče 6 mm, který je připevněn k první části předloktí a druhé části zápěstí. Pomocí vzorce č. 1 a 2 lze opět vypočítat maximální sílu při zasouvání a vysouvání pístu. Maximální síla při vysouvání pístu:

$$F_{vysun} = \frac{r^2 \cdot \pi}{100} \cdot p = \frac{8^2 \cdot \pi}{100} \cdot 18 = \underline{36,2kg} \quad (5)$$

a při zasouvání jako:

$$F_{zasouvání} = \frac{(r^2 - rp^2) \cdot \pi}{100} \cdot p = \frac{(8^2 - 3^2) \cdot \pi}{100} \cdot 18 = \underline{31,1kg} \quad (6)$$

Z výpočtů je patrné, že hydraulický válec má dostatečnou sílu pro pohyb zápěstím.

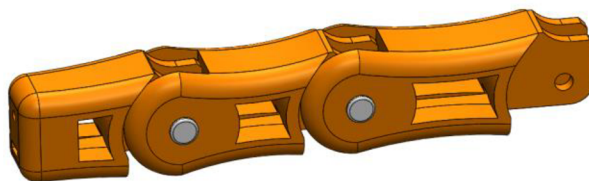
2.1.1 Návrh ruky a jednotlivých prstů

Robotická ruka má stejně jako ruka lidská pět prstů. Všechny prsty kromě palce jsou vytvořeny ze tří článků. Články jsou navrženy tak, aby je bylo možné vyrobit vytisknutím na 3D tiskárně. Při návrhu bylo dbáno na to, aby byly jednotlivé prsty ovládány pouze jedním pohonem (nejlépe lineárním pohonem - pístem) a zároveň pokrčení jednotlivých článků bylo co nejvíce podobné těm lidským. Jedním z možných řešení bylo použití vhodného uskupení pák tak, aby se při tlaku na první článek prstu pohybovaly i ty zbývající, ale s rozdílným natočením, aby byl pohyb co nejrealističtější a pokud se první článek zachytí o předmět, měl by se zbytek článků ohýbat dál. Na obrázku č. 38 je ukázka robotické ruky, který využívá systém pák k ohybu jednotlivých prstů. Jedná se o ExoHand od firmy FESTO.



Obr. 38: Pohyb prstu pomocí vhodné sestavy pák (ExoHand) [33]

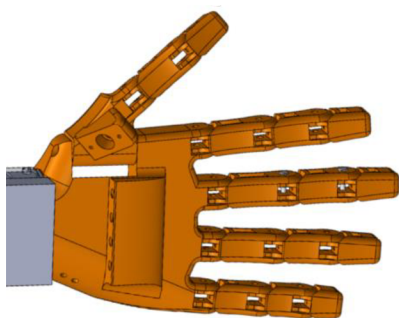
Tento způsob byl z důvodu náročného návrhu a výroby zavrhnut a na místo toho bylo využito jednoduššího řešení. Jednotlivé články prstů jsou duté a mezi články je vhodně protáhnuto lanko tak, aby při tahání za něj, docházelo ke srolování jednotlivých článků. I zde je spousta možností realizace, například využití dvou lanek, jedno na srolování článků prstů a druhé na jejich zpětný pohyb. Případně lze využít pouze jedno lanko, které zajistí pokrčení prstů a zpětný pohyb je realizován pružinou, která působí na články otočnou silou a vrací je do zpětné polohy. V tomto návrhu je využito pouze jednoho tvrdšího lanka, za které je taháno hydraulickým válcem. Na obrázku č. 39 je uveden návrh jednoho prstu.



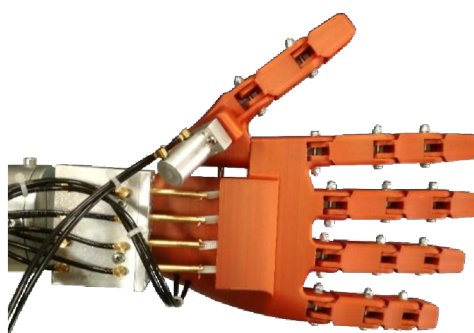
Obr. 39: Návrh jednoho prstu složeného ze tří článků

Jak již bylo uvedeno výše, ruka se skládá z pěti prstů. Všechny prsty až na palec jsou ovládány jedním hydraulickým válcem, palec je ovládán dvěma hydraulickými válci. To znamená, že na pohyb prstů je využito celkem 6 hydraulických pístů. Na spodní straně článků prstů je vytvořena drážka, do které je vsunut tenký plastový pásek (ustřižená stahovací páska). Pásek je na konci prstu pevně přišroubován a druhý konec je připevněn k pístu. Při tažení za pásek dochází k pokrčení prstu, naopak při tlačení na něj je prst narovnáván. Vedení plastového pásku v drážce je nutné právě při narovnávání prstu. Pokud by byl pásek volný, tak by se pod tlakem mohl ve článku prstu vlnit a prst by se nedokázal narovnat.

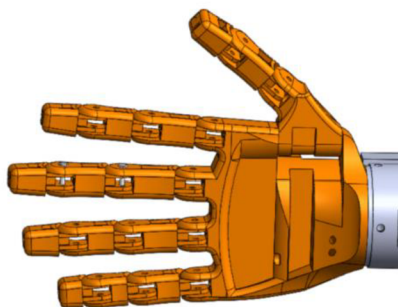
Na obrázku č. 40 a 42 je uveden návrh dlaně s prsty v programu SolidWorks. Každý z prstů je unikátní svojí délkou, a to zhruba v poměru, jak je tomu u lidské ruky. Palec se skládá ze dvou článků a jednoho speciálního, na kterém je umístěn píst, určený pro jejich ovládání. Na spodní straně dlaně je umístěn píst, který umožňuje pohyb palce směrem dovnitř. Na obrázcích č. 41 a 43 je zobrazena vytisknutá dlaň s prsty na 3D tiskárně, která je již osazena písty a plastovými páskami. Plastové pásky jsou z jednotlivých prstů vedeny kanálky, které jsou ve dlaní vytvořeny, a vylézají tak přímo v ose pístu, kde se na něj napojují. Jednotlivé články jsou spojeny šroubem se zajišťovací matkou, aby nedocházelo k jejich povolování.



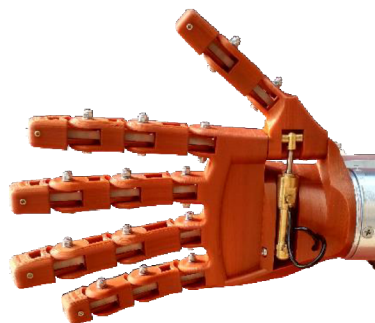
Obr. 40: Návrh dlaně a prstů v programu SolidWorks (pohled shora)



Obr. 41: Realizovaná dlaň a prsty (pohled shora)

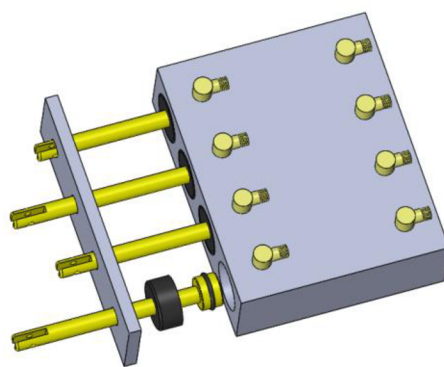


Obr. 42: Návrh dlaně a prstů v programu SolidWorks (pohled zespod)



Obr. 43: Realizovaná dlaň a prsty (pohled zespod)

Hydraulické válce, které tahají a tlačí na plastový pásek protažený všemy prsty kromě palce, jsou součástí jednoho většího bloku. Tento blok je vlastní výroby a je vytvořen konkrétně pro tuhle aplikaci. Na obrázku č. 44 je znázorněn celý blok hydraulických válců a sestavení jednoho z nich. V bloku se nachází čtyři hydraulické válce a jeho základem byla hliníková deska s rozměry 51 x 63 mm, která byla přesně na tyto rozměry vyfrézována. Do bloku byly frézou vyvrtány čtyři přesné díry s průměrem 8 mm, rozstup mezi středy děr je 15 mm, což znamená, že tloušťka stěny mezi jednotlivými válci je minimálně 3,5 mm. Začátek válců byl rozšířen na průměr 12 mm, kvůli osazení gufera, které má za úkol utěsnit píst a zamezit protékání oleje ven z válce dírou, ze které vyhází pístní tyč z bloku. Gufera jsou zajištěny krytem, který je přišrubován ke bloku. Jednotlivé písty byly vysoustřeny z mosazné tyče o průměru 12 mm. Do pístu byla vysoustružena také drážka na pryžový O-kroužek, který zamezuje protékání oleje přes píst a tím zvyšuje účinnost celého hydraulického válce.



Obr. 44: Blok hydraulických válců pro ovládání prstů

Píst je vytvořen s průměrem pístní tyče 4 mm a jeho zdvih je 25 mm, což je naprosto dostačující pro pokrčení celého prstu. Do pístní tyče je vyřezána drážka, do které je zasunut plastový pásek. Na základě těchto parametrů lze vypočítat ideální maximální sílu hydraulických válců, a to použitím vzorců č. 1 a 2. Maximální síla při vysouvání pístu je:

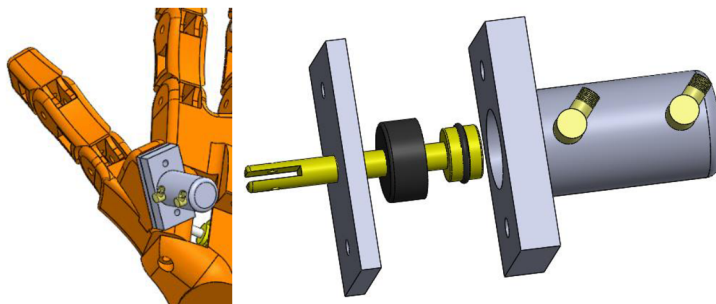
$$F_{\text{vysun}} = \frac{r^2 \cdot \pi}{100} \cdot p = \frac{4^2 \cdot \pi}{100} \cdot 18 = \underline{9kg} \quad (7)$$

a při zasouvání:

$$F_{\text{zasouvání}} = \frac{(r^2 - rp^2) \cdot \pi}{100} \cdot p = \frac{(4^2 - 2^2) \cdot \pi}{100} \cdot 18 = \underline{6,8kg} \quad (8)$$

Pro tyto hydraulické válce je nejdůležitější hlavně síla při zasouvání, neboť pro pokrčení prstu je potřeba vyvinout větší sílu než při jeho natahování. Z praktických testů je patrné, že síla hydraulických válců je naprosto dostatečná, ovšem může být menší než síla vypočítaná, jelikož se jedná o hydraulické válce, které jsou po domácku vyrobené. Ztráta síly může být například protékáním oleje z válce anebo okolo pístu. Vizualní inspekci nebyly zjištěny žádné průniky oleje z hydraulického válce do okolí. Reálnou sílu hydraulického válce by bylo možné změřit například siloměrem.

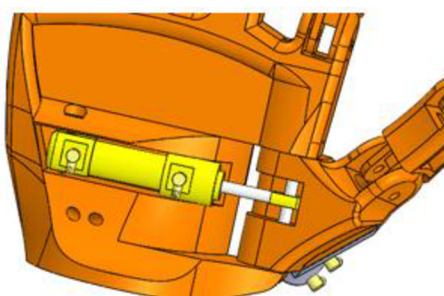
Dalším z vyrobených hydraulických válců je hydraulický válec, který zajišťuje srolování a natažení článků palce. Tento hydraulický válec byl navržen a vyroben tak, aby ho bylo možné umístit na pohyblivou část palce, která natáčí zbylé dva články. Tohle umístění válce je nutné, aby bylo pokrčení a natažení palce nezávislé na natočení palce. Hydraulický válec je opět vyroben z polotvaru hliníku o rozměrech 35 x 33 mm. Část polotvaru byla osoustružena a byl tak vytvořen obal válce. Umístění hydraulického válce na robotické ruce je uvedeno vlevo na obrázku č. 45 a jeho detailní konstrukce je znázorněna vpravo.



Obr. 45: Hydraulický válec ovládající články palce

Konstrukce tohoto hydraulického válce je velmi podobná jako u předchozích hydraulických válců, které byly vytvořeny v jednom bloku. Průměr válce je opět 8 mm a těsnost na rozhraní je zajištěna stejným guferem jako v předchozím případě. Vytvořený píst je také totožný, ovšem jeho zdvih je pouze 15 mm, avšak pro srolování palce naprosto dostačující, neboť se skládá pouze ze dvou článků. Jelikož má válec a píst stejné parametry, jako předchozí sestava hydraulických válců, jsou jeho ideální maximální síly totožné (maximální vysouvací síla je $F_{\text{vysun}} = 9 \text{ kg}$ a maximální síla při zasouvání $F_{\text{zasouvání}} = 6,8 \text{ kg}$).

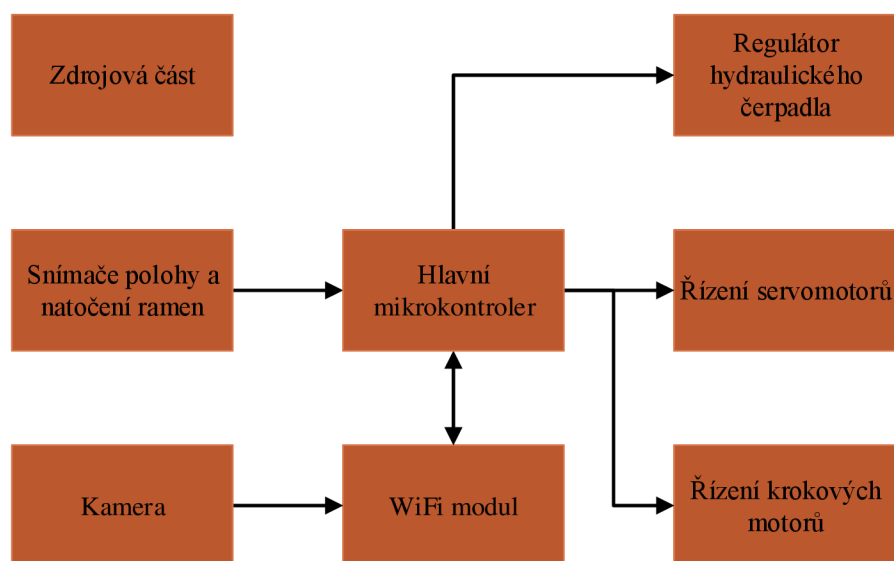
Posledním pohybem robotické ruky je ohyb palce směrem do dlaně. Tento pohyb je ovládán hydraulickým válcem, který byl opět vyroben. Hydraulický válec je umístěn zespod na dlani (znázorněno na obrázku č. 46) a píst je přichycen k prvnímu dílu palce, na kterém jsou uchyceny zbylé dva články. Konstrukce hydraulického válce se oproti předchozím liší, válec je vyroben z mosazné tyče o průměru 20 mm. Píst je vyroben z hliníku, do kterého byla zašroubována pístní tyč z hlazené ocelové tyče o průměru 4 mm. Pod předním víčkem hydraulického válce se skrývají dva pryžové O-kroužky, které slouží jako těsnění. Přední víčko je našroubované na těle hydraulického válce.



Obr. 46: Hydraulický válec pohybující palcem

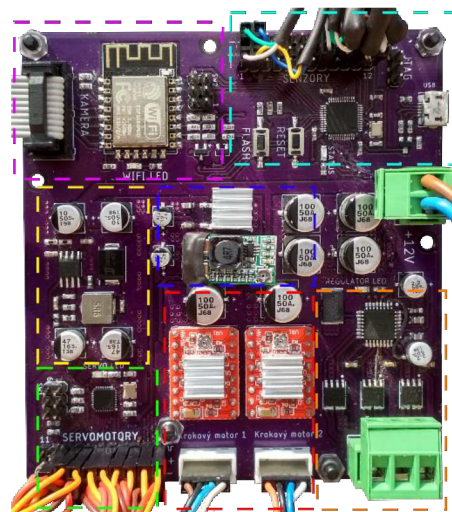
2.2 Návrh řídicí desky robotické ruky

Tato kapitola se zabývá návrhem řídicí desky robotické ruky. Blokové schéma řídicí desky je uvedeno na obrázku č. 47. Základem je mikrokontrolér STM32F303CCT6, který propojuje jednotlivé bloky. Na pravé straně jsou bloky, které se starají o řízení akčních členů (hydraulické čerpadlo, servomotory, krokové motory) a jsou ovládány právě hlavním mikrokontrolérem. K hlavnímu mikrokontroléru je připojen Wi-Fi modul, který se stará o bezdrátovou komunikaci s uživatelem. Součástí robotické ruky je také kamera, která je připojena k Wi-Fi modulu. Obrázky z kamery jsou posílány bez větších úprav přímo k uživateli. Data ze snímačů jsou zpracovávána hlavním mikrokontrolérem. Všechny tyto bloky jsou podrobněji popsány níže.



Obr. 47: Blokové schéma elektroniky robotické ruky

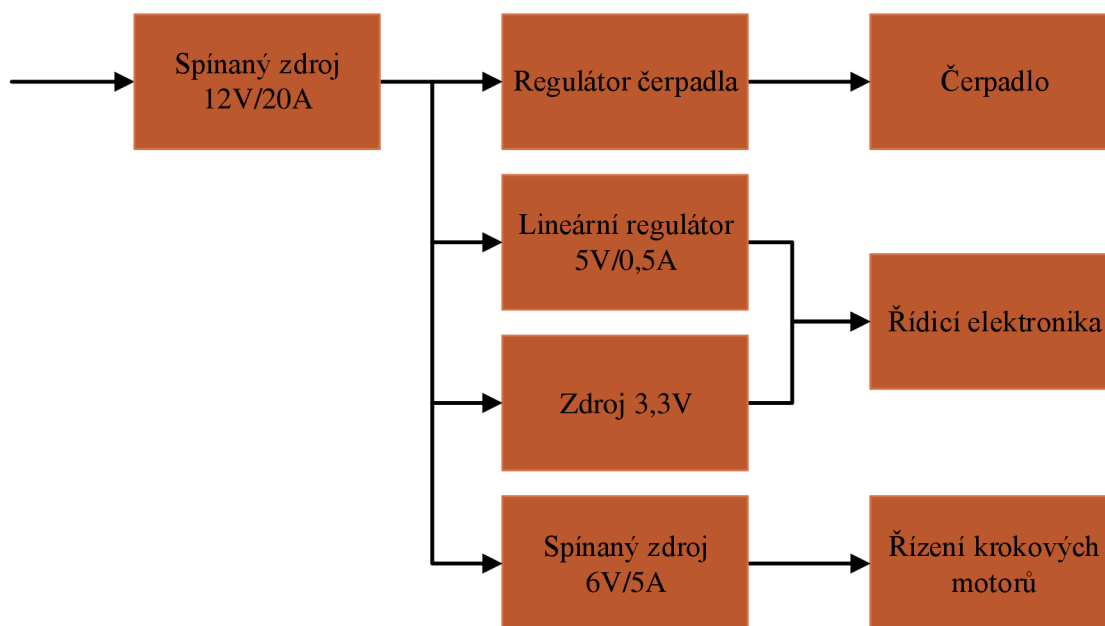
Fotografii realizované řídicí desky je možné vidět na obrázku č. 48. Dvouvrstvá deska plošných spojů byla vyrobena firmou OSH Park a její rozměry jsou 94 x 100 mm. Dále jsou obrázku č. 48 také znázorněny jednotlivé bloky elektroniky. Jednotka servomotorů a konektor pro jejich připojení je znázorněna zeleným ohraničením. Spínaný zdroj, který napájí jednotku servomotorů se nachází ve žluté části. Ovladače krokových motorů jsou dole uprostřed desky v červené oblasti. Nad nimi v tmavě modrém poli se nachází napájecí část pro řídicí elektroniku. V pravo dole pod hlavním přívodem se v oranžovém ohraničení nachází regulátor čerpadla. Komunikační obvody a hlavní řídicí mikrokontrolér se nachází v horní části desky. Konektor pro připojení kamerového modulu a Wi-Fi modul jsou ohraničeny fialovou barvou. Hlavní mikrokontrolér se spolu s USB konektorem a konektory pro připojení senzorů nachází pravo nahoře ve světlemodrém ohraničení.



Obr. 48: Vyrobena řídicí deska robotické ruky

2.2.1 Napájecí část řídicí desky

Pro správnou činnost všech řídicích, komunikačních obvodů a snímačů je nutné zajistit jejich požadované a stabilní napájecí napětí. Celé zařízení je napájeno ze sítě, síťové napětí je přiváděno na spínaný zdroj, který jej snižuje na 12 V. Tento spínaný zdroj byl zakoupen v Číně jako samostatný blok, který je přišroubován na zadní stranu těla robota. Zdroj se nachází v hliníkovém obalu, který zajišťuje jeho dostatečné chlazení a je schopný dodávat proud o velikosti až 20 A. K tomuto zdroji je připojen zbytek zdrojové části robota, který se nachází na řídicí desce. Regulátor čerpadla je napájený 12 V přímo ze spínaného zdroje. Pro řídicí elektroniku je nutné zajistit napájení 5 V a 3,3 V. Servomotory jsou napájeny napětím o velikosti 6 V, které je vytvářeno DC-DC měničem, který by měl být schopen dodat konstantní proud o velikosti až 5 A.



Obr. 49: Blokové schéma zdrojové části

DC-DC měnič s obvodem TPS54531

Servomotory vyžadují pro svoji funkčnost daleko výkonnější zdroj napětí, a proto zde není výhodné používat lineární stabilizátory, neboť jejich účinnost je značně malá a ztrátový výkon by musel být odváděn do okolí pomocí chladiče. Daleko lepší účinnosti lze dosáhnout právě použitím měniče napětí. V tomhle návrhu je použit snižující měnič napětí (step-down), který je tvořen obvodem TPS54531. Schéma zapojení celého měniče je uvedeno na obrázku č. 50.

Měnič má nastaven pevnou spínací frekvenci 570 kHz. Obvod je schopný dodat výstupní proud až o velikosti 5 A. Součástí obvodu je podpěťová ochrana, která se nastavuje děličem složeného z rezistorů R_1 a R_2 . Hodnoty rezistorů lze vypočítat pomocí vzorců č. 9 a 10. Pro rezistor R_2 platí [34]:

$$R_2 = \frac{V_{START} - V_{STOP}}{3\mu A} = \frac{8 - 6}{3\mu A} \cong \underline{665k\Omega} \quad (9)$$

kde V_{START} je napětí při, kterém bude měnič spuštěn, v tomhle případě 8 V, V_{STOP} je napětí při, kterém bude měnič zastaven, v tomhle případě 6 V.

Tzn. že pokud vstupní napětí bude minimálně 8 V měnič se bude nacházet v aktivním režimu. Po přepnutí do aktivního režimu je dále sledována velikost vstupního napětí a pokud jeho velikost klesne pod 6 V bude měnič vypnut. Hystereze je tedy nastavena na 2 V. Rezistor R_1 lze dopočítat podle vztahu [34]:

$$R_1 = \frac{V_{EN}}{\frac{V_{START}-V_{EN}}{R_2}+1\mu A} = \frac{1,25}{\frac{8-1,25}{665k\Omega}+1\mu A} \cong \underline{112k\Omega} \quad (9)$$

kde V_{START} je napětí při, kterém bude měnič spuštěn, v tomto případě 8 V, V_{EN} je dáno výrobcem integrovaného obvodu a to 1,25 V.

Kondenzátor C_8 je doporučován výrobcem jako keramický kondenzátor s dielektrikem X7R nebo X5R a jeho velikost by měla být 100 nF. Hodnota kondenzátoru C_7 určuje dobu soft startu zdroje, kterou lze vypočítat jako [34]:

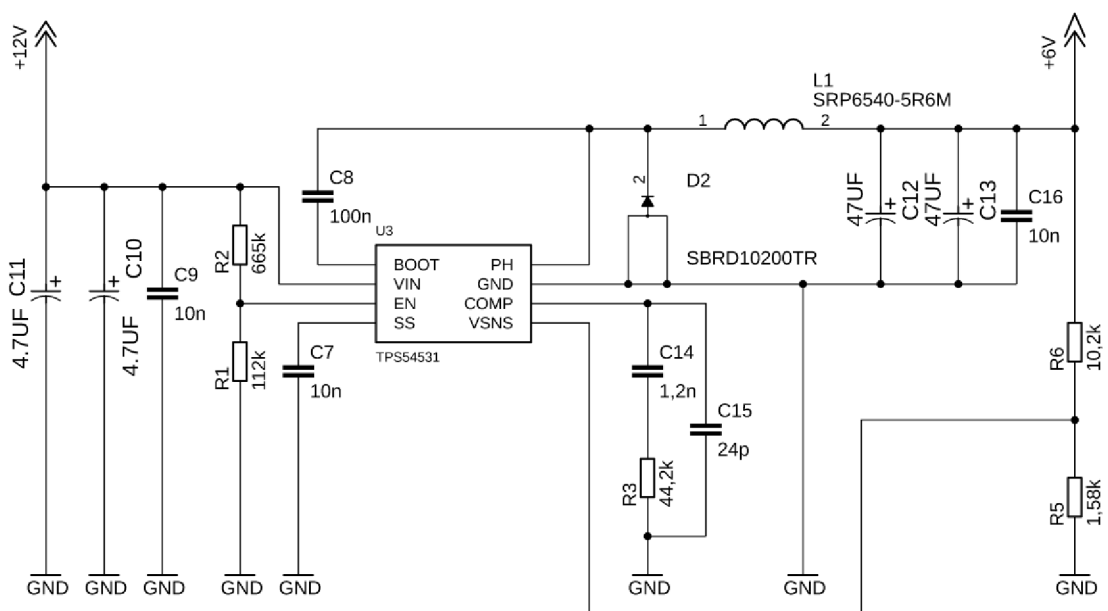
$$T_{SS} = \frac{C_7 \cdot V_{ref}}{I_{SS}} = \frac{10nF \cdot 0,8}{2\mu A} = \underline{4ms} \quad (10)$$

kde V_{ref} je 0,8 V, I_{SS} je 2 μA .

Velikost výstupního napětí je nastavena děličem složeného z rezistorů R_5 a R_6 . Výrobcem doporučená velikost odporu rezistoru R_6 je okolo 10 k Ω , pro tento návrh byla zvolena hodnota 10,2 k Ω . Výstupní napětí zdroje je $V_{OUT} = 6 V$ a referenční napětí dáno výrobcem $V_{REF} = 0,8 V$. Hodnotu rezistoru R_5 je možné určit podle vztahu:

$$R_5 = V_{ref} \left(\frac{R_6}{R_5} + 1 \right) = 0,8 \left(\frac{10,2}{1,58} + 1 \right) = \underline{5,96V} \quad (11)$$

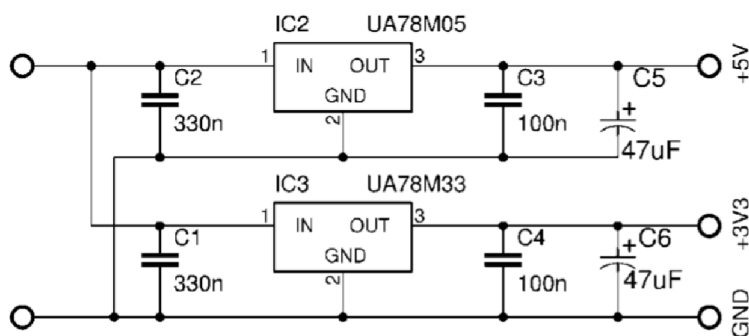
Cívka L_1 a kompenzační součástky C_{14} , C_{15} a rezistor R_3 byly určeny pomocí simulačního programu WEBENCH, který firma Texas Instruments nabízí. Indukčnost cívky L_1 byla stanovena na 5,6 mH. Typ diody D_2 je SK810 a její maximální trvalé proudové zatížení je 8 A.



Obr. 50: Zapojení DC-DC měniče s obvodem TPS54531

Lineární stabilizátory napětí

Napájecí napětí pro řídicí elektroniku mělo být vytvářeno pomocí dvou lineárních stabilizátorů. Jedním z nich je integrovaný obvod UA78M05, který zajišťuje stálé napětí 5 V na jeho výstupu a integrovaný obvod UA78M33, který se měl starat o napěťovou větev 3,3 V. Oba tyto obvody by mělo být možné zatížit odběrem proudu až o velikosti 500 mA. Na obrázku č. 51 je uvedeno zapojení těchto stabilizátorů. Deska plošných spojů je navržena pro osazení integrovaných obvodů v pouzdře TO-252-3.

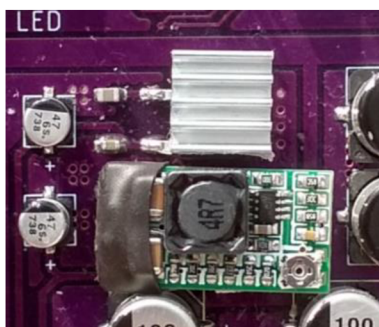


Obr. 51: Zapojení lineárních stabilizátorů napětí

Při praktických testech bylo zjištěno, že stabilizátor napětí UA78M33 se poměrně hodně zahřívá, a to hlavně při zapnuté kameře, která navyšuje proudový odběr o 390 mA. Celkový proudový odběr ze stabilizátoru je převážně dán součtem odběru proudu kamerou, Wi-Fi modulem a hlavním mikrokontrolérem. Proudový odběr Wi-Fi modulu je 80 mA, což znamená, že zbývá pouze 30 mA (do maximálního proudu stabilizátoru) pro hlavní mikrokontrolér a další pomocné obvody. I za předpokladu, že 30 mA je pro zbytek obvodů dostačující, je na stabilizátoru příliš velká proudová ztráta, která způsobuje jeho značné zahřívání. Výkonovou ztrátu na stabilizátoru lze vypočítat:

$$P_{ztrátový} = (V_{in} - V_{out}) \cdot I = (12 - 3,3) \cdot 0,5 = \underline{4,35W} \quad (12)$$

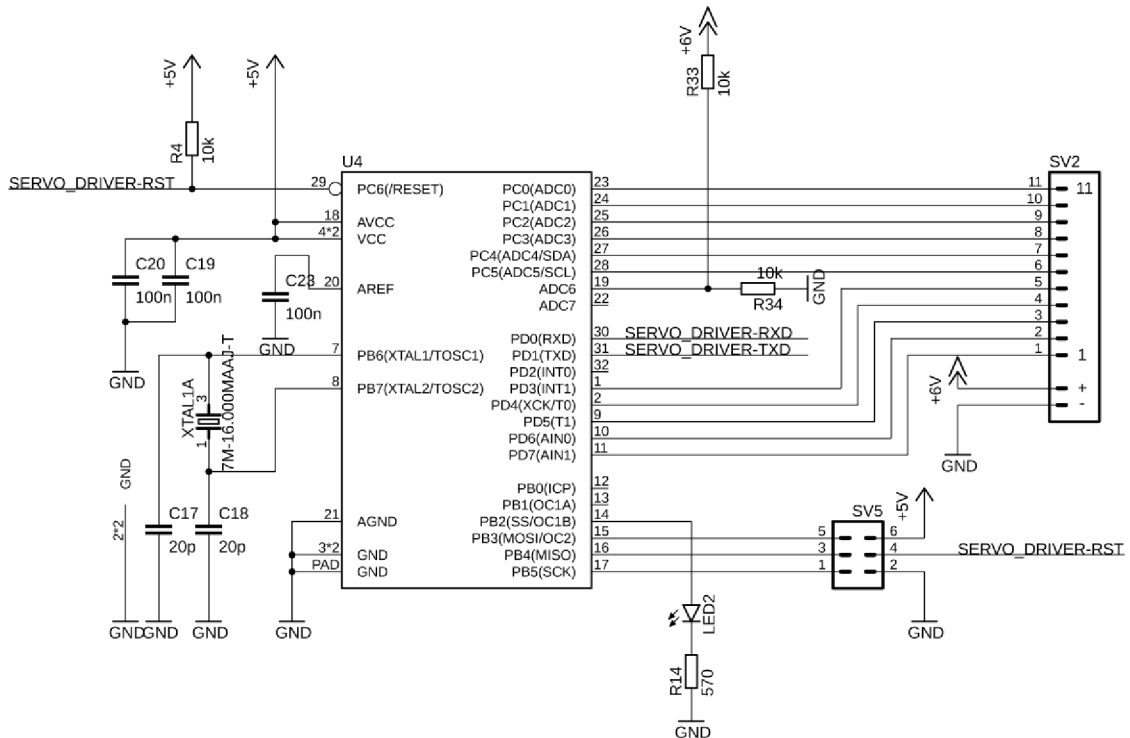
kde V_{in} je vstupní napětí 12 V ze spínaného zdroje, V_{out} je výstupní napětí stabilizátoru tzn. 3,3 V a I je velikost proudu odebíraného ze stabilizátoru 0,5 A. Z důvodu příliš velkého zahřívání stabilizátoru, byl stabilizátor nahrazen miniaturním spínaným zdrojem, který byl osazen na jeho místo (znázorněno za obrázku č. 52) a to bez nutnosti větších zásahů do desky plošných spojů. Tento miniaturní zdroj je schopen dodávat konstantní proud o velikosti až 3 A a jeho hlavní výhodou je daleko větší účinnost, což znamená menší tepelné ztráty.



Obr. 52: Osazení miniaturního spínaného zdroje

2.2.2 Ovládání servomotorů mikrokontrolérem ATmega328P

Generování řídicích impulsů pro servomotory zajišťuje mikrokontrolér ATmega328P, který je zapojený podle obrázku č. 53. Mikrokontrolér komunikuje s řídicí jednotkou pomocí sériového portu. Přes sériový port jsou posílány údaje o natočení, rychlosti, nastavení offsetů servomotorů. K mikrokontroléru může být připojeno až jedenáct servomotorů, prvních šest servomotorů je připojeno na celý port PC, zbylých pět servomotorů je připojeno na piny PD3-PD7. Na vstup ADC6 je přivedeno přes odporový dělič napájecí napětí servomotorů, které je mikrokontrolérem hlídáno.



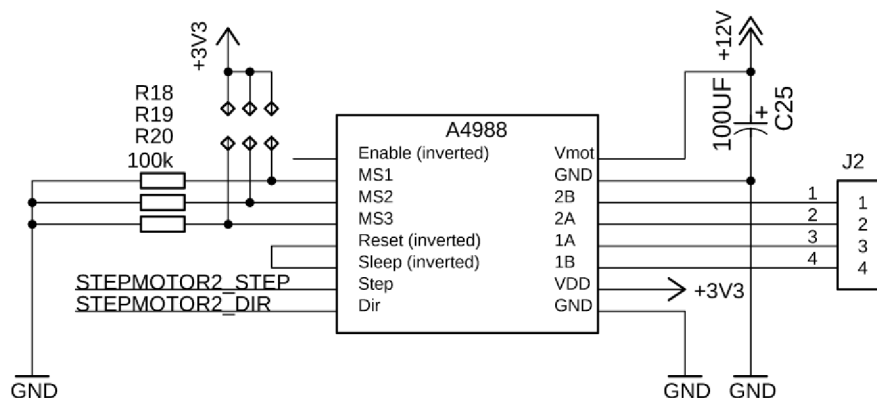
Obr. 53: Zapojení mikrokontroléru ATmega328P

Mikrokontrolér ATmega328P je taktován na frekvenci 16 MHz, která je získávána z extérního krystalu XTAL1. Na konektor SV5 je vyvedeno AVR ISP (In System Programming) rozhraní, pomocí něhož je možné mikrokontrolér programovat. K pinu PB2 je připojena žlutá led dioda, která signalizuje probíhající komunikaci mezi mikrokontrolérem a řídicí jednotkou (STM32F303CCT6) anebo může být využita při debugování programu. Reset mikrokontroléru je připojen k hlavnímu mikrokontroléru, který jej může v případě zaseknutí resetovat.

2.2.3 Řízení krokových motorů

Krokové motory (SX17-1005) jsou ovládány modulem s integrovaným obvodem A4988, které byly zakoupeny v Číně a jsou osazeny na řídicí desce robotické ruky. Celkem se nachází na desce dva tyto moduly a každý z nich řídí jeden z krokových motorů. Zapojení jednoho z modulů je uvedeno na obrázku č. 54. Modul je napájen 12 V ze spínaného zdroje. Sílu krokového motoru je možné nastavit, regulací maximálního proudu, pomocí trimru umístěného na desce plošných spojů modulu. U obou modulů je nastaven maximální proud, který se pohybuje s těmito použitými

motory okolo 0,6 A. Integrované obvody byly opatřeny malým chladičem, který pomáhá zlepšit odvod tepla při jejich zahřívání. Integrovaný obvod A4988 podporuje mikrokrokování, které se nastavuje pomocí vstupů MS1, MS2 a MS3. Tyto vstupy jsou vyvedeny na spodní stranu řídicí desky a je možné jejich vodivým spojením nastavit jeden z režimů mikrokrokování. Propájením všech vstupů je mikrokrokování nastaveno na 1/16 kroku. U obou modulů je v tomto návrhu drobení kroků vypnuto.

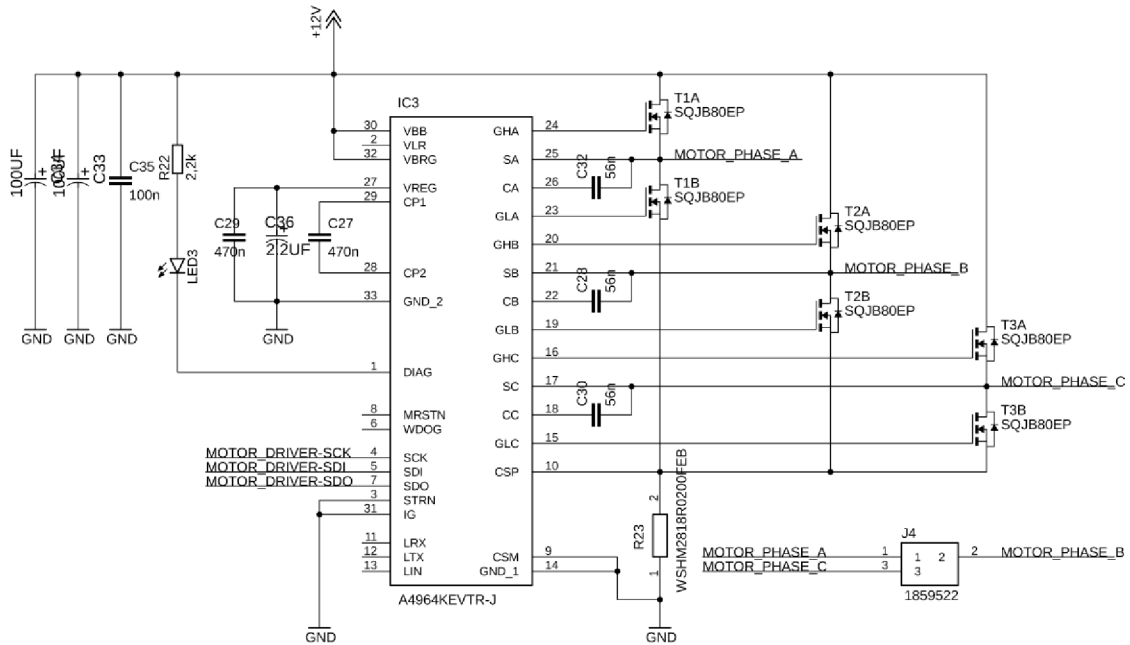


Obr. 54: Zapojení jednoho z driverů krokových motorů

2.2.4 Regulátor hydraulického čerpadla

Hydraulické čerpadlo je poháněno bezkartáčovým motorem A2212 s 1000 ot/V. Motor je napájený napětím o velikosti 12 V z regulátoru hydraulického čerpadla. Tento typ motoru není možné roztočit pouhým připojením na jednu fázi, ale je nutné zajistit správný sled tří fází. Je nutné zdůraznit, že použitý motor neobsahuje snímače pro měření jeho aktuální polohy natočení (např. Hallovy sondy). Většina integrovaných obvodů pro řízení těchto motorů vyžaduje pro správnou činnost právě zpětnou vazbu z Hallových sond. Dalším omezením při hledání správného integrovaného obvodu byla jejich proudová limitace. Motor hydraulického čerpadla má při zatížení proudový odběr až 10 A, proto by bylo velmi vhodné, kdyby integrovaný obvod umožňoval připojení externích MOSFET tranzistorů. Na základě těchto požadavků byl vybrán integrovaný obvod A4964.

Integrovaný obvod A4964 od firmy Allegro je vhodným řešením pro řízení bezkartáčového motoru hydraulického čerpadla, neboť podporuje připojení externích MOSFET tranzistorů a je možné ho ovládat přes sériové periferní rozhraní (SPI). Integrovaný obvod je navržen pro řízení palivových, olejových pump a ventilátorů v automobilovém průmyslu a k jeho funkci není zapotřebí zpětná vazba z Hallových sond. Obvod nabízí několik možných režimů regulace, nastavení rozjezdu motoru, detekci setrvačnosti, proudovou limitaci a několik dalších funkcí, které jsou programovány přes sběrnici SPI. Obvod také nabízí propracovanou diagnostiku, která monitoruje přehřátí čipu, externí můstek tvořený MOSFET tranzistorem, ztrátu synchronizace, podpětí, přepětí a mnoho dalšího. Všechny tyto chyby jsou zaznamenány ve status registru, který je možné pomocí sériového rozhraní přečíst nebo lze využít diagnostický výstup s připojenou led diodou, která dokáže svým blikáním signalizovat některé chyby. Zapojení integrovaného obvodu je uvedeno na obrázku č. 55. Obvod je na desce plošných spojů osazen v pouzdře 32-QFP.



Obr. 55: Zapojení regulátoru hydraulického čerpadla

Můstek je tvořen šesti tranzistory MOSFET s N kanálem. Ke každé fázi jsou připojeny dva tranzistory, přičemž jeden z tranzistorů spíná k napájecímu napětí 12 V ze spínaného zdroje a druhý přes snímací rezistor k zemi. Pro tuhle aplikaci byly vybrány tři duální tranzistory SQJB80EP od firmy Vishay, které se nachází v pouzdře PowerPAK a každý z tranzistorů by mělo být možné při dobrém chlazení zatížit odběrem proudu o velikosti až 30 A. Velikost proudu je měřena snímacím rezistorem R₂₃, který z řady WSHM2818 od firmy Vishay, velikost jeho odporu je 0,02 Ω a jeho zatížitelnost je 7 W. Velikost odporu byla určena tak, aby při průtoku maximálního proudu (10 A), byl na rezistoru úbytek napětí 200 mV, což je prahové napětí pro spuštění proudové ochrany a limitace proudu. Prahové napětí proudové ochrany lze nastavit ze čtyř hodnot: 25 mV, 50 mV, 100 mV a 200 mV, což je defaultní hodnota. Při napěťovém úbytku 200 mV na rezistoru a procházejícím proudem o velikosti 10 A, je na rezistoru výkonová ztráta 2 W. Velikost kapacity kondenzátorů C₃₂, C₃₀, C₂₈ je nutné navrhnout tak, aby nebyla příliš velká, což by mělo za následek omezení maximální střidy a PWM frekvence (doba nabíjení kondenzátoru by byla velká) a zároveň musí být dostatečně velká pro udržení požadovaného napětí na hradle MOS tranzistoru. Kapacitu bootstrap kondenzátorů lze vypočítat podle vztahu [35]:

$$C_{BOOT}(C_{32}, C_{30}, C_{28}) = \frac{Q_{GATE} \cdot 20}{V_{BOOT}} = \frac{32nC \cdot 20}{11} = \underline{56nF} \quad (13)$$

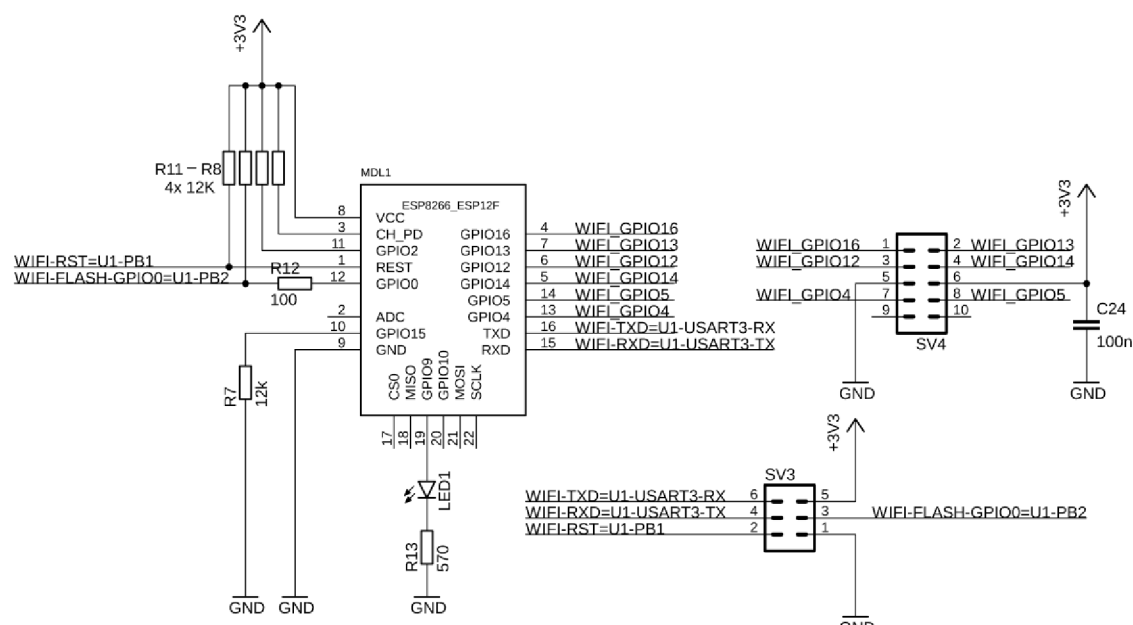
kde Q_{GATE} je náboj hradla jednoho tranzistoru, který je uváděn výrobcem 32 nC a V_{BOOT}, které odpovídá napětí na V_{REG}. Napětí V_{REG} je možné nastavením registru vybírat z hodnot 8 V a 11 V. Dále je nutné na vstup V_{REG} zapojit kapacitu o velikosti minimálně:

$$C_{REG} = 40 \cdot C_{BOOT} = 40 \cdot 56nF = \underline{2,2\mu F} \quad (14)$$

Výrobce integrovaného obvodu doporučuje, aby byla kapacita realizována keramickým kondenzátorem. V případě, že je kapacita příliš velká na keramický kondenzátor je možné použít elektrolytický kondenzátor s nízkým ESR a k němu připojit paralelně keramický kondenzátor s větší kapacitou než 100 nF. Dále je nutné na vstupy CP1 a CP2 zapojit keramický kondenzátor s kapacitou 470 nF pro nábojovou pumpu.

2.2.5 Zapojení Wi-Fi modulu a kamery

Bezdrátová komunikace je zajištěna prostřednictvím Wi-Fi modulu ESP8266, který pracuje v pásmu 2,4 GHz. Wi-Fi modul je napájen napětím o velikosti 3,3 V z DC-DC měniče. Schéma zapojení Wi-Fi modulu je uvedeno na obrázku č. 56. K Wi-Fi modulu je připojen prostřednictvím sběrnic SPI a I²C kamerový modul. Přes sběrnici SPI jsou odesílána data zachyceného obrázku a sběrnice I²C umožňuje řízení kamerového modulu (nastavení rozlišení obrázku, formát dat atd.). Pro správnou činnost Wi-Fi modulu je nutné připojit kromě pinu VCC i piny CH_PD, GPIO2, a to přes rezistor na napájecí napětí. Pin GPIO2 spolu s pinem GPIO0 určuje boot režim modulu. V tomto případě je potřeba pouze dvou režimů, normálního režimu (načtení programu z paměti Flash) a programovacího režimu (nahrání programu pomocí sériového portu), a proto pro výběr režimu stačí ovládat pouze pin GPIO0, který je připojen k hlavnímu mikrokontroléru (STM32F303CCT6). Aby bylo možné modul kdykoliv resetovat, je vstup REST připojen k hlavnímu mikrokontroléru. Komunikace s hlavním mikrokontrolérem probíhá přes sériový port (piny TXD a RXD). Dále byla na port GPIO9 připojena led dioda, která svítí v případě, že je modul v režimu programování.



Obr. 56: Zapojení Wi-Fi modulu a kamery

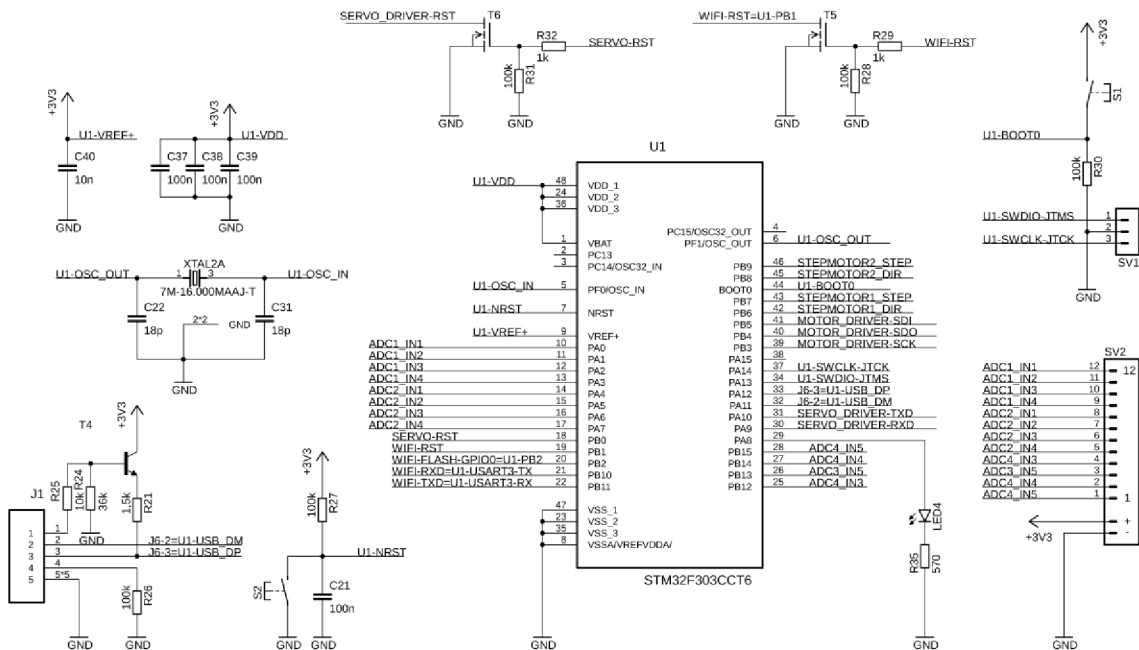
Kamerový modul je zapojen do konektoru SV4. Velikost napájecího napětí kamerového modulu je taktéž 3,3 V, aby byla zajištěna kompatibilita napěťových úrovní s Wi-Fi modulem. Konektor SV3 je určen pro debugování nebo programování Wi-Fi modulu a byl na něj vyveden sériový port, reset a pin pro změnu režimu.

2.2.6 Zapojení mikrokontroléru STM32F303CCT6

Hlavním mikrokontrolérem, který spojuje veškeré dílčí jednotky na řídicí desce, zpracovává data ze snímačů a řídí chod robotické ruky je 32bitový mikrokontrolér STM32F303CCT6. Mikrokontrolér je napájen napětím ze spínaného zdroje o velikosti 3,3 V. Některé jeho vstupy jsou tolerantní k 5 V logice, a právě k nim je připojena řídicí jednotka servomotorů. Mikrokontrolér je taktován na 72 MHz, což je jeho maximální frekvence. Základním zdrojem hodinového signálu je externí krystal (XTAL2) o frekvenci 16 MHz. Uvnitř mikrokontroléru je základní kmitočet nejprve podělen dvěma a poté je pomocí fázového závěsu vynásoben devíti. Mikrokontrolér disponuje USB rozhraním, které je vyvedeno na konektor J1. USB sběrnice je taktována kmitočtem 48 MHz, který je získán z fázového závěsu a následně podělen 1,5krát.

Dále jsou k mikrokontroléru připojena dvě tlačítka S1 a S2. Tlačítko S1 slouží pro uvedení mikrokontroléru do programovacího režimu a tlačítko S2 k jeho resetu. Připojena je také jedna led dioda (LED4), která je využívána při ladění programu. V případě normálního režimu signalizuje blikáním bezchybný chod programu.

Na konektor SV1 je vyvedeno SWD rozhraní mikrokontroléru a slouží k připojení ST-LINKu, pomocí něhož je možné nahrávat a debugovat program. Konektor SV2 je využíván pro připojení všech snímačů robotické ruky. Na tento konektor byly vyvedeny vstupy ADC převodníků mikrokontroléru, což znamená, že ho lze využít jako analogový (pro spojitě analogové snímače polohy např. potenciometry) i jako digitální (magnetický senzor přiblížení) vstup.



Obr. 57: Zapojení mikrokontroléru STM32F303CCT6

2.3 Firmware řídicí desky robotické ruky

Tato kapitola je věnována naprogramovanému firmwaru všech mikrokontrolérů, které se nachází na řídicí desce, a možnostmi jejich nahrání do příslušných mikrokontrolérů. Hlavním programovacím jazykem, ve kterém byla většina firmwaru napsána byl jazyk C. Pouze firmware pro Wi-Fi modul byl naprogramován v jazyce C++ s použitím platformy Arduino.

2.3.1 Možnosti nahrávání firmware do mikrokontrolérů

Návrh řídicí desky byl od začátku směřován tak, aby bylo možné nahrát firmware do jednotlivých mikrokontrolérů (Wi-Fi modulu, řídicí jednotky servomotorů atd.) pomocí USB portu, který je umístěný na řídicí desce. Port USB má dva režimy, a to buď DFU (Direct Firmware Upgrade) režim nebo představuje virtuální sériový port.

Nahrání firmwaru do hlavního mikrokontroléru STM32F303CCT6

Tento mikrokontrolér obsahuje již z výroby bootloader, který podporuje nahrávání firmwaru přes USB port, anebo jedním ze sériových portů. Přepnutí mikrokontroléru do nahrávacího módu se provádí podržením tlačítka flash na řídicí desce a následným stisknutím tlačítka reset. Poté se USB port nachází v režimu DFU a je možné pomocí příslušného programu nahrát firmware. Například volně dostupný program dfu-util, který byl v tomto projektu použit.

Další možností je využití SWD rozhraní, které je vyvedeno na konektoru vedle USB portu. Tohle rozhraní slouží převážně k ladění programu, umožňuje krokování programu, nahlédnutí do registrů a paměti mikrokontroléru v reálném čase. Rozhraní má pouze dva základní vývody SWDIO (data vstup/výstup) a SWCLK (hodinový vstup). K SWD rozhraní je možné připojit např. USB adaptér ST-LINK V2.

Nahrání firmwaru do řídicí jednotky servomotorů

Do mikrokontroléru ATmega328P byl nahrán pomocí AVR ISP (In System Programming) rozhraní bootloader, který umožňuje programování mikrokontroléru pomocí sériového portu. Toto rozhraní je vyvedeno na konektoru na řídicí desce a použitým programátorem byl USBasp. Použití AVR ISP programátoru je jedním z možných způsobů, který lze pro nahrávání firmwaru využít, a to hlavně v případě problémů s nahráváním přes bootloader.

Programování pomocí bootladeru probíhá přes sériový port mikrokontroléru (ATmega328P), který je připojen k hlavnímu mikrokontroléru řídicí desky (STM32F303). USB port umístěný na řídicí desce je v normálním stavu nastaven jako virtuální sériový port. Pro zahájení programování mikrokontroléru servomotorů je nutné na tento virtuální sériový port odeslat posloupnost bajtů „0xC026CD0C“, která zařídí přepnutí hlavního mikrokontroléru do režimu mostu mezi sériovým portem mikrokontroléru servomotorů a virtuálním sériovým portem. Poté je možné využít program, který umožňuje nahrávání firmwaru přes sériový port například program avrdude.

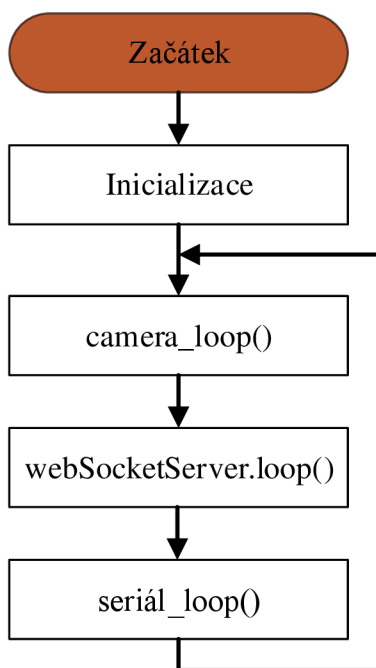
Nahrání firmwaru do Wi-Fi modulu

Wi-Fi modul obsahuje také bootloader, který je nahrát již z výroby a umožňuje taktéž nahrání firmwaru do paměti přes sériový port. Stejně jako u programování mikrokontroléru servomotorů je opět využito mostu mezi virtuálním sériovým portem a sériovým portem Wi-Fi modulu. Aktivace mostu se provádí odesláním bajtu „0xC026AB0C“ na virtuální sériový port, jakmile bude Wi-Fi modul přepnut do režimu programování, rozsvítí se modrá dioda u Wi-Fi modulu. Nahrávání firmwaru, popřípadě jiná komunikace s Wi-Fi modulem, se provádí pomocí programu esptool.

V případě problémů je sériový port Wi-Fi modulu spolu s resetem a boot vstupem, který umožňuje uvést Wi-Fi modul do programovacího režimu, vyveden na konektor vedle modulu na řídicí desce. Použitím tohoto konektoru je možné přímé napojení na sériový port, který lze pomocí vhodného UART převodníku připojit k PC.

2.3.2 Firmware Wi-Fi modulu

Blokové schéma hlavní programové smyčky je znázorněno na obrázku č. 58. Po spuštění je nejprve provedena inicializace periférií, nastavení Wi-Fi modulu jako přístupový bod, spuštění WebSocket serveru a nastavení kamerového modulu (formát obrázku, rozlišení atd.). Následuje vstup do hlavní programové smyčky, nejprve je volána funkce `camera_loop()`, která v případě aktivní kamery, komunikuje s kamerovým modulem a získává data snímaných obrázků, které jsou následně posílány prostřednictvím protokolu WebSocket poslednímu uživateli, který kameru aktivoval. Metoda `websocketServer.loop()` je volána pro zpracování komunikace mezi uživateli a Wi-Fi modulem prostřednictvím protokolu WebSocket, který běží na portu 81. Přes tento protokol probíhá veškerá komunikace s uživatelem (příjem povelů, odesílání snímků z kamery atd.). Metoda `serial_loop()` zajišťuje komunikaci mezi Wi-Fi modulem a řídicí deskou, která probíhá přes sériový port.



Obr. 58: Vývojový diagram hlavní programové smyčky Wi-Fi modulu

2.3.3 Firmware mikrokontroléru servomotorů ATmega328P

Firmware pro mikrokontrolér řídicí jednotky servomotorů ATmega328P byl naprogramován v jazyce C s využitím Atmel Studia 7. Hlavním úkolem tohoto mikrokontroléru je generování řídicích impulzů pro řízení servomotorů. Na obrázku č. 59 je uveden vývojový diagram hlavní programové smyčky a přerušení jednoho z čítačů.

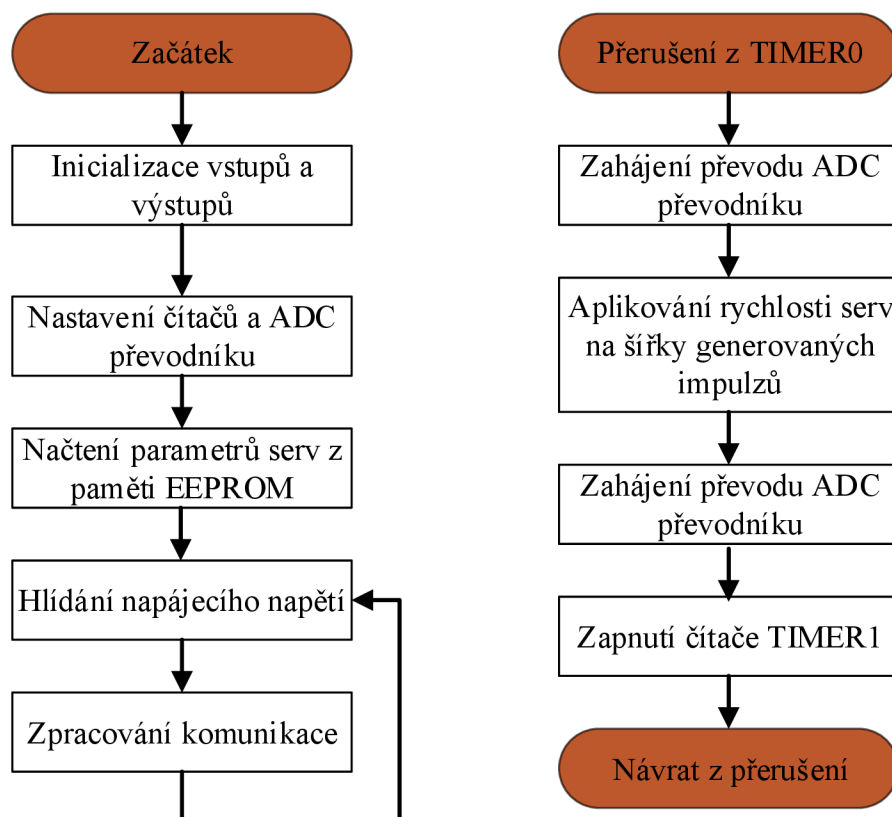
Program začíná inicializací vstupů a výstupů, převážně se jedná o výstupy, na které jsou připojeny na servomotory. Dále je provedeno nastavení ADC převodníku, který zajišťuje měření velikosti napájecího napětí servomotorů. Následně dochází k nastavení dvou čítačů, které jsou použity TIMER0 a TIMER1. Poté jsou načteny parametry servomotorů (počáteční poloha, rychlost, limity, offset) z paměti EEPROM. Pro uložení těchto hodnot bylo vytvořeno pole servos[9], složené ze struktury Servo.

```
struct Servo{
    uint16_t actual_pos;
    uint16_t req_pos;
    uint16_t default_pos;
    uint16_t max;
    uint16_t min;
    uint16_t offset;
    uint8_t speed;
    uint8_t port_mask;
    uint16_t pulse_width;
}servos[9];
```

Proměnná actual_pos obsahuje aktuální polohu serva, req_pos je proměnná, která udržuje polohu, na kterou se má servo natočit. Počáteční poloha je uložena v proměnné default_pos. V proměnných min a max jsou uloženy maximální a minimální polohy servomotoru, které je možné do požadované polohy nastavit. Každý servomotor má také uloženou svoji rychlost v proměnné speed a svůj offset, který je automaticky přičítán k požadované poloze. Proměnná port_mask obsahuje masku pro adresaci daného servomotoru. Pulse_width je proměnná, která ukládá reálnou hodnotu (šířku impulzu) pro daný servomotor a je používána pro nastavení časovače TIMER1.

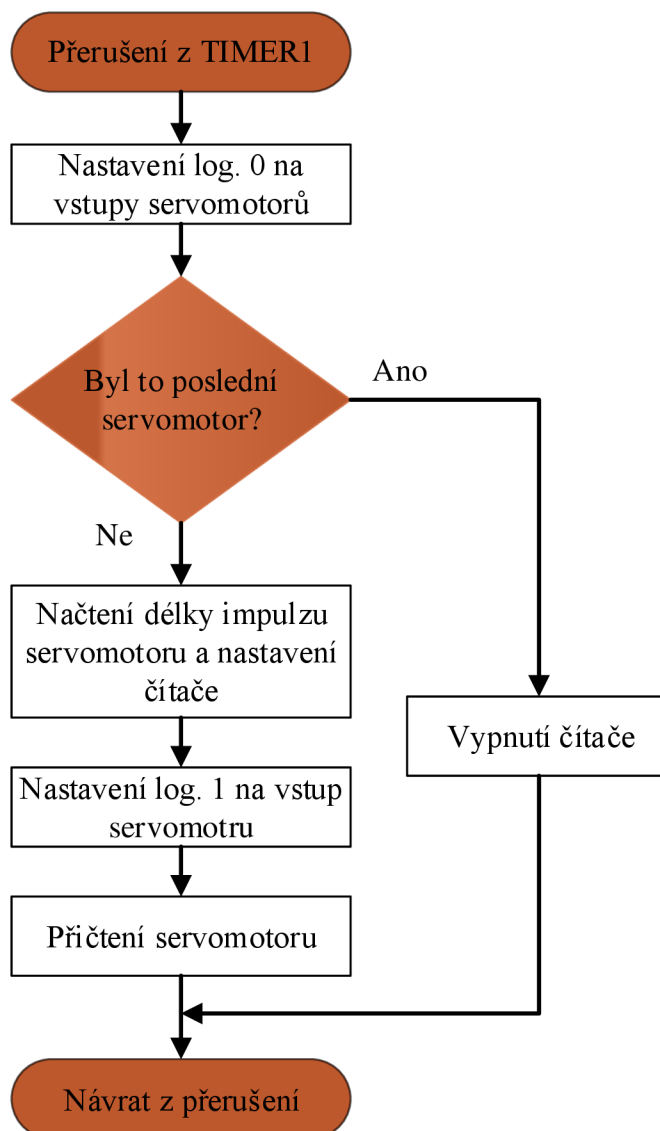
Časovač TIMER0 má pevně danou periodu, při které dochází k jeho přetečení. Tato perioda je dána: $T = 9 \cdot 2,5 \text{ ms} = 22,5 \text{ ms}$. Počet servomotorů je devět a jejich maximální délka impulzu je 2,5 ms. Úkolem tohoto čítače je zapínání čítače TIMER1, který generuje řídicí signály pro servomotory. Čítač TIMER1 se po obslužení všech servomotorů sám vypne, a to nezávisle na délkách generovaných impulzů. A z tohoto důvodu je v dané frekvenci zapínám čítačem TIMER0, což vede ke stabilizaci frekvence impulzů. Při přetečení čítače TIMER0 také dochází ke spuštění ADC převodníku, který je připojen na napájecí napětí servomotorů. Další využití čítače TIMER0 je pro regulaci rychlosti servomotorů, při každém přetečení dochází k rozšíření impulzu, dokud impulz nedosáhne požadované šířky (požadovaná poloha servomotoru). Velikost rozšíření impulzu je dána nastavenou rychlostí serva.

Hlavní smyčka programu se skládá pouze z hlídání velikosti napájecího napětí servomotorů a v případě podpětí informuje hlavní mikrokontrolér přes sériový port. Dále je zpracovávána komunikace s hlavním mikrokontrolérem, která probíhá přes sériový port s rychlostí přenosu 57600 baud.



Obr. 59: Vývojový diagram hlavní programové smyčky mikrokontroléru servomotorů

Čítač TIMER1 zajišťuje generování řídicích impulzů pro servomotory, algoritmus tohoto generování je znázorněn vývojovým diagramem na obrázku č. 60. Mějme případ, kdy generování začíná od prvního servomotoru. Čítač TIMER1 je spuštěn při přetečení čítače TIMER0 a téměř okamžitě dochází k přerušení od čítače TIMER1. Jako první dojde k resetování všech výstupů servomotorů. Dále je zjišťováno, jestli se jedná o poslední servomotor a případně má být čítač vypnut. Nejedná, a proto program pokračuje dále, dochází k načtení šířky impulzu servomotoru a nastavení čítače na tuto hodnotu, poté je nastavena vysoká úroveň na vstup prvního servomotoru. Následně dochází k přičtení proměnné, které adresuje následující servomotor, a je proveden návrat z přerušení. Čítač TIMER1 nyní počítá do hodnoty, která odpovídá šířce impulzu pro první servomotor, po jeho přetečení je opět vyvoláno přerušení, výstupy mikrokontroléru jsou resetovány a proces se opakuje pro druhý servomotor. Celý cyklus se opakuje, dokud není obslouženo všech devět servomotorů a čítač TIMER1 není vypnut.



Obr. 60: Vývojový diagram generování řídicích impulzů pro servomotory

2.3.4 Firmware hlavního mikrokontroléru STM32F303CCT6

Firmware pro mikrokontrolér STM32F303 byl naprogramován v jazyce C ve vývojovém prostředí TrueSTUDIO, které je volně ke stažení. Dále byl použit program STM32CubeMX, který umožňuje vygenerování „šablony“ programu, ve které jsou nastaveny vstupní a výstupní porty, taktovací frekvence, režimy čítačů atd.

Mikrokontrolér se stará o ovládání krokových motorů, zpracovávání dat ze snímačů, zařizuje komunikaci mezi Wi-Fi modulem a řídicí jednotkou servomotorů. Při programování byl použit operační systém FreeRTOS a ovladače HAL_Drivers, které umožňují snazší přístup k perifériím mikrokontroléru.

Operační systém FreeRTOS je volně šiřitelný a je využíván převážně v menších vestavěných (embedded) zařízeních. Jedná se o operační systém reálného času a při jeho vývoji je kladen důraz na jeho snadnou použitelnost a nízkou paměťovou náročnost. V základní verzi, která byla v tomto projektu použita, představuje operační systém pouze vlastní plánovač se správou úloh tzn. komunikaci, časování a synchronizaci mezi úlohami. Jednotlivým úlohám lze přiřazovat priority a jejich

počet není softwarově omezen. Úlohy jsou spravovány pomocí řídicích bloků (Task Control Block) a tento blok obsahuje důležité informace pro jádro operačního systému.

Program je rozdělen do čtyř vláken. Dvě z vláken se starají o řízení krokových motorů, jedno vlákno je určeno pro zpracování komunikace a řízení ventilů pístnic. Poslední vlákno je debugovací, které je využíváno při testování a ověřování programu.

Využívané periférie mikrokontroléru

Komunikace mikrokontroléru s ostatními prvky probíhá přes dva sériové porty (USART1 a USART 3) a jednu SPI sběrnici (SPI1). Sériový port USART1 zprostředkovává komunikaci s řídicí jednotkou servomotorů a jeho přenosová rychlost je nastavena na 57600 baud. Odesílání a příjem dat probíhá v blokovacím režimu a příchozí data jsou vyhodnocována ihned (většinou se jedná o pouhé potvrzení o přijetí dat). Druhý sériový port USART3 je připojen k Wi-Fi modulu a komunikuje s ním rychlostí 115200 baud. Zde je datový tok poněkud větší, přijatá data jsou ukládána do kruhového bufferu a jejich zpracování probíhá až v komunikačním vlákně metodou `roboticHand_CommunicationHandler`. Sběrnice SPI1 je využívána při komunikaci s kontrolérem hydraulické pumpy (integrováný obvod A4964) a délka vysílaných a přijímaných dat je 16bitů, frekvence hodinového signálu sběrnice je 281,25 kHz.

Dalšími z periférií mikrokontroléru, které jsou využívány, jsou ADC převodník (ADC1) a DMA řadič (DMA1) spolu s časovačem TIM6. Časovač slouží ke spouštění ADC převodníku a jeho perioda je nastavena na 200 μ s. Rozlišení ADC převodníku je nastaveno na 10 bitů a jsou využívány jeho tři kanály, na které jsou připojeny snímací potenciometry pro určování polohy. K převodníku je připojen DMA řadič, který zajišťuje přímý přístup do paměti a umožňuje tak ukládání naměřených hodnot bez využití procesoru. V případě, že je uloženo 300 naměřených hodnot (100 hodnot z každého kanálu ADC převodníku), je vyvoláno přerušení DMA řadičem. V tomto přerušení jsou hodnoty z každého kanálu zprůměrovány a výsledné tři hodnoty jsou uloženy do paměti. Tyto hodnoty jsou poté využívány pro určení polohy pístů hydraulických válců.

Další periférií je časovač TIM7, který je využit při ovládání jednotlivých článků prstů na robotické ruce. Poloha článků prstů není snímána žádným senzorem a je určována dobou otevření ventilu hydraulického válce. A právě tato doba je měřena časovačem TIM7 s rozlišením 20 ms.

Poslední využívanou periférií je USB port, který je využíván při ladění programu, kalibraci ventilů a dalších částí robotické ruky. Pro snazší nastavování ventilů, krokových motorů a podobně, byl naprogramován program pro PC, jenž se k robotické ruce připojuje právě prostřednictvím tohoto USB rozhraní.

Struktura programu a knihovny

Program začíná v souboru `main.c`, kde je definována většina z využívaných periférií a jejich inicializační funkce. V tomto souboru se také nachází základní

funkce main, která začíná inicializací všech komponentů, následně jsou vytvořeny čtyři základní vlákna.

Program je rozdělen do několika souborů, přičemž hlavním z nich je roboticHand.c, zbylé soubory jsou většinou knihovny k ovládání ostatních jednotek. Například wifi.c, oilPumpDriver.c nebo servo_driver.c zde jsou napsány jednotlivé funkce pro snazší ovládání vnějších periférií na řídicí desce. V souboru roboticHand.c se nachází funkce pro zpracování komunikace, nastavení polohy pístů, gesta a podobně. Obsluha přerušení z DMA radiče a zpracování dat o poloze jednotlivých pístů se nachází v souboru potentiometerSensors.c, kde je také nastavení parametrů ADC převodníků a jeho kanálů.

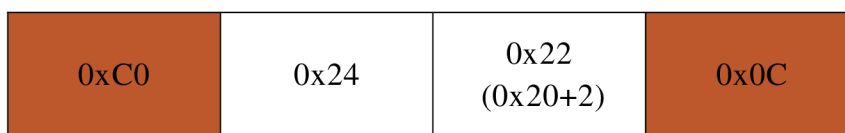
Komunikace s hlavním mikrokontrolérem

Komunikace s řídicí jednotkou probíhá ve čtyřbajtových rámcích. Prvním bajtem je začáteční bajt, který má hodnotu 0xC0. Následuje hlavní bajt, který z pravidla udává, která část robota nebo jednotka bude řízena (např. řízení krokových motorů). Následně vedlejší bajt specifikuje konkrétní úkon (např. kalibrace). Rámec končí koncovým bajtem, který má hodnotu 0x0C. V tabulce č. 13 jsou uvedeny některé dvoubajtové příkazy. Všechny příkazy lze nalézt v souboru roboticHand.h.

Tab. 13: Příkazy hlavního mikrokontroléru – dvoubajtové

		Hlavní bajt	Vedlejší bajt
Řízení krokových motorů	Kalibrace	0x21	0x04 + motor
	Zastavení motoru		0x10 + motor
Ovládání prstů	Otevření prstu	0x24	0x10 + prst
	Zavření prstu		0x20 + prst
	Gesto		0x30 + gesto
Ovládání hydraulického čerpadla	Spuštění	0x22	0xAA
	Zastavení		0xFF

Příklad rámce příkazu pro zavření druhého prstu na robotické ruce je uveden na obrázku č. 61.



Obr. 61: Příklad komunikačního rámce pro dvoubajtový příkaz

Pro nastavování polohy pístů, offsetů ventilů, polohy krokových motorů nebo rychlosti čerpadla je potřeba využít čtyřbajtových příkazů. Tyto příkazy se posílají jako dva dvoubajtové příkazy za sebou. Některé čtyřbajtové příkazy jsou uvedeny v tabulce č. 14.

Tab. 14: Příkazy hlavního mikrokontroléru – čtyřbajtové

H – více významný bajt L – méně významný bajt		Hlavní bajt	Vedlejší bajt
Řízení krokových motorů	Nastavení polohy	0x21	0x08+motor
		poloha H	poloha L
	Nastavení rychlosti	0x21	0x0C+motor
		rychlost H	rychlost L
Nastavení polohy pístů		0x23	píst (0-8)
		poloha H	poloha L
Ovládání hydraulického čerpadla	Nastavení rychlosti	0x22	0xBB
		rychlost H	rychlost L
Přímé řízení ventilů	Nastavení otevření	0x20	ventil (0-8)
		otevření H	otevření L
	Nastavení rychlosti	0x15	ventil (0-8)
		rychlost H	rychlost L
	Nastavení offsetu	0x13	ventil (0-8)
		offset H	offset L

Příklad rámce příkazu pro nastavení polohy druhého krokového motoru na hodnotu 1234 (0x04D2) je uveden na obrázku č. 62.

první rámec	0xC0	0x21	0x0A (0x08+2)	0x0C
druhý rámec	0xC0	0x04	0xD2	0x0C

Obr. 62: Příklad komunikačního rámce pro dvoubajtový příkaz

2.4 Návrh ovládací rukavice

Tato kapitola se zabývá návrhem ovládací rukavice. Ovládací rukavice byla navržena tak, aby bylo možné robotickou ruku snadněji a pohodlněji ovládat. Součástí ovládací rukavice je pět ohybových senzorů, které snímají polohu lidských prstů. Dále je rukavice vybavena gyroskopem a akcelerometrem pro měření polohy lidské ruky. Komunikace s robotickou rukou probíhá skrze smartphone, ke kterému je bezdrátově prostřednictvím Bluetooth ovládací rukavice připojena. Ve smartphonu musí být nainstalována aplikace pro ovládání robotické ruky. Součástí ovládací rukavice je i nabíjecí baterie, která napájí řídicí desku a snímače.

Na obrázku č. 63 je fotografie realizované ovládací rukavice. Základem je obyčejná pracovní rukavice, která má na každém prstu pevně přišit jeden ohybový senzor. Deska plošných spojů zasunuta a přišroubována k držáku, který byl vytisknut na 3D tiskárně a je umístěn uprostřed rukavice. Držák desky plošných spojů je k rukavici pevně přilepen. Pro upevnění baterie byl taktéž vytisknut držák, který je s rukavicí spojen pomocí suchého zipu, aby bylo možné v případě problému celou elektroniku jednoduše z rukavice vyjmout. Ovládací rukavice je zapínána spínačem, který je umístěn u zápěstí na držáku baterie.



Obr. 63: Realizovaná ovládací rukavice

2.4.1 Realizace snímače ohybu

Pohyby jednotlivých prstů uživatele jsou snímány pomocí pěti ohybových senzorů. Úkolem těchto snímačů je převádět pohyb na elektrickou veličinu, kterou je poté možné vyhodnocovat. Takovýchto senzorů není na trhu příliš mnoho a jejich cena je poměrně vysoká, a proto byl v tomto projektu snímač ohybu vyroben.

Na obrázku č. 64 jsou zobrazeny hlavní použité materiály a vpravo se nachází zhotovený ohybový snímač. Základem snímače jsou dva měděné pásy

o rozměrech 8x120 mm. Na každý z těchto měděných pásků byl napájen jeden z vývodů snímače. Mezi tyto pásky byl vložen carbostat, což je trvale vodivý materiál s příměsí uhlíku a s povrchovou rezistivitou v rozmezí 10^4 – 10^5 Ω . Pásek carbostatu byl získán ze sáčku určeného pro balení elektrostaticky citlivých součástek. Rozměry pásky carbostatu musí být větší než měděných pásků, aby bylo zajištěno, že měděné pásky nebudou mezi sebou spojeny. Takto vytvořená struktura je slepena průhlednou kancelářskou lepicí páskou a je umístěna do smršťovací bužírky.



Obr. 64: Vyrobený senzor ohybu

Tento typ snímače je založen na změně elektrického odporu mezi jeho vývody. V narovnaném stavu se odpor snímače pohybuje okolo 300 k Ω , tato hodnota je vysoce závislá na zhotovení snímače a to na: rozměrech snímače, tlaku mezi měděnými pásky, který je způsoben spojením struktury dohromady a také na teplotě. Při ohýbání snímače hodnota odporu klesá, a to až na hodnotu 8 k Ω , při jeho plném ohnutí. Přesnou závislost odporu snímače na jeho ohybu lze při této realizaci určit jen s těží. Snímač je použit pouze pro detekci ohnutí a narovnání prstu.

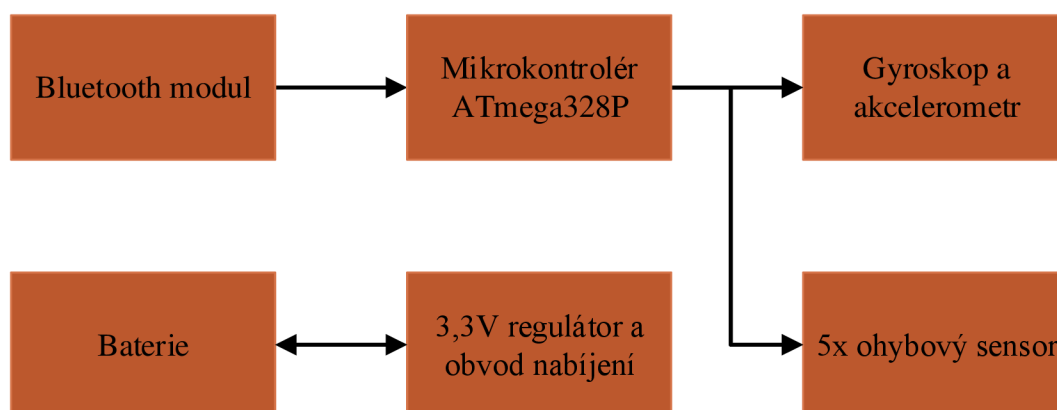
2.4.2 Řídicí deska ovládací rukavice

Řídicí deska ovládací rukavice má za úkol zpracovávat a odesílat data ze senzorů. Blokové schéma je uvedeno na obrázku č. 65.

Odesílání dat ke smartphonu probíhá bezdrátově prostřednictvím Bluetooth modulu, který je přes sériový port připojen k mikrokontroléru ATmega328P. Rychlost komunikace mezi Bluetooth modulem a mikrokontrolérem je nastavena na 57600 baud.

Mikrokontrolér ATmega328P je napájen napájecím napětím o velikosti 3,3 V a je taktován vnitřním oscilátorem na systémovou frekvenci 8 MHz. Ohybové snímače jsou zapojeny jako děliče napětí a výstupy těchto děličů jsou přivedeny na vstupy ADC převodníku mikrokontroléru. Modul gyroskopu a akcelerometru komunikuje s mikrokontrolérem prostřednictvím sběrnice I²C. Dále je k mikrokontroléru

připojeno tlačítko a žlutá LED dioda, která svým rozsvícením signalizuje připravenost rukavice.



Obr. 65: Blokové schéma řídicí desky ovládací rukavice

Ovládací rukavice je napájena lithiium-polymerovým (Li-pol) akumulátorem se jmenovitým napětím 3,7 V a kapacitou 500mAh. Nabíjení baterie se provádí prostřednictvím USB portu a jeho průběh je signalizován červenou LED diodou (při aktivním nabíjení LED dioda svítí). Velikost nabíjecího proudu a ochranu proti přepětí zajišťuje integrovaný obvod MCP73831. Tento integrovaný obvod je přímo určený pro nabíjení Lip-pol článků přes USB port. Maximální nabíjecí proud je nastavován velikostí rezistoru připojeného na vstup PROG integrovaného obvodu. V tomto případě je nabíjecí proud 500 mA nastaven velikostí rezistoru 2 k Ω .

Konstantní napětí o velikosti 3,3 V pro napájení elektroniky ovládací rukavice je z baterie získáváno napěťovým regulátorem XC6210B332MR.

USB port slouží kromě nabíjení také k programování a debugování mikrokontroléru. Mikrokontrolér ATmega328P nemá vlastní USB rozhraní, a proto je k němu přes sériový port připojen převodník FT234XD-R.

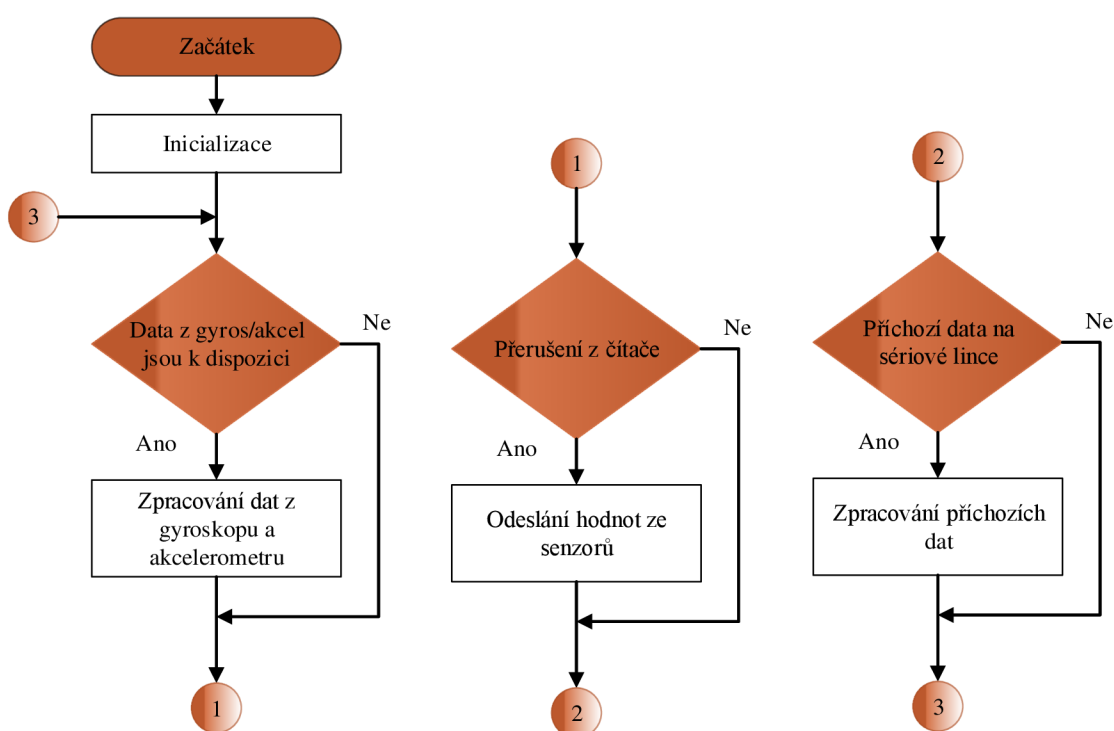
Dvouvrstvá deska plošných spojů byla vyrobena firmou OSHPARK. Osazená deska plošných spojů je uvedena na obrázku č. 66 a její rozměry jsou 40x35 mm. Při návrhu byly použity integrované obvody v pouzdře typu QFN a SMD součástky v pouzdře 0402.



Obr. 66: Zhotovená řídicí deska ovládací rukavice

2.4.3 Firmware řídicí desky ovládací rukavice

Hlavním úkolem programu mikrokontroléru je číst data ze senzorů a odesílat je prostřednictvím Bluetooth modulu. Firmware mikrokontroléru je napsán v jazyce C a C++. Program ovládací rukavice je v podstatě velice jednoduchý a vývojový diagram hlavní programové smyčky je uveden na obrázku č. 67. Začátkem je samozřejmě inicializace, při které dojde k nastavení veškerých využívaných periférií mikrokontroléru a navázání komunikace s modulem MPU6050 (akcelerometr a gyroskop). Následuje hlavní programová smyčka, jako první je zjišťováno, zda nedošlo k extérnímu přerušení (INT0) ze strany modulu MPU6050 a nejsou k dispozici nová data, která by mohla být případně zpracována. Dalším rozhodováním je, zda bylo vyvoláno přerušení od časovače TIMER2, v případě, že přerušení nastalo, jsou odeslána data ze senzorů. Jako poslední je zjišťován možný příjem příchozích dat na sériové lince a jejich případné vyhodnocení.



Obr. 67: Vývojový diagram hlavní programové smyčky ovládací rukavice

Jednou z využitých komunikačních periférií je sériový port, který je nastaven na 8bitový formát s jedním stop bitem a žádnou paritou. Přenosová rychlost je nastavena na 57600 baud. Dále je využívána jedna I²C sběrnice pro komunikaci s modulem MPU6050 s hodinovým signálem o frekvenci 400 kHz.

Další využívanou periférií mikrokontroléru je ADC převodník, na jehož kanály jsou připojeny ohybové senzory. Je využito celkem pět kanálů převodníku a jejich rozlišení převodu je nastaveno na 10bitů.

Poslední periférií je časovač TIMER2 v režimu CTC (Clear Timer on Compare), tzn. pokud čítač dosáhne hodnoty stejné nebo větší, než je hodnota porovnávaná, dojde k jeho resetování a vyvolání přerušení. Porovnávaná hodnota je nastavena na 255 a frekvence přičítání registru čítače je 7812,5 Hz. Z toho plyne, že přerušení je vyvoláno každých 32,64 ms (255/7812,5). Každé vyvolané přerušení čítačem

znamená odeslání rámce po sériovém portu k Bluetooth modulu s hodnotami snímačů. Struktura rámce je uvedena na obrázku č. 68 jeho šířka je 24 bajtů a začíná start bajtem s hodnotou 0xC0 a končí stop bajtem s hodnotou 0x0C. Hodnoty všech snímačů jsou 16bitové a nejprve je posílána spodní polovina bitů a až poté vrchní. Po odeslání start bajtu, jsou posílány hodnoty z ohybových snímačů, poté následují úhly natočení rukavice a její akcelerace v osách x, y a z.

0xC0	P0_L	P0_H	P1_L	P1_H	P2_L	P2_H
	P3_L	P3_H	P4_L	P4_H	Yaw_L	Yaw_H
	Pitch_L	Pitch_H	Roll_L	Roll_H	AccelX_L	AccelX_H
	AccelY_L	AccelY_H	AccelZ_L	AccelZ_H	0x0C	

Obr. 68: Struktura rámce posílaného ovládací rukavici

2.5 Návrh řídicího softwaru

V této kapitole je probrán navržený ovládací software robotické ruky. Hlavním ovládacím programem je aplikace pro operační systém Android. Dále byla pro zjednodušení ladění a k ověření funkčnosti jednotlivých komponentů robotické ruky naprogramována aplikace pro PC. Tento program byl využíván hlavně při výrobě robotické ruky.

2.5.1 Aplikace pro operační systém Android

Aplikace je určena pro smartphony nebo tablety s minimální verzí operačního systému Android 4.1. Aplikace byla naprogramována v jazyce Java s využitím vývojového prostředí Android Studio.

Připojení k robotické ruce probíhá prostřednictvím WebSocket protokolu a je potřeba, aby se obě zařízení (robotická ruka a ovládací zařízení) nacházela v jedné počítačové síti. Toho je docíleno například připojením ovládacího zařízení (např. smartphonu) na Wi-Fi přístupový bod, který je vytvořen robotickou rukou.

Po zapnutí aplikace je zobrazeno okno, které je uvedeno na obrázku č. 69. Tažením zleva doprava je možné zobrazit menu aplikace. V tomto menu se potom nachází možnosti jako: připojení robotické ruky, připojení ovládací rukavice, zapnutí kamery. Stav připojení robotické ruky a ovládací rukavice jsou uvedeny na horním okraji aplikace. V levé části se nachází okno, ve kterém je zobrazováno video z kamery robotické ruky v případě, že je zapnuta.

Zelené tlačítko vpravo dole slouží k uvedení robotické ruky do chodu, tzn. spuštění hydraulického čerpadla a zahájení kalibrace. Návrat do výchozí polohy a opětovnou kalibraci je možné provést stisknutím tlačítka počáteční poloha. K hlavnímu ovládací robotické ruky slouží dva joysticky. První joystick je určen k pohybu ramenem (nahoru a dolů) a otáčení celé konstrukce. Druhým je ovládáno otáčení předloktí a pohyb lokte nahoru a dolů. Pohyb zápěstí je možné řídit tlačítky mezi oběma joysticky.

Jednotlivé prsty na robotické ruce je možné ovládat pomocí znázorněné ruky s tlačítky. Podržením horního tlačítka příslušného prstu dojde k jeho natahování a podržení spodního tlačítka k jeho srolování. K zobrazení několika naprogramovaných gest, využitím prstů robotické ruky, lze použít tlačítka nalevo.



Obr. 69: Ovládací aplikace pro Android – výchozí okno

Aplikaci je možné prostřednictvím Bluetooth bezdrátově propojit s ovládací rukavicí. Zařízení je s ovládací rukavicí nejprve nutné spárovat v systému Android. Po úspěšném spárování je teprve možné spustit připojování v aplikaci. V případě úspěšného připojení dojde k automatické změně uživatelského rozhraní aplikace, jeho nové rozložení je uvedeno na obrázku č. 70. Výraznou změnou je zmizení obou ovládacích joysticků, na jejich místo je umístěna konsole a zobrazení údajů posílaných ovládací rukavicí. Konsole nemá nyní žádné větší využití a je určena pro možná budoucí rozšíření. Tlačítko zapnout rukavici je určeno pro aktivování ovládání pomocí rukavice a jeho stisknutím dojde také k její kalibraci. Pokud je rukavice zapnuta jsou zobrazovány číselné hodnoty úhlů a akcelerace. Ovládání prstů je signalizováno změnou barvy tmavě šedých polí na schématu robotické ruky. Zbytek ovládacích prvků je totožný s výchozím zobrazením.



Obr. 70: Ovládací aplikace pro Android – okno po připojení ovládací rukavice

2.5.2 Aplikace pro debugování

Aplikace pro PC byla naprogramována v jazyce Java a byla využívána převážně při testování a ladění robotické ruky. Okno aplikace je uvedeno na obrázku č. 71. Pomocí této aplikace je možné nastavovat parametry jednotlivých hydraulických ventilů např.: rychlost, výchozí polohu, limity, offset atd. Tyto nastavené parametry je možné následně uložit do paměti EEPROM mikrokontroléru ATmega328P. Dále je možné nastavovat přesnou polohu krokových motorů, spustit jejich kalibraci nebo je zastavit. Polohu hydraulických válců, které jsou opatřeny polohovým senzorem, je taktéž možné přesně nastavit. Další využití má aplikace při přepínání Wi-Fi modulu a jednotky servomotorů do programovacího režimu.

Pro úspěšné připojení k robotické ruce je nutné ji připojit k PC pomocí USB portu na řídicí desce. Komunikace poté probíhá přes virtuální sériový port, který je vytvořen mikrokontrolérem STM32F303.



Obr. 71: Program pro kalibraci robotické ruky

ZÁVĚR

Cílem této práce byl teoretický návrh robotické ruky a vhodného způsobu jejího ovládání.

Koncept mechanické konstrukce byl vymodelován v programu SolidWorks. Pro výrobu robotické ruky byly zvoleny tyto materiály: PLA plast, hliník a ocel. Většina složitých dílů byla realizována technologií 3D tisku (např. prsty a dlaň robotické ruky, ramenní a loketní klouby atd.). Zbylé díly (kromě stojanu a těla) byly vyrobeny z hliníkových polotvarů a trubek. Díly byly vyráběny frézováním a soustružením v domácí dílně. Na stojan a tělo robotické ruky byly použity ocelové materiály (plechy a trubky) a tělo bylo vyřezáno CNC plazmovou řezačkou. Celá konstrukce je tedy velmi odolná a stabilní.

Pohyby robotické ruky zajišťuje hydraulický systém a dva krokové motory. Hydraulický systém je tvořen čerpadlem a dvěma hydraulickými rozvaděči, které byly zakoupeny u firmy MAGOM HRC. Největší tři hydraulické válce (pohyb ramene, předloktí a zápěstí) jsou od firmy Norgren. Zbýlých šest hydraulických válců bylo navrženo a vyrobeno pro tuhle specifickou aplikaci. Síla vyrobených hydraulických válců je dostatečná a jejich těsnost je poměrně dobře zajištěna, vizuální inspekci nelze pozorovat únik oleje do okolí. Krokové motory SX17-1005LQCEF byly použity pro realizaci otáčení zápěstí a celé konstrukce. K těmto motorům bylo nutné navrhnout převodovky, tak aby jejich síla byla dostatečná. Pro otáčení celé konstrukce stačily pouze dvě ozubená kola s převodovým poměrem 1:16. Pro otáčení zápěstí bylo zapotřebí dvou planetových převodovek řazených za sebou, přičemž každá má převodový poměr 1:4 (dohromady 1:16).

Dále byla navržena řídicí deska robotické ruky, která umožňuje řízení až 11 servomotorů, jeden bezkartáčový stejnosměrný motor (pohon hydraulického čerpadla) a disponuje několika vstupy pro připojení snímačů. Hlavním mikrokontrolérem řídicí desky je 32bitový STM32F303 s architekturou ARM Cortex-M4. Dále je řídicí deska vybavena Wi-Fi modulem ESP8266, který zprostředkovává bezdrátovou komunikaci s ovládacím zařízením. Poloha hydraulických pístů je snímána spojitě pomocí potenciometrů a výchozí pozice krokových motorů je detekována magnetickými snímači. K řídicí desce je připojen také kamerový modul, který umožňuje sledování pohybu robotické ruky.

Pro snazší ovládání robotické ruky byla navržena a realizována ovládací rukavice. Rukavice snímá pohyby jednotlivých prstů pomocí ohybových senzorů, které byly vyrobeny z carbostatu a měděných pásků. Rukavice je také vybavena gyroskopem a akcelerometrem, což umožňuje snímání polohy lidské ruky. Komunikace s rukavicí probíhá bezdrátově pomocí Bluetooth.

Ovládací software byl naprogramován pro operační systém Android a je určen pro smartphony a tablety s verzí Androidu 4.1 a výš. Aplikace poskytuje plnohodnotné ovládání robotické ruky pomocí joysticků a dalších ovládacích tlačítek nebo pomocí připojené ovládací rukavice. V aplikaci je také zobrazován obraz z kamery robotické ruky.

Na základě získaných poznatků je možné navrhnout několik vylepšení. Například použití hydraulického čerpadla a hadic s větším průtokem, což by výrazně zrychlilo pohyby celého robota. Dále také použití silnějších krokových motorů, které i přes to, že je jejich moment síly zvětšen pomocí převodů, nemají dostatečnou sílu při uchopení těžších předmětů (platí hlavně pro otáčení zápěstí). Co se týče programové stránky robota, tak z důvodu časové tísně nebylo možné implementovat souřadnicový systém a automatické provádění naprogramovaného úkonu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

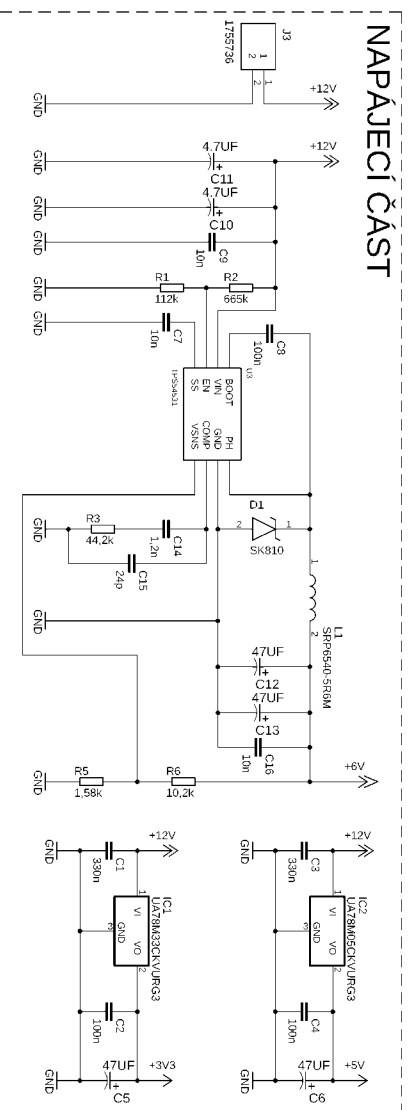
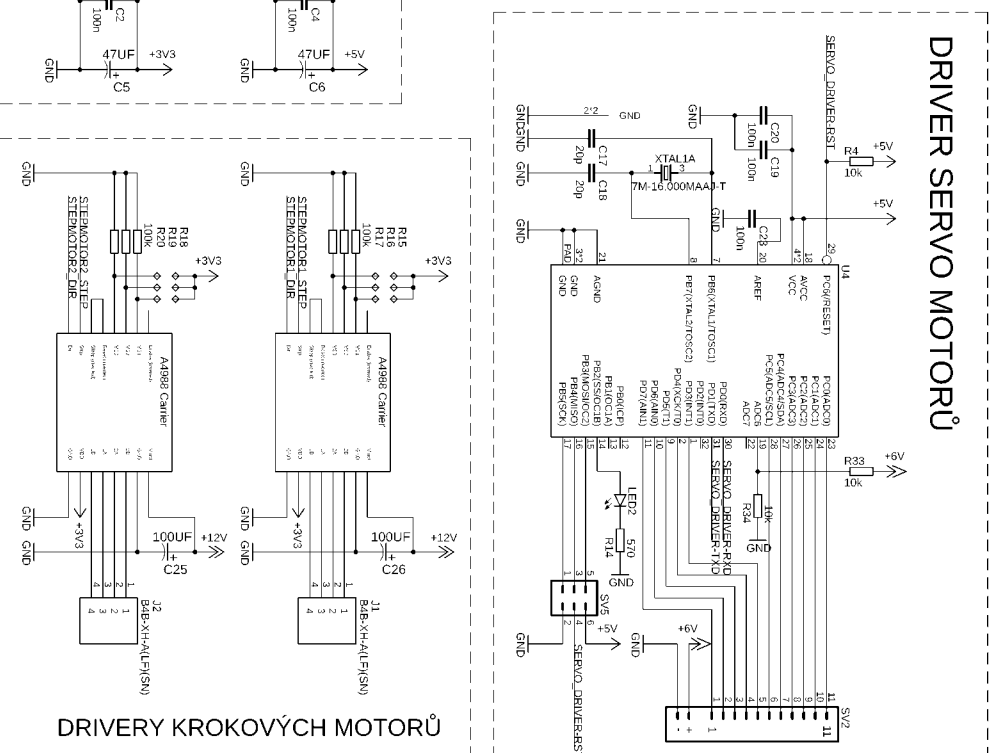
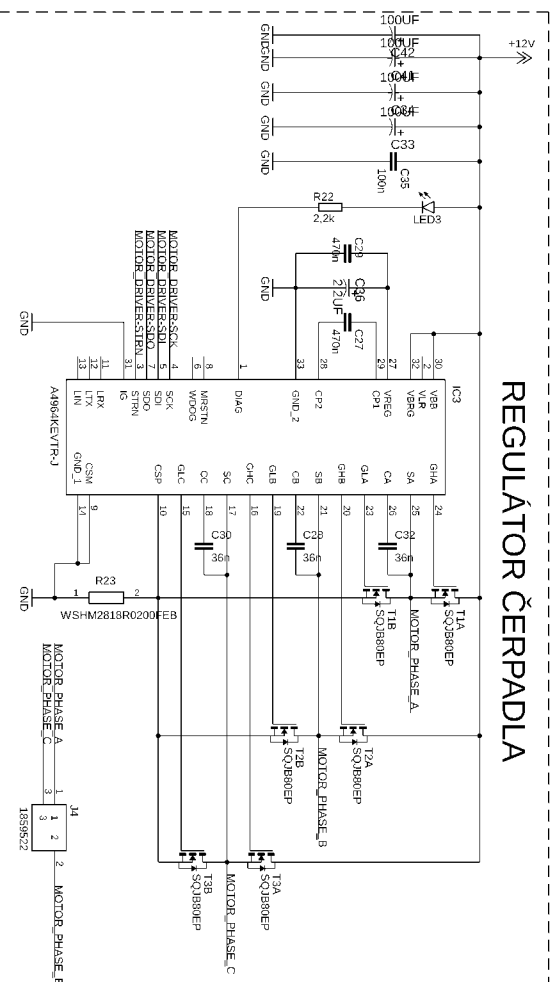
- [1] Product images. [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: goo.gl/BQr0C9
- [2] VOJÁČEK, Antonín. Bezkontaktní indukční snímače přiblížení – obecný popis. In: Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru [online]. 2014 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/UH6xYR>
- [3] VOJÁČEK, Antonín. Bezkontaktní kapacitní snímače přiblížení – obecný popis. In: Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru [online]. 2014 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/BihNVI>
- [4] VOJÁČEK, Antonín. Magnetické senzory přiblížení - 1. díl. In: Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru [online]. 2017 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/9MNTa>
- [5] VOJÁČEK, Antonín. Lineární senzor pro měření pozice pístu pneumatických válců. In: Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru [online]. 2016 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/JMNT3>
- [6] Pololu 38 kHz IR Proximity Sensor, Fixed Gain, High Brightness. [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/5MvsjF>
- [7] VOJÁČEK, Antonín. Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu. In: Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru [online]. 2017 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/2MNTV>
- [8] JURÁNEK, Martin. Prostředky automatického řízení [online]. Ostrava [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/kJSI6I>. VŠB Technická univerzita Ostrava.
- [9] HUSÁK, Miroslav. AKCELEROMETR. [online]. Praha: ČVUT FEL Praha. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/R73RVp>
- [10] VOJÁČEK, Antonín. Integrované MEMS GYROSKOPY. In: Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru [online]. 2009 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/jntOFs>
- [11] MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.0. [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/77kaey>
- [12] MPU-6050 Accelerometer + Gyro. Arduino [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/aMNTk>
- [13] Saggio, G., Riillo, F., Sbernini, L. a L. R. Quitadamo. Resistive flex sensors: A survey .ResearchGate – Share and discover research [online]. 2. 12. 2015. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/gMNTs>
- [14] SpectraSymbol Flex sensor [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/fMNTT>
- [15] Jak fungují modelářská serva. In: vlastikd.webz.cz [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/DvZrjm>
- [16] Seedstudio: EMax 12g ES08MD. Seedstudio.com: EMax 12g ES08MD high Sensitive servo [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/WYPo1f>
- [17] Krokové motory [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/SMNTU>

- [18] Krokové motory. In: *Robotika.cz* [online]. 2002-10-28 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/XMNTf>
- [19] Krokové motory 1 – typy motorů. *Robodoupě* [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/XMNTI>
- [20] A4988 Stepper Motor Driver Carrier. *Pololu Robotics & Electronic* [online]. pololu.com [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/pMNTg>
- [21] 21. Pistová čerpadla. *Strojirenství* [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/MMNTS>
- [22] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. Základy 3D tisku [online]., 12 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/WZxynM>
- [23] ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. Nekonenční metody obrábění – 4. díl. In MM Průmyslové spektrum, 2008, č.3, s. 80-82. ISSN 1212-2572
- [24] Laserové a plazmové řezání (84, 83) [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/7MNTZ>
- [25] Atmega ATmega328/P. [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/zhKhTr>
- [26] STMicroelectronics STM32F303xC. [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/Liq4op>
- [27] Bluetooth. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-[cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/mrCCO0>
- [28] ITeadStudio, HC-05 [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/VMNTj>
- [29] WiFi. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/G4mylE>
- [30] ESP8266 a WeMos D1 [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/AajRhd>
- [31] Espressif Inc. ESP8266EX. [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/iKZHMr>
- [32] ArduCAM-M-2MP Camera Shield. [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://goo.gl/EVUIns>
- [33] ExoHand. *Festo* [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://1url.cz/vMNTTh>
- [34] Texas Instruments TPS54531 [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://1url.cz/IMdEm>
- [35] ALLEGRO microsystems A4964 [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://1url.cz/HMdEy>

SEZNAM PŘÍLOH

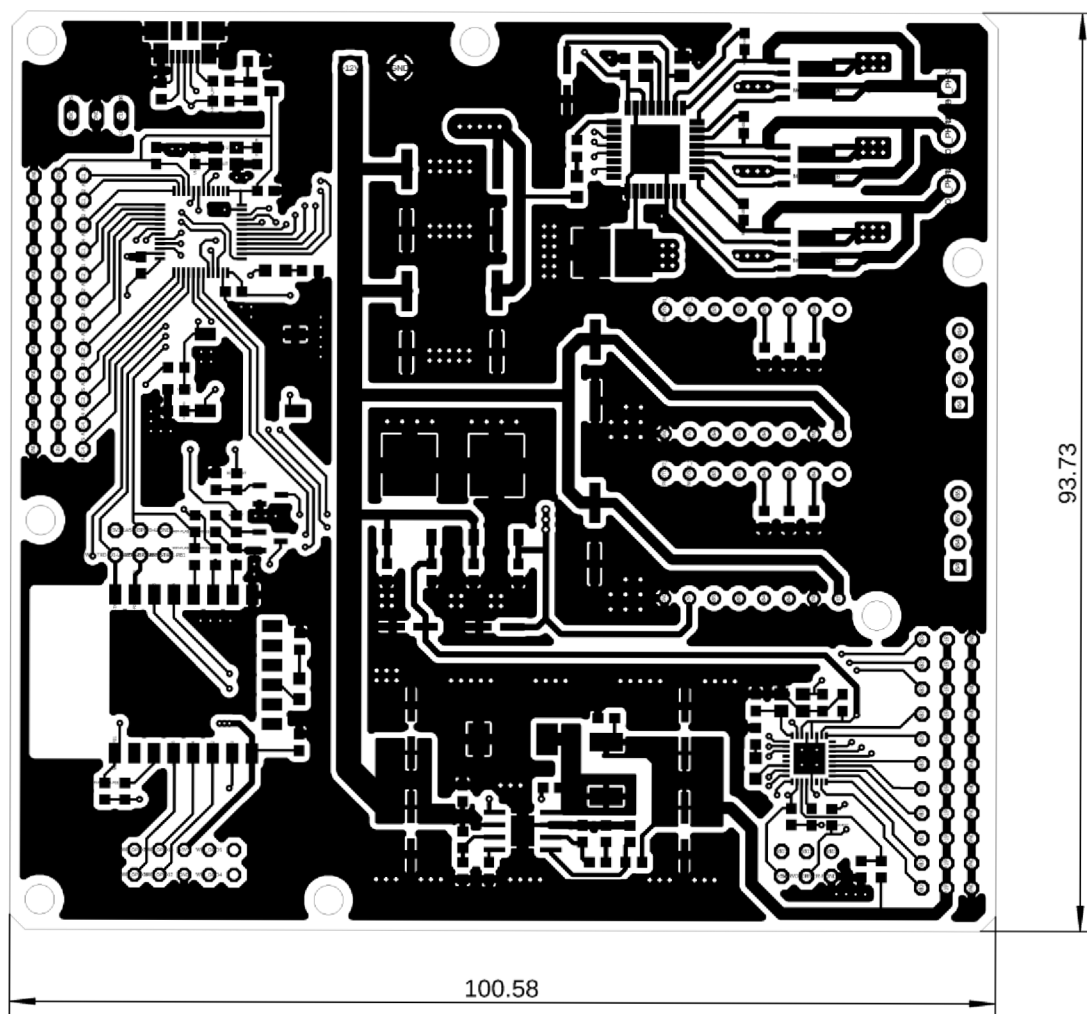
A Schéma řídicí desky robotické ruky – první část.....	71
B Schéma řídicí desky robotické ruky – druhá část	72
C DPS řídicí desky robotické ruky – vrchní strana	73
D DPS řídicí desky robotické ruky – spodní strana	74
E Schéma řídicí desky ovládací rukavice.....	75
F DPS řídicí desky ovládací rukavice – vrchní strana.....	76
G DPS řídicí desky ovládací rukavice – spodní strana.....	77
H Fotografie vyrobené robotické ruky	78

A Schéma řídicí desky robotické ruky – první část

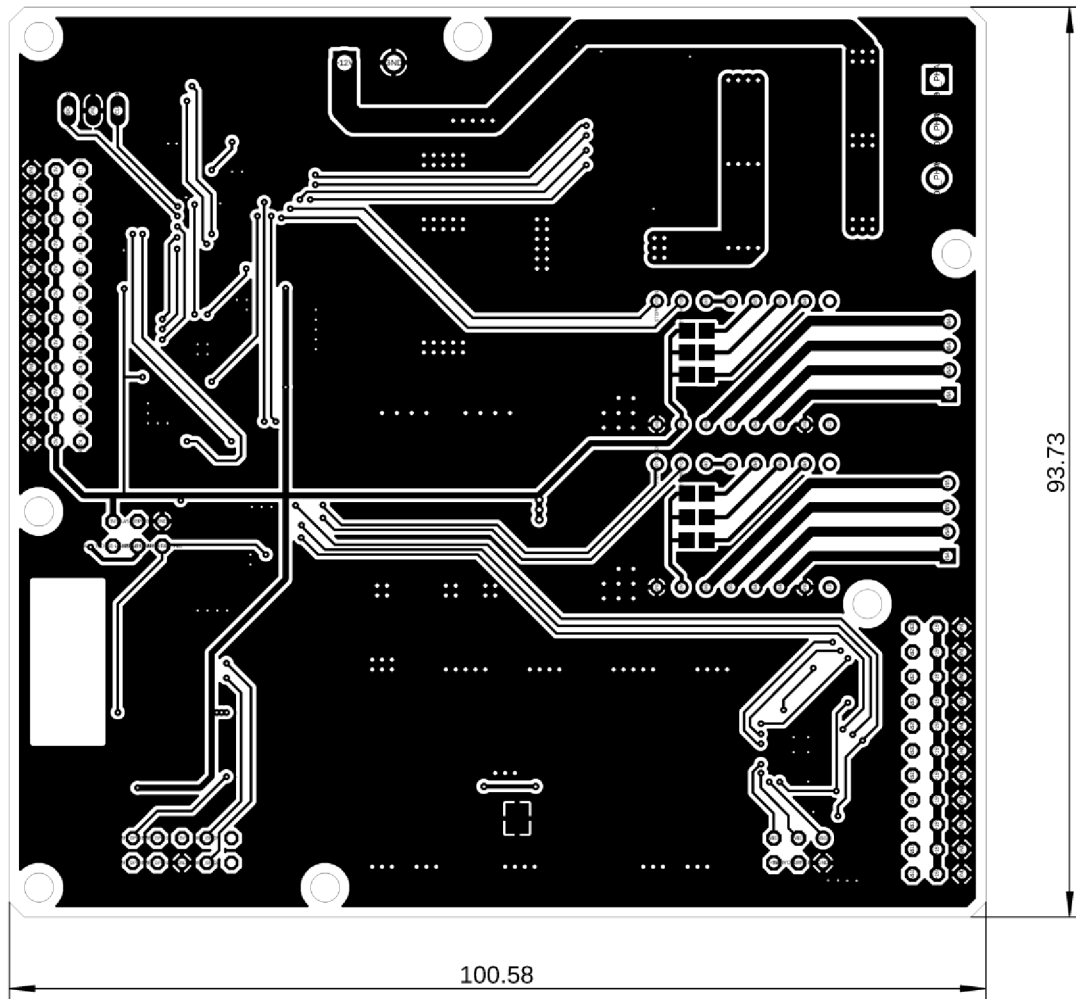


DRIVERY KROKOVÝCH MOTORŮ

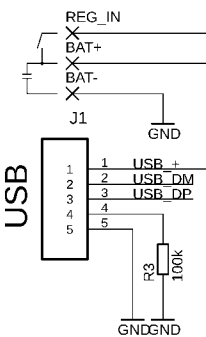
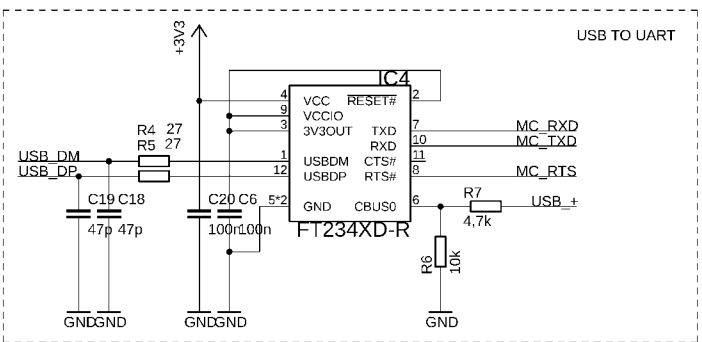
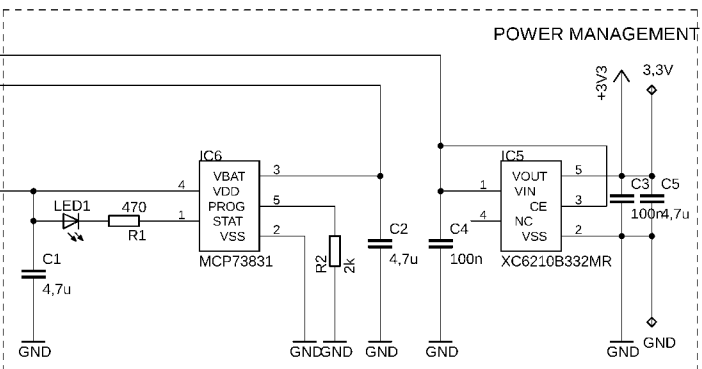
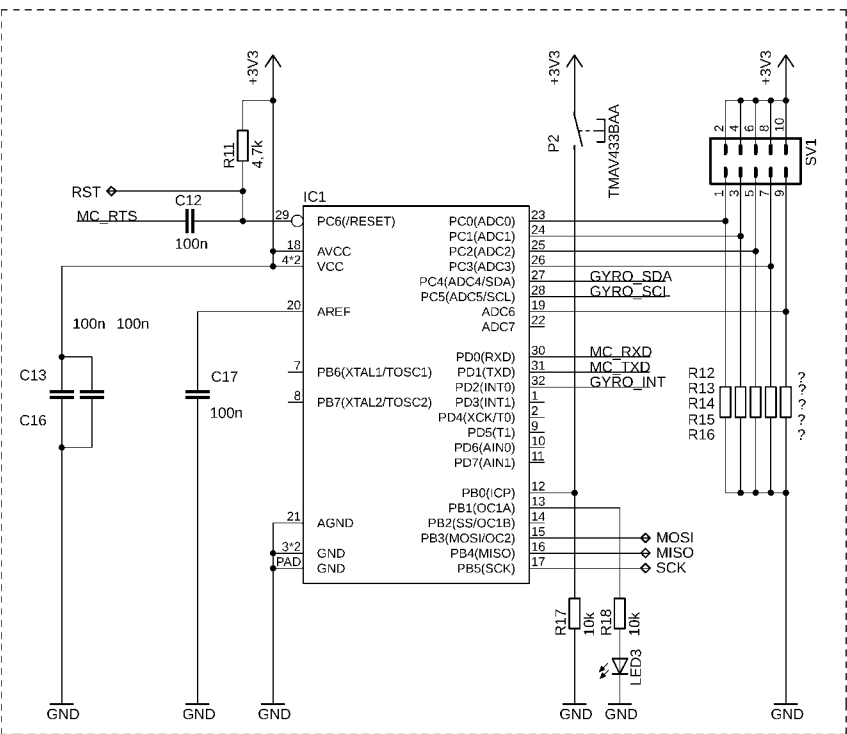
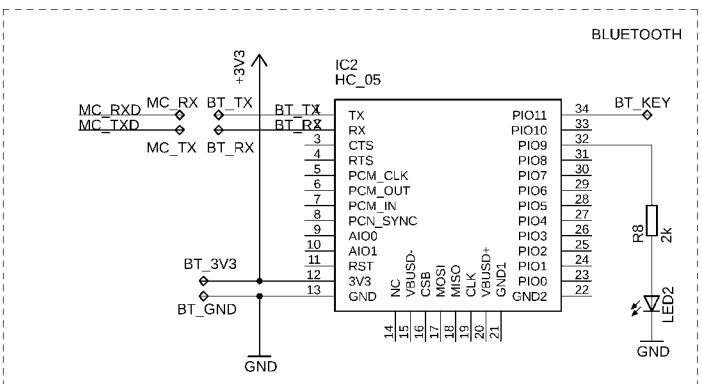
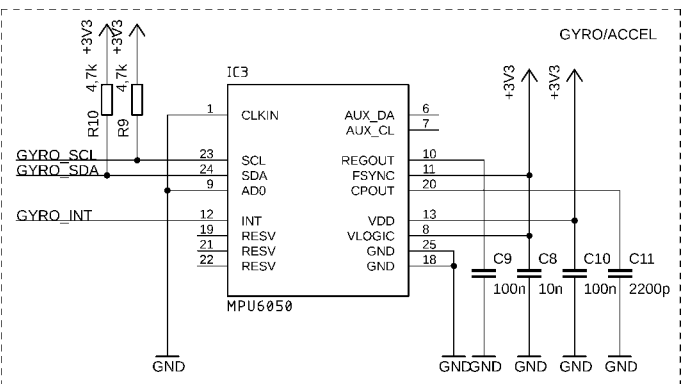
C DPS ŘÍDICÍ desky robotické ruky – vrchní strana



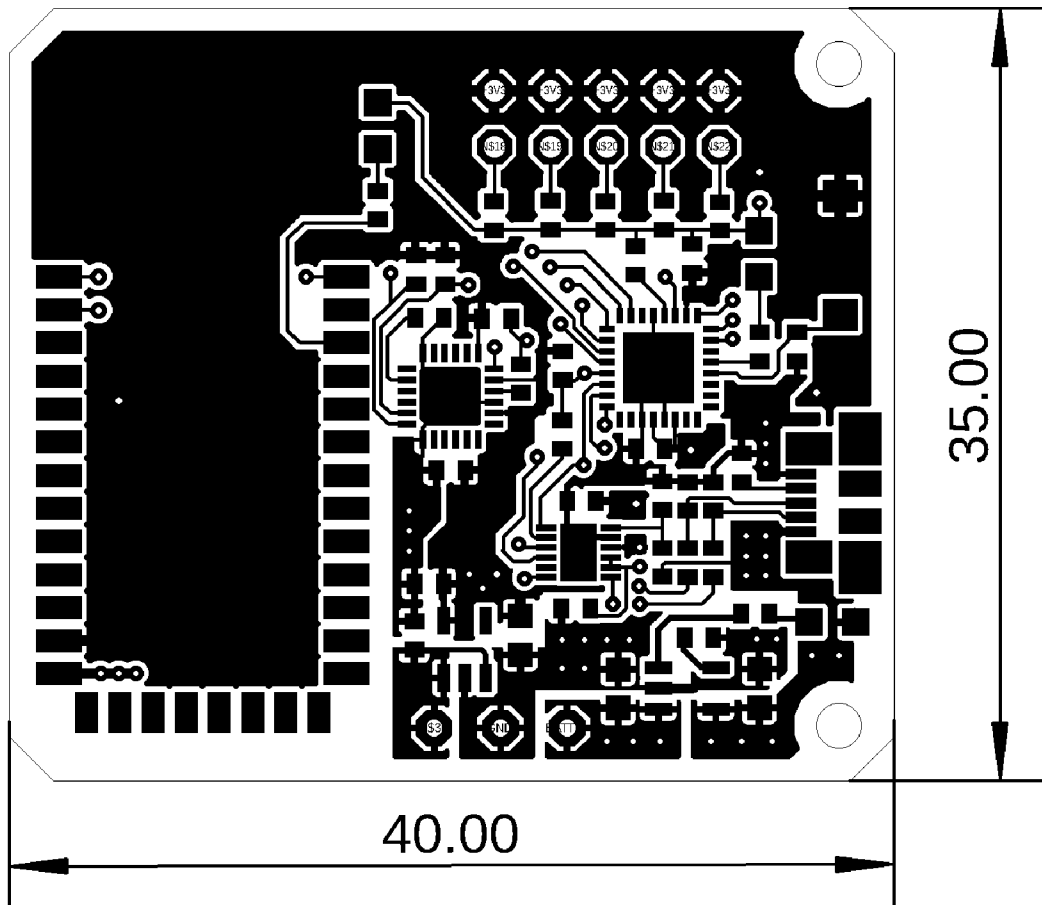
D DPS ŘÍDICÍ desky robotické ruky – spodní strana



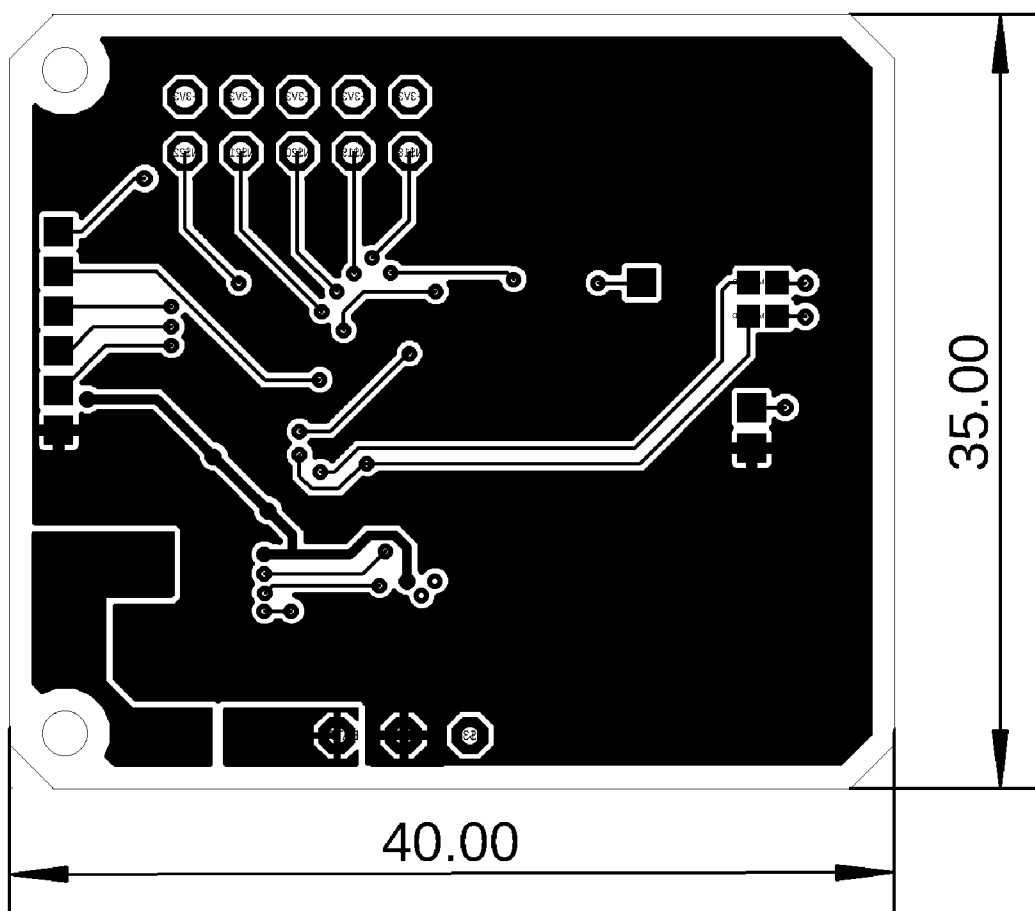
E Schéma řídicí desky ovládací rukavice



F DPS řídicí desky ovládací rukavice – vrchní strana



G DPS řídicí desky ovládací rukavice – spodní strana



H Fotografie vyrobené robotické ruky

