



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

RUKAVICE SE SENZORY OHYBU

GLOVES WITH MOTION SENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Anna Findejsová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oto Janoušek, Ph.D.

BRNO 2017



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Biomedicínská technika a bioinformatika**

Ústav biomedicínského inženýrství

Studentka: Anna Findejsová

ID: 173564

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Rukavice se senzory ohybu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Proveďte literární rešerši problematiky konstrukce a využití senzorů ohybu. 2) Navrhněte rukavici se senzory ohybu vhodnou jako demonstrační přípravek k výuce sensoriky. Dále navrhněte vizualizační prostředí, umožňující v reálném čase zobrazovat ohyb prstů. Navrhněte komunikační rozhraní mezi rukavicí a vizualizačním prostředím. 3) Rukavici realizujte. K realizaci rukavice využijte platformu Arduino a mechano-rezistivní snímače ohybu. 4) Realizujte vizualizační prostředí. Vizualizační prostředí vytvořte v Matlabu nebo LabView, k přenosu dat z rukavice do vizualizačního prostředí využijte sériovou linku USB. 5) Vytvořte kompletní laboratorní úlohu k výuce sensoriky, vycházející z poznatků získaných při realizaci rukavice. Laboratorní úloha bude koncipována pro práci s jediným senzorem ohybu a jejím cílem bude experimentální ověření vlastností senzoru. Laboratorní úlohu didakticky optimalizujte a vytvořte vzorový protokol. 6) Proveďte diskuzi navrženého demonstračního přípravku i laboratorní úlohy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] VODA, Zbyšek. Průvodce světem Arduina. Bučovice: Martin Stříž, 2015, 240s. ISBN 978-80-87106-90-7.

[2] SMITH, Alan. Introduction to Arduino: A piece of cake!. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2011, 170s. ISBN 978-1463698348.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 2.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Oto Janoušek, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací rukavice se senzory ohybu. Tato práce shrnuje problematiku odporových senzorů, popisuje jejich princip a využití. Poté se zabývá stručným popisem anatomie horní končetiny a stupni volnosti. Teoretické podklady pro práci jsou uvedeny v první kapitole a následně využity v kapitole druhé, třetí a čtvrté, které se zabývají návrhem a realizací hardwarové i softwarové části. Principem je snímání ohybů prstů pomocí senzorů ohybu připojených na vývojovou desku Arduino a jejich vizualizace. Výstupem této práce je laboratorní úloha pro výuku senzoriky, která je koncipována pro práci s jedním senzorem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Arduino, flex senzory, ohyb, rukavice, vizualizace, Matlab, laboratorní úloha

ABSTRACT

Bachelors thesis deals with design and realization of a glove with flex sensors. This thesis summarizes problematics of resistive sensors, describes their principles and using. Then deals with brief upper limb anatomy and degrees of freedom. Theoretical base is stated in chapter one and then used in chapters two, three and four, that describe the design and realization of hardware and software. The principle is based on capturing the flexion of the fingers by using flex sensors connected to the Arduino development board and their visualization. The output of this thesis is a laboratory task for teaching sensorics, which is designed for using one flex sensor.

KEYWORDS

Arduino, flex sensors, flexion, glove, visualization, Matlab, laboratory task

FINDEJSOVÁ, A. *Rukavice se senzory ohybu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 47 s, 5 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oto Janoušek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Rukavice se senzory ohybu“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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. 40/2009Sb.

V Brně dne 30. května 2017

.....

(podpis)

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Otovi Janouškovi, PhD. za trpělivost, odbornou pomoc, cenné rady a konzultace. Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Vratislavu Harabišovi, PhD. za pomoc s řešením otázek týkajících se softwarové části. V neposlední řadě bych chtěla také poděkovat mému příteli a rodině za jejich podporu během studia.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	VIII
SEZNAM TABULEK	VIII
ÚVOD	9
1 KONSTRUKCE A VYUŽITÍ SENZORŮ OHYBU	10
1.1 Obecná definice senzoru.....	10
1.2 Odporové senzory.....	10
1.2.1 Tenzometrické odporové senzory	11
1.3 Senzory ohybu	12
1.3.1 Princip senzorů ohybu	13
1.3.2 Vlastnosti senzorů ohybu	13
1.4 Možnosti aplikace senzorů ohybu	16
1.4.1 Využití senzoru při měření ohybu ruky.....	17
2 NÁVRH HARDWAROVÉ A SOFTWAREVÉ ČÁSTI	20
2.1 Návrh rukavice	20
2.1.1 Materiál rukavice.....	20
2.1.2 Arduino.....	21
2.2 Návrh komunikačního rozhraní	23
2.2.1 MATLAB Support Package for Arduino Hardware	23
2.2.2 Čtení signálu ze senzorů.....	23
2.3 Návrh vizualizačního prostředí.....	24
2.3.1 MATLAB®	24
2.3.2 Vizualizace dat	24
2.3.3 Toolbox pro modelování komplexních mechanismů	25
3 REALIZACE RUKAVICE	28
3.1 Připevnění senzorů	28
3.1.1 Propojení senzorů s vývojovou deskou Arduino.....	29
4 REALIZACE VIZUALIZAČNÍHO PROSTŘEDÍ	34
4.1 Čtení signálu	34
4.2 Vizualizace pohybů	35

5	LABORATORNÍ ÚLOHA	37
5.1	Zadání – práce s jedním senzorem ohybu	37
5.1.1	Připojení flex senzoru.....	37
5.1.2	Načtení signálu.....	38
5.1.3	Ověření vlastností senzoru	38
5.1.4	Obsah protokolu	39
5.2	Vzorový protokol.....	39
6	DISKUZE	42
6.1	Demonstrační přípravek	42
6.2	Laboratorní úloha	42
	ZÁVĚR	43
	SEZNAM LITERATURY	44
	SEZNAM ZKRATEK	46
	SEZNAM PŘÍLOH	47

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Flex senzor společnosti SpectraSymbol o délce 2,2“ [5]	15
Obrázek 2: Schéma senzoru ohybu [6]	15
Obrázek 3: Diagram aplikace senzorů ohybu.....	16
Obrázek 4: Anatomie ruky [7]	18
Obrázek 5: Blokové schéma systému.....	20
Obrázek 6: a) Nylonová rukavice, b) detail švu na jednom prstu	21
Obrázek 7: Vývojová platforma Arduino UNO [10]	22
Obrázek 8: Rukavice s proužky textilní oboustranné lepicí pásky	28
Obrázek 9: Umístění flex senzorů na jednotlivé prsty	29
Obrázek 10: a) Mikropájka ZD-99, b) vytvořený konektor pro připojení senzoru.....	30
Obrázek 11: Rukavice se senzory a konektory pro připojení k nepájivému poli.....	30
Obrázek 12: Připojení flex senzorů k platformě Arduino přes nepájivé kontaktní pole.....	31
Obrázek 13: Schéma obvodu [17].....	31
Obrázek 14: Obecné schéma napěťového děliče	32
Obrázek 15: Model ruky vytvořený pomocí toolboxu pro modelování.....	36
Obrázek 16: Schéma zapojení flex senzoru [17].....	38
Obrázek 17: Schéma zapojení senzoru.....	40
Obrázek 18: Vzorové pole pro vytvoření grafu	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: DH parametry pro ukazovák	26
Tabulka 2: DH parametry pro palec	26
Tabulka 3: Pohybové limity pro jednotlivé prsty.....	26
Tabulka 4: Popis jednotlivých funkcí [16].....	27
Tabulka 5: Naměřené hodnoty pro 10 stupňů ohybu prstů	33
Tabulka 6: Vzorová hlavička protokolu.....	39
Tabulka 7: Vzorová tabulka pro hodnoty ze sériového monitoru	40
Tabulka 8: Vzorová tabulka pro hodnoty při ohybu v opačném směru	40

ÚVOD

Cílem této práce je zpracování literární rešerše problematiky odporových senzorů, návrh a realizace rukavice se senzory ohybu, komunikačního rozhraní a vizualizačního prostředí a v neposlední řadě vytvoření kompletní laboratorní úlohy vhodné pro výuku sensoriky. Práce je rozdělena do šesti vzájemně navazujících kapitol.

Flex senzory jsou snímače, jichž základní funkcí je změna odporu na základě mechanické deformace, a to lineárně. Tyto senzory dnes nacházejí uplatnění v mnohých odvětvích, jakými jsou například aplikace pro diagnostické i léčebné účely, návrhy rozhraní člověk-přístroj nebo modelování a rozpoznávání gest, ale i v jiných odvětvích – v měřicích systémech, hudebních nástrojích, kontrolních systémech v ortézách a protézách nebo v kontrolních systémech v automobilovém průmyslu.

Pro návrh i realizaci rukavice se senzory ohybu je nutné se seznámit především s principy a vlastnostmi flex senzorů, jež jsou popsány v první části práce, ale i s anatomickou strukturou horní končetiny či stupni volnosti jednotlivých kloubů, jejichž popis je taktéž uveden v první kapitole.

V druhé kapitole této práce, která popisuje hardwarové i softwarové řešení práce, je nejprve nutné se seznámit s vývojovou platformou Arduino UNO, jejími vlastnostmi a vybavením, dále stručně s programovacím prostředím Matlab, především jeho softwarovým balíčkem pro podporu Arduina a toolboxem pro modelování komplexních mechanismů.

Třetí a čtvrtá část práce je zaměřena na samotnou realizaci rukavice se senzory ohybu a vizualizačního prostředí. Tyto kapitoly zahrnují fotodokumentaci jednotlivých kroků realizace hardwarového i softwarového zařízení, části zdrojového kódu a popisy použitých funkcí.

Pátá kapitola se zabývá laboratorní úlohou pro výuku sensoriky, zahrnuje popis jednotlivých úkolů, schéma pro připojení flex senzoru k vývojové desce Arduino UNO a také vzorový protokol, jež obsahuje zadání laboratorní úlohy, využívané pomůcky, specifikaci jednotlivých úkolů, prostor pro vytvoření grafu a zápis závěrečné diskuze k provedené úloze.

Poslední část práce je diskuzí navrženého demonstračního přípravku i laboratorní úlohy.

1 KONSTRUKCE A VYUŽITÍ SENZORŮ OHYBU

Cílem této části je poskytnout přehled o senzorech ohybu, jejich principu, vlastnostech a možnostech využití. Tyto poznatky tvoří nezbytný základ pro návrhovou i realizační část bakalářské práce.

1.1 Obecná definice senzoru

Senzor je definován jako „zařízení, které přijímá signál nebo stimul a reaguje na něj“, což je velmi široká definice. Přirozené senzory, které se nacházejí primárně v živých organismech, obvykle reagují na signály elektrochemické povahy, což znamená, že jejich fyzikální podstata je založena na transportu iontů (např.: nervová vlákna). V uměle vytvořených snímačích jsou informace taktéž předávány a zpracovávány v elektrické formě, ale tentokrát jako proud elektronů. Senzory, jež jsou použity v umělých systémech, musí používat stejný druh komunikace jako zařízení, ke kterému jsou připojeny. Tato forma komunikace závisí na schopnosti umělých senzorů odpovídat na signály v elektrické podobě – tzn. informace je nesená přemísťováním elektronů. Proto musí být senzor připojen k elektronickému systému pomocí vodičů na rozdíl od přirozených snímačů, které jsou propojeny se systémem pomocí elektrochemických roztoků či nervových vláken. Definice senzoru pro potřeby této práce bude tedy následující – senzor je zařízení, které přijímá stimul a odpovídá na něj elektrickým signálem. Podnětem rozumíme informaci o množství, vlastnosti nebo stavu objektu, která je přijata a převedena na elektrický signál. [1]

1.2 Odporové senzory

Přirozenou vlastností každého materiálu (kov, elektrolyt, polovodič,...) je klást procházejícímu elektrickému proudu elektrický odpor. Senzory využívající změny elektrického odporu jsou založené na ovlivnění elektrického odporu vnějšími podněty v důsledku změn průřezu (stlačování vodiče), délky (prodlužování nebo zkracování vodiče) nebo měrného odporu (vystavení vodiče teplotě, světlu, magnetickému poli,...).

Rezistentní senzory neboli elektrické odporové senzory patří mezi pasivní senzory, protože jejich vlastnost – elektrický odpor hmoty senzoru – se mění díky vnějšímu podnětu (měřená veličina) a při vyhodnocování těchto změn je používáno pomocné napájecí napětí – proto pasivní senzory. Změnu elektrického odporu tedy u těchto senzorů způsobuje vstupní (vnější) podnět, jakým může být například u potenciometrických senzorů poloha předmětu, u kontaktních a tenzometrických senzorů změna rozměru předmětu, u teplotních senzorů změna teploty, u fotorezistivních senzorů emise viditelného světla, elektromagnetické tepelné

záření u bolometrů, u senzorů vodivosti kapalin koncentrace disociovaných iontů a magnetická indukce u magneto-rezistentních senzorů. [3]

1.2.1 Tenzometrické odporové senzory

Tenzometrické senzory reagují na vnější podněty, jako jsou mechanické napětí nebo tlak, které způsobují jejich deformaci, změnou svého odporu. Závislost elektrického odporu na deformaci objevil sir Charles Wheatstone v roce 1843 a více ji rozpracoval William Thomson (známý spíše jako lord Kelvin) kolem roku 1856. K využití tohoto jevu došlo ovšem až později, a to mezi lety 1920 až 1945. [14]

Pro elektrický odpor válcového vodiče platí vztah:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.1)$$

kde ρ je měrný odpor vodiče ($\Omega \cdot m$), l délka vodiče (m), S průřez vodiče (m^2) podle průměru d .

Působí-li na vodič tvaru válce vnější mechanický tlak p nebo síla F , platí následující vztah pro změnu průměru d :

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta d}{d} \quad (1.2)$$

Vnější podněty vyvolávají v hlavních osách mechanické napětí $\delta_x, \delta_y, \delta_z$:

$$\delta_x = \delta_y = \delta_z = -p \quad (1.3)$$

Při změnách délky, průměru nebo plochy vodiče vlivem vnějšího mechanického tlaku na vodič je zaveden vztah poměrného prodloužení:

$$\varepsilon = \lambda = -\frac{p}{E}(1 - 2\mu_p), \quad (1.4)$$

kde ε je poměrné prodloužení, p mechanický tlak, E modul pružnosti a μ_p je součinitel příčného stlačení (tzv. Poissonovo číslo).

Dále si zavedeme vztah pro relativní změny měrného odporu:

$$\alpha_\rho \cdot p = \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (1.5)$$

kde α_ρ je součinitel úměrnosti měrného odporu, p mechanický tlak a ρ je měrný odpor.

Tedy pro změny odporu vlivem vnějšího prostorového tlaku platí:

$$\frac{\Delta R}{R} = p \left[\alpha_p + \frac{1}{E} (1 - 2\mu_p) \right] = \alpha_p \cdot p, \quad (1.6)$$

kde α_p je součinitel prostorového tlaku.

Dobře využitelné jsou tenzometry vyrobené pro namáhání pouze v jednom směru – jsou to tenzometry kovové (drátové nebo foliové) nebo polovodičové (páskové nebo membránové). Kovové drátové tenzometry bývají navinuty na keramické, tkané nebo papírové podložce. Drátové vinutí je vytvořeno pro jednoosé nebo dvouosé zatížení. [3]

1.2.1.1 Kovové tenzometrické senzory

Kovovým materiálem pro výrobu tenzometrických sensorů je např. platina nebo slitiny kovů (chromel). Základní odpor (hodnota R čidla při teplotě 0° C, nezahrnuje další faktory jako např. hmotnost materiálu nebo tvar senzoru) kovových tenzometrů se pohybuje mezi 50 až 2500 Ω. Dráty jsou kruhové s průměrem 5 – 25 μm nebo ploché (foliové tenzometry o tloušťce 1 – 10 μm). [3]

1.2.1.2 Polovodičové tenzometrické senzory

Polovodičové odporové tenzometry mohou být buď monokrystalické – difundované do substrátu, nebo polykrystalické. Monokrystalický tenzometr je tvořen tenkou vrstvou monokrystalu polovodiče – křemíku nebo germania – dotovanou přísadami na dosažení vodivosti typu P nebo N.

Součinitel deformační citlivosti K je u polovodičových tenzometrů závislý na typu vodivosti P nebo N, na krystalické orientaci a měrném odporu. Deformační citlivost je nelineární a je výrazně ovlivněna teplotou. Používané materiály jsou křehké a tvrdé, deformace je pružná, až po mez pevnosti. Polovodiče mohou také vykazovat tzv. křehký lom. K realizaci polovodičových tenzometrů je využívána technologie pro a) monokrystalické polovodiče difundované do křemíkové podložky a b) polykrystalické polovodiče naprašované. Konstrukce polovodičových monokrystalických tenzometrů může být ve formě jednoduchého pásku nebo jako dvojité pásky (pro dva směry zatížení). [3]

1.3 Senzory ohybu

Senzory ohybu (odporové flex senzory, z latinského flectere, „ohýbat“) převádějí změny v ohybu na elektrické změny odporu, což znamená, že převádějí statickou energii na elektrickou. Obecně platí, že máme na mysli ohyb při zvažování variace polohy, která zkracuje společný úhel, i když je daný senzor tímto rozšířen nebo rovnán, což je opak kontrakce senzoru.

1.3.1 Princip senzorů ohybu

Odporové flex senzory pracují na stejném principu jako tenzometry (flexe materiálu vyvolává mechanické pnutí podél jedné strany senzoru a současně vyvolává mechanický tlak podél druhé strany), ale s podstatně vyšší citlivostí.

Základním principem flex senzoru je změna odporu na základě mechanické deformace. Flex senzory využívají proměnnou odporovou charakteristiku vodivého materiálu.

Vodivá součást senzorů bývá nejběžněji tvořena materiálem na bázi uhlíku, jako například oxid v prášku, inkoustové částice, nanočástice, nanotrubičky nebo alotropická forma uhlíku – grafit. Mohou být také použity přechodové kovy jako stříbro, měď, nikl, platina nebo palladium. Alternativním materiálem jsou elektro-vodivé gumy, uhlíkem impregnované gumy a některé vodivé polymery. Je zřejmé, že použitý vodivý materiál a způsob, jakým je navrstven, určuje základní elektrické vlastnosti senzoru. Díky tomu je odpor snímače velmi citlivý na jakékoli defekty vodivého povrchu. V poslední době nabývají na významu nové objevené formy vodivého materiálu, jako prášek nebo film, případně ve směsi s pryskyřicí, plnivý, pojivý nebo jinými přísadami zředěnými v rozpouštědle (nebo ředidle, pokud je to nutné), a nanosenými na různé druhy substrátů. Substrát může být vyroben z polyesteru, skleněných vláken nebo polyamidu.

Flexibilita snímače závisí především na vnitřních vlastnostech podkladu (substrátu) a jeho bezproblémové přilnutí k vodivé složce. Substrát může být realizován pomocí různých materiálů na bázi polymerů, mezi nimiž nejvýznamnější jsou polyvinylchlorid (PVC), polypropylen (PP), polypyrrol (PPy), propylen-styren a polyvinyl fluorid (PVDF). Během posledních let si řada vědců dokonce osvojila výrobu umělé tkáně jako substrátu, aby byly flex senzory přímo „nositelné“. [1] [2] [3] [6]

1.3.2 Vlastnosti senzorů ohybu

Mechanické vlastnosti substrátu ovlivňují elektrické chování senzoru takovým způsobem, že čím více se substrát ohne, tím vyšší je odpor vodivé součásti, a to lineárně. Jakákoliv nelinearita v elektrickém chování je závislá pouze na poškození či vzniku prasklin odporového prvku v průběhu mechanického namáhání. [6]

Hlavní vlastnosti senzorů, které bereme v úvahu, jsou senzitivita, rozsah, opakovatelnost a reprodukovatelnost měření, doba zotavení, linearita odezvy a spotřeba energie. Hlavními mechanickými vlastnostmi, které nás zajímají, jsou hmotnost, ohebnost, pevnost, odolnost a spolehlivost. Ostatní cenné stránky jsou například možnosti škálování (velikost měřítka), funkčnost v nepříznivých podmínkách, nezávislost na teplotě, snadnost odstranění nebo nahrazení a hospodárnost či cenová výhodnost.

Jak už bylo uvedeno v odstavci 1.3.1, míra odporu flex senzoru je přímo úměrná jeho délce. Nejčastější realizací takovýchto senzorů, které jsou snadno dostupné a cenově přijatelné, jsou pasivní odporové senzory ve formě plastového pásku.

Ty jsou v dnešní době komercializované různými značkami, mezi něž patří Spectra Symbol (www.spectrasymbol.com), jejichž produkt Flex Sensor byl vybrán pro zpracování této práce z důvodů, které budou popsány níže, Abrams-Gentile (www.ageinc.com), FlexpointSensor Systems, Inc. (www.flexpoint.com) a Images SI Inc. (www.images.com).

Sensory Flex Sensor od společnosti SpectraSymbol, jsou vyráběny v délkách od jednoho do pěti palců. Flex senzory použité pro realizaci této bakalářské práce mají délku 2,2“ a 4,5“. Senzor o délce 2,2“ je zobrazen na obrázku 1. [1] [2] [3] [6]

Základní parametry senzoru:

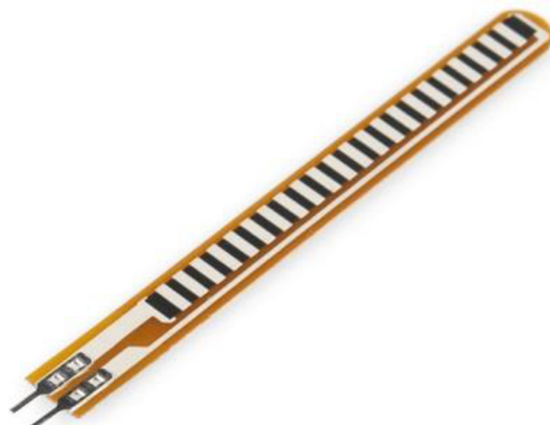
- plochý odpor $10\text{ k}\Omega \pm 30\%$ (4,5“ senzory) a $35\text{ k}\Omega$ (2,2“ senzory)
- ohybový odpor minimálně 2x větší než plochý při ohybu 180°
- odolnost vůči teplotám od -35°C do $+80^\circ\text{C}$

Výhody:

- Odolnost vůči ohýbání, vibracím, teplotním šokům (v rámci běžného používání) a protažení
- Absence rizika elektromagnetického rušení či okluze senzoru
- Nízký profil
- Jednoduchá konstrukce

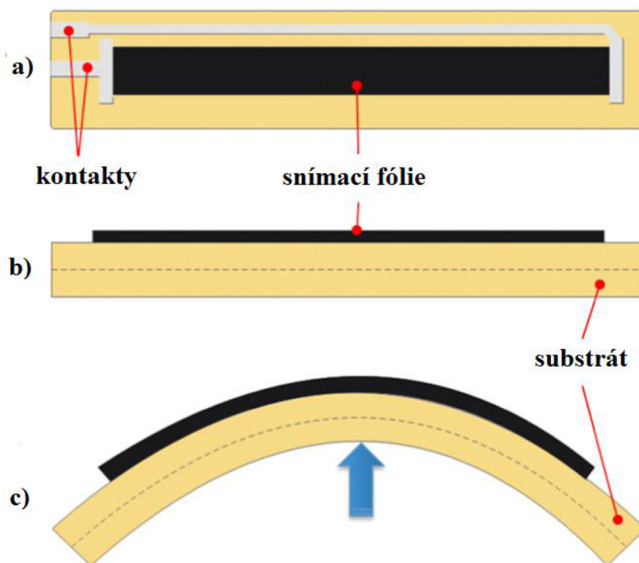
Nevýhody:

- Nutnost ukotvení senzoru k fyzickému podkladu
- Senzory mění odpor proti jakékoliv deformaci podkladu včetně vícenásobných ohybů



Obrázek 1: Flex senzor společnosti SpectraSymbol o délce 2,2“ [5]

Na obrázku 2 je uvedeno schéma senzoru ohybu, kde je a) pohled shora: elektrické kontakty jsou zobrazeny šedou barvou, vodivá fólie barvou černou, b) boční pohled: vodivá fólie v černé barvě na povrchu substrátu, který je zobrazen světlejší barvou, c) ohýbání substrátu způsobuje mechanické napětí vodivé vrstvy, což vede ke změně jeho elektrického odporu.

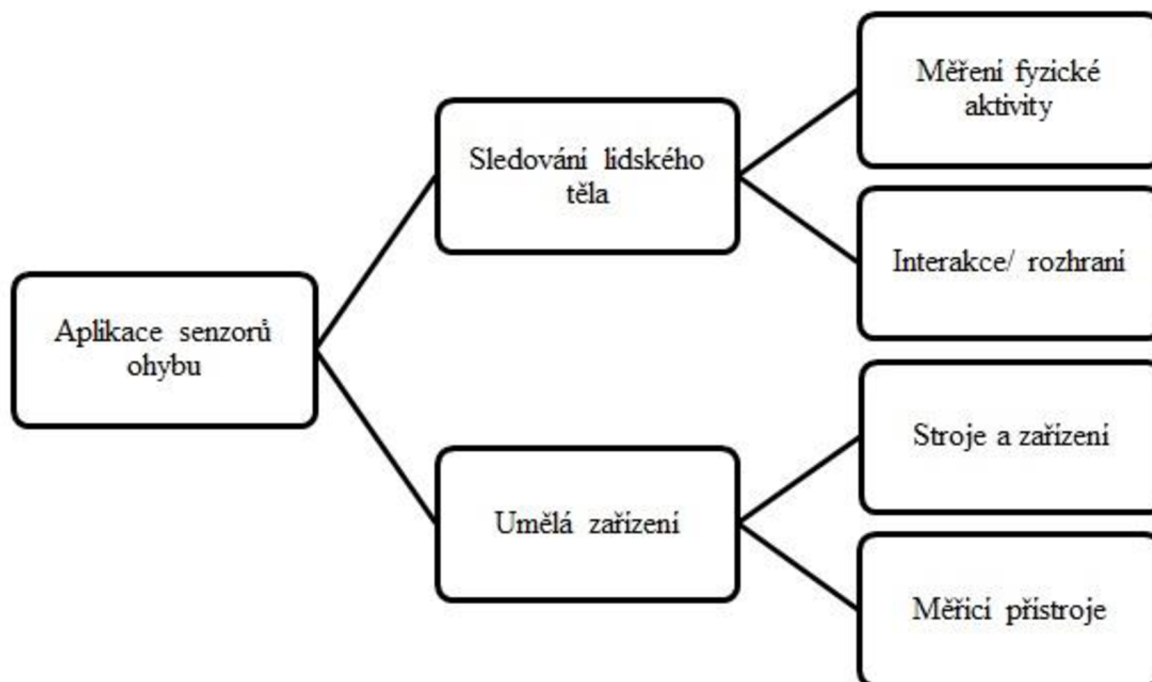


Obrázek 2: Schéma senzoru ohybu [6]

1.4 Možnosti aplikace senzorů ohybu

Základní aplikace flex senzorů se týkají biometrických měření horních končetin (prstů, rukou, zápěstí, loktů a ramen), hlavy a trupu (krku, plic, hrtanu, hrudníku a zad), tvaru svalů a dolních končetin (kolen, nohou, kotníků a chodidel). Tyto aplikace jsou určeny pro diagnostické a léčebné účely (rehabilitace, kineziologie, diagnostika, fitness), pro návrh rozhraní člověk-přístroj, pro modelování gest a jejich rozpoznávání.

Dále mohou být tyto senzory částečně užitečné při vývoji systémů pro integraci či propojení s virtuálním prostředím nebo rozšířenou realitou a také mohou umožňovat interakci člověka s počítačem. Mohou také najít uplatnění v různých jiných odvětvích od měřících systémů po hudební nástroje, od kontrolních systémů v ortézách a protézách po kontrolní systémy v automobilovém průmyslu a tak dále. Na obrázku 3 je uveden diagram reprezentující aplikace senzorů ohybu. [6]



Obrázek 3: Diagram aplikace senzorů ohybu

1.4.1 Využití senzoru při měření ohybu ruky

Ruka hraje roli při provádění jemných manipulativních pohybů (prsty a palec pro operování, vnitřní svaly, aktivity vyžadující obratnost), při uchopení a uvolnění předmětů a nástrojů (palec je umístěn naproti ostatním prstům), slouží jako smyslový orgán pro poznávání prostředí a rozpoznávání objektů (dlaň a konečky prstů bohatě zásobené receptory, velká plocha somatosenzorické kůry, zpětná vazby, stereognozie (schopnost poznat hmatem tvar předmětů), používání v komunikaci a vyjadřování emocí. [8]

1.4.1.1 Anatomická struktura ruky

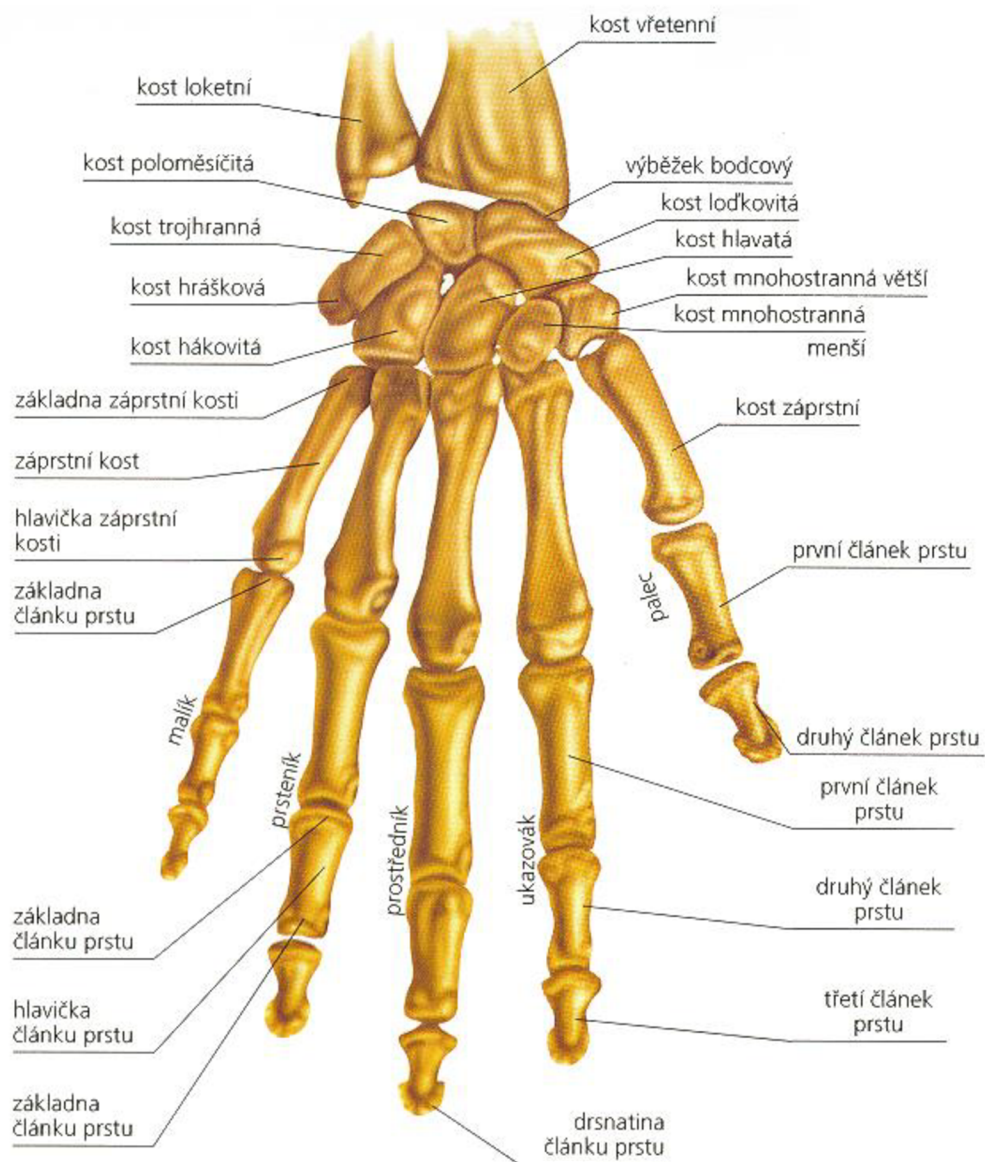
Pouze pro uvedení do problematiky pohybu ruky bude v práci stručně zmíněna i anatomická struktura ruky, znalost anatomie je důležitá pro další oddíly této práce.

Kostra ruky je tvořena kůstkami zápěstními (ossa carpi), které jsou seřazeny do dvou příčných řad po 4 kostech, a záprstními (ossa metacarpalia), u kterých popisujeme bazi (basis), tělo (corpus) a hlavičku (caput), a články prstů (phalanges) – 2 na palci, 3 na ostatních prstech, na každém článku popisujeme bazi (basis), tělo (corpus) a hlavici (caput phalangis).

Pohyblivost umožňují klouby ruky (karpometakarpální, metakarpofalangeální a interfalangeální kloub), silný dlaňový (palmární) vaz a postranní (kolaterální) vazy.

Tři klenby ruky zajišťující její charakteristické držení: podélná (longitudinální; rovnoběžná s dlouhou osou těla nebo končetiny), příčná vzdálená (distální; umístěná na opačné straně, než je počátek) a příčná bližší (proximální; bližší počátku či vzniku). [9]

Více popsána anatomická struktura ruky je uvedena na obrázku 4.



Obrázek 4: Anatomie ruky [7]

1.4.1.2 Pohyby ruky a stupně volnosti

Pohyby ruky jsou: ohnutí (flexe; pohyb, při kterém se zmenšuje kloubní úhel), natažení (extenze; pohyb, při kterém se zvětšuje kloubní úhel), odtažení (abdukce; pohyb směrem od osy těla), přitažení (addukce; pohyb směrem k ose těla). Tato práce se bude zabývat pouze flexí ruky, přesněji pouze prstů. [9]

Změna velikosti kloubního pouzdra (zmenšení kloubního úhlu) způsobuje výrazný nárůst ramene síly a narůstá také velikost flekčního momentu síly. Pro flexi asi 60° v metakarpofalangeálním kloubu je velikost posunu šlachy rovna velikosti ramene šlachové síly. Pro pohyb prstu z maximální extenze do maximální flexe je trajektorie ve tvaru spirály.

Pohyblivost soustavy těles je určena jejich vzájemnými vazbami (kinematickými dvojicemi), jejich pohyblivostí a dále konfigurací celé soustavy. Vyjadřuje ji stupeň volnosti. Stupeň volnosti je počet nezávislých proměnných ve vztažném systému, které potřebujeme k jednoznačnému určení polohy tělesa v prostoru. Rozsah kloubní pohyblivosti v intencích dílčích stupňů volnosti je vymezen intraartikulárními (uvnitř kloubu) komponentami (např.: neshoda (inkongruence) akrtikulujících ploch, vazy, stav kloubních chrupavek, atd.) a extraartikulárními (mimo kloubními) komponentami (vazy, kloubní pouzdro, atd.). U ruky rozlišujeme 3 stupně volnosti:

- pronace/supinace
- flexe/extenze
- ulnární/radiální dukce

Limitace pohybu prstů je způsobena:

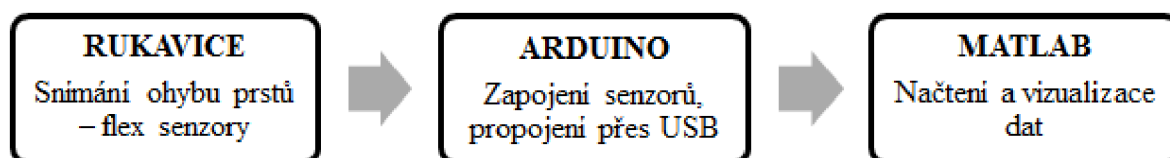
- propojením šlach na hřbetu ruky
- u III., IV., V. prstu – šlachy hlubokého flexoru ze stejného svalu
- u ukazováku – individuální bříško pro šlachy

Ani v nejsložitějších situacích se prsty nepohybují nezávisle na sobě. V mnoha případech se jeden prst musí pohybovat více než ostatní. Nejsložitější problematikou je simultánní kontrola velkého počtu mechanických stupňů volnosti.

Maximální úhly ohybů prstů v jednotlivých kloubech jsou: od metakarpofalangelního spojení ke konci prstu jsou to úhly: 90° (malíček až 95°), 100 až 110°, 90°. Úhly závisí na tom, zda se ohýbají všechny prsty najednou nebo pouze jeden. [8]

2 NÁVRH HARDWAROVÉ A SOFTWAREVÉ ČÁSTI

V této sekci je rozebrána problematika návrhu jak hardwarové, tak softwarové části bakalářské práce. Je zde popsán návrh rukavice se senzory ohybu – diskuze použitého materiálu, omezení apod., návrh komunikačního rozhraní mezi dvěma prostředími (Arduino a Matlab) a návrh vizualizačního prostředí v programu Matlab R2016a. Z návrhové části vychází následná realizace.



Obrázek 5: Blokové schéma systému

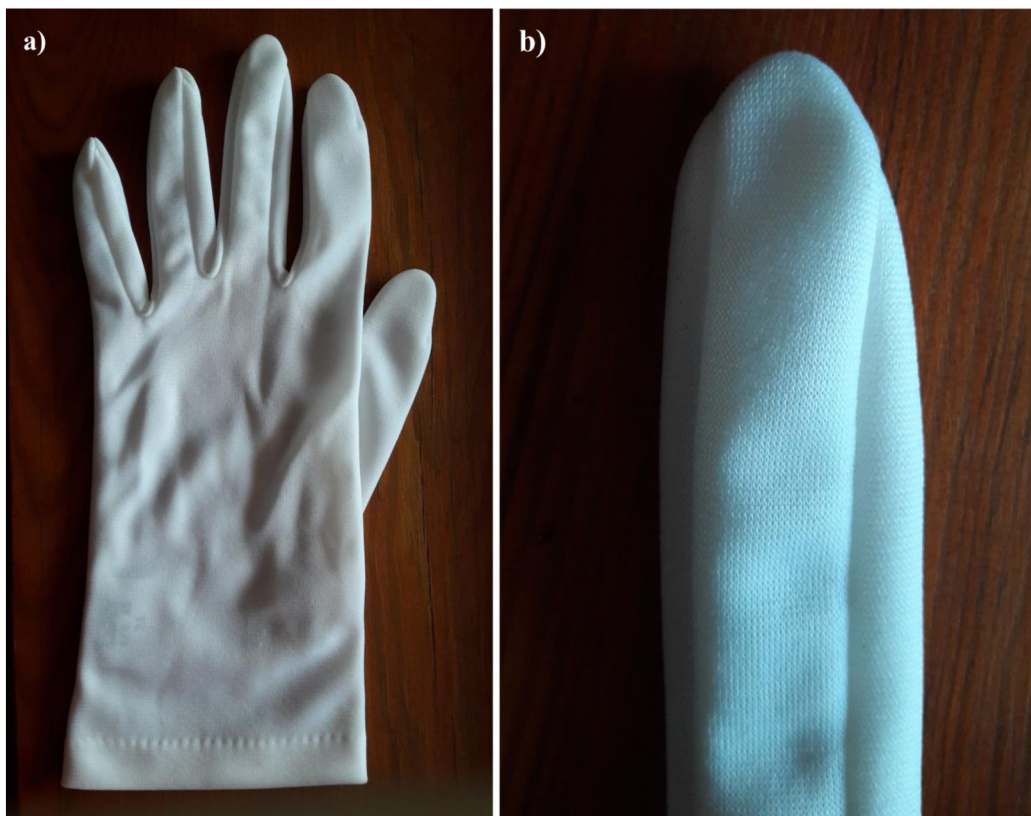
2.1 Návrh rukavice

Zvolené senzory ohybu a jejich parametry byly popsány v předchozí kapitole, dalším bodem je materiál rukavice a možnosti její realizace.

2.1.1 Materiál rukavice

Mezi požadavky kladené na materiál rukavice patří: přilnavost, elasticita, vratnost deformace, řídký úplet vláken. Zjednodušeně řečeno, je třeba vybrat materiál, do kterého / na který lze snadno připevnit senzory a který při ohybu prstů neztratí svůj původní tvar. Jak už bylo zmíněno v odstavci 1.3.2, senzory mění svůj odpor i vůči jemným změnám podkladu, na kterém jsou upevněny, z tohoto důvodu je tedy nutné, aby rukavice držela tvar a přiléhala na prsty i při ohýbání a pohybu prstů.

Po zhodnocení různých materiálů rukavic (čistě bavlněných rukavic či bavlněných s příměsí lycry, nylonových i polyesterových rukavic) byly vybrány jako vhodné pro tuto práci nylonové rukavice (100% polyamid) od firmy Tostex spol. s r. o., které jsou vhodné kromě přilnavého a elastického materiálu i proto, že mají na prstech švy, které umožňují kvalitní ukotvení senzorů.



Obrázek 6: a) Nylonová rukavice, b) detail švu na jednom prstu

2.1.2 Arduino

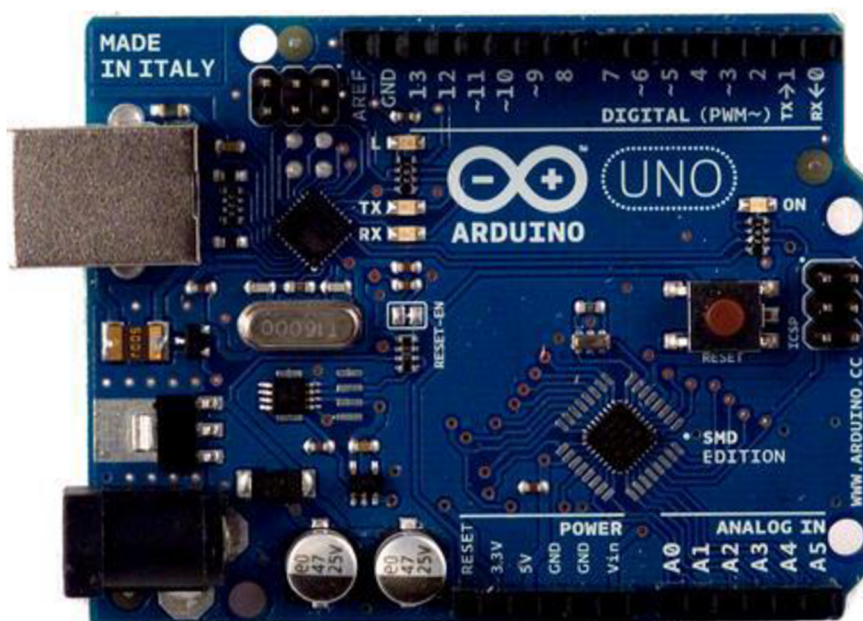
Poté co na rukavici připojíme senzory ohybu, a stiskem ruky provedeme flexi senzoru, je nutné vyhodnotit výstupní signál, který bude později zpracován v Matlabu. Akvizice a současná digitalizace signálu je realizována pomocí mikroprocesoru. K tomu využijeme OpenSource platformu Arduino UNO. Vývojová deska Arduino UNO je zobrazena na obrázku 7 a její parametry jsou popsány níže.

Arduino je možné programovat v jazycích: C nebo C++. Mnohem jednodušší je ale použití knihovny Wiring, která je v současné době pro Arduino už tak rozšířená, že se o ní někdy mluví jako o samostatném programovacím jazyku. [10]

Parametry vývojové desky Arduino UNO

- Mikrokontrolér
 - Čip ATmega328
 - Frekvence 16 MHz
 - Paměť 32 KB

- Vstupy a výstupy
 - 14 x digitální vstup/výstup (6 x PWM)
 - 6 x analogový vstup
- Rozhraní
 - USB 2.0 (převodník na sériový port)
 - SPI konektor
- Napájení
 - 5 V přes rozhraní USB
 - 7-12 V z adaptéru či baterie [11]



Obrázek 7: Vývojová platforma Arduino UNO [10]

2.2 Návrh komunikačního rozhraní

Pro načtení analogového signálu a pozdější vizualizaci pohybů ruky je nejprve nutné navrhnout komunikační rozhraní mezi vývojovou deskou Arduino UNO a programem Matlab R2016a. Pro tyto účely se jeví vhodné využít softwarovou podporu MATLAB Support Package for Arduino Hardware.

2.2.1 MATLAB Support Package for Arduino Hardware

S tímto balíčkem, který je volně dostupný ke stažení na stránkách společnosti MathWorks, může uživatel využít Matlab k interaktivní komunikaci s deskou Arduino přes USB rozhraní. Balíček umožňuje provádět úkony jako například:

- Získávat analogová a digitální data ze senzorů z desky Arduino
- Ovládat další zařízení s digitálními a PWM výstupy
- Pohánět DC, Servo a krokové motory
- Přistupovat k periferním zařízením a senzorům připojeným přes I2C nebo SPI
- Tvořit vlastní doplňky pro propojení s dalšími hardwarovými a softwarovými knihovnami [12]

Jak již bylo zmíněno, tento balíček umožňuje i přímé načítání dat z analogových pinů vývojové desky Arduino, což se jeví jako velice výhodné pro další úkoly této práce.

2.2.2 Čtení signálu ze senzorů

Po propojení senzorů s vývojovou deskou Arduino je třeba načíst analogový signál, který odpovídá hodnotám vstupního napětí sníženého v důsledku průchodu odporovými flex senzory a díky němuž jsou viditelné změny odporu a tudíž i napětí v čase po ohnutí jednotlivých prstů. Načtení signálu je zrealizováno pomocí programovacího prostředí Matlab R2016a, díky komunikaci Arduina s tímto prostředím, která je popsána v kapitole 2.2.1.

Zvolená metoda využívá načtení hodnot analogového napětí pomocí funkce *readVoltage*, která do proměnné načte hodnotu napětí. Jelikož flex senzory plní v elektrickém obvodu funkci odporů (rezistorů), můžeme takto změřit úbytek napětí na výstupu senzoru, jehož odpor se, jak již bylo zmíněno, mění se změnou mechanického tlaku na senzor (ohybem).

Další alternativou by bylo načítání analogového signálu pomocí knihovny Wiring, ve které lze programovat vývojovou platformu Arduino. Tato metoda byla využita pro testovací účely a ukázala se být méně vhodná.

2.3 Návrh vizualizačního prostředí

Vizualizační prostředí bude realizováno v programu MATLAB a bude mít podobu anatomického modelu horní končetiny vytvořeného z jednotlivých vektorů a křivek. K vytvoření vizualizačního prostředí bude použita verze Matlab R2016a.

2.3.1 MATLAB[®]

MATLAB (MATrix LABoratory, maticová laboratoř) je výkonné interaktivní prostředí pro vědecké výpočty, jež spojuje technické výpočty, vizualizaci dat a programovací jazyk. Tuto aplikaci vyvíjí firma MathWorks, která ji dodává s řadou dostupných rozšíření a toolboxů.

K jeho základním vlastnostem patří vysokoúrovňový jazyk, otevřený a rozšiřitelný systém, velké množství aplikačních knihoven, podpora vícerozměrných polí a datových struktur, interaktivní nástroje pro tvorbu GUI, import/export dat do mnoha formátů, komunikace s externími přístroji v reálném čase nebo rozšiřitelnost modulů o jazyky C, C++ nebo Java. [13]

2.3.2 Vizualizace dat

Vizualizace dat bude prováděna v reálném čase (real-time) tak, aby odpovídala co nejpřesněji pohybům končetiny, na níž je nasazena rukavice se senzory ohybu. Z tohoto důvodu bude i vizualizační prostředí vytvořeno takovým způsobem, aby co nejdříve napodobovalo anatomickou podobu končetiny.

V návrhové části práce je uvažována varianta načítání analogových hodnot napětí pomocí funkce *readVoltage*, které se ukázalo být vhodnější pro vizualizaci ohybů prstů. Při ohýbání prstů – tedy při změně odporu flex senzorů – dochází k vychylování hodnot výstupního napětí, což bude využito k vizualizaci těchto ohybů. Tedy pokud vstupní napětí z vývojové desky Arduino UNO činí 5 V, s využitím děliče napětí rozdělíme tuto hodnotu na menší části, aby napětí na senzoru bylo lépe měřitelné, a to: u kratších senzorů v poměru 1:3, u delších senzorů v poměru 1:1. Sensory nemají schopnost rozlišit konkrétní místo ohybu, mění svůj odpor nezávisle na místě deformace, ale pro vizualizaci je třeba všechna potenciální místa zohlednit.

2.3.3 Toolbox pro modelování komplexních mechanismů

Jedná se o balíček funkcí pro modelování a simulaci všech mechanismů sestávajících z otevřených kinematických řetězců. Tento nástroj umožňuje definovat jakýkoli manipulátor popsany pomocí Denavit-Hartenbergových parametrů a následně spojit mechanismy vytvořené tímto způsobem do jednoho komplexního mechanismu.

The Matlab Toolbox for Modeling Complex Mechanisms (toolbox pro modelování komplexních mechanismů) může být využit pro realistickou vizualizaci pohybů robota nezbytnou pro výzkumné či didaktické účely. Dostupné funkce umožňují zobrazit realistický model a mechanismus založený na výchozím i uživatelsky definovaném vzhladu. [15]

2.3.3.1 Denavit-Hartenbergovy parametry

Volba polohy a orientace souřadnicových systémů soustavy a také tvar transformačních matic jsou nejednoznačné, proto je pro algoritmizaci úloh řešených na počítači potřebná obecná systematická metoda vhodná pro popis vzájemné polohy a orientace kloubů za použití co nejmenšího počtu parametrů.

Pro popis otevřených kinematických řetězců bývá v robotice často používána Denavit-Hartenbergova konvence. V tomto případě je každému spojení manipulátoru přiřazen souřadný systém takovým způsobem, že osa z souřadného systému je umístěna podél osy kloubu i , osa x je rovnoběžná s normálou k osám kloubu i a $i + 1$, osa y doplňuje pravostranný souřadný systém. Čtyři základní DH parametry v této konvenci jsou definovány následovně:

- θ – rotace kolem osy z (úhel mezi X_{i-1} a X_i kolem Z_i)
- d_i – vzdálenost na ose z (kloubní offset – vzdálenost mezi X_{i-1} a X_i podél Z_i)
- a_i – délka spojení (vzdálenost mezi Z_i a Z_{i+1} podél X_i)
- α_i – úhel mezi dvěma po sobě následujícími osami z (otočení kloubu – úhel mezi Z_i a Z_{i+1} kolem X_i) [15] [16]

Pro lepší pochopení kinematiky horní končetiny v souvislosti s DH parametry je v příloze C obsaženo kinematické schéma ruky. [18]

Pro popis ukazováku nabývají čtyři Denavit-Hartenbergovy (DH) parametry hodnoty definované v tabulce 1.

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	π	0	0	θ_1
2	$-\pi/2$	0	0	θ_2
3	0	l_2	0	θ_3
4	0	l_3	0	θ_4

Tabulka 1: DH parametry pro ukazovák

DH parametry ostatních prstů (kromě palce) jsou podobné, rozdíly se vztahují k délce článků l_2 a l_3 . K modelování palce je vyžadována nenulová délka prvního článku, a tedy parametry pro palec jsou následující (tabulka číslo 2):

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	π	0	0	θ_1
2	$-\pi/2$	l_1	0	θ_2
3	0	l_2	0	θ_3
4	0	l_3	0	θ_4

Tabulka 2: DH parametry pro palec

Dalším podstatným parametrem pro vytvoření modelu končetiny jsou pohybové limity pro jednotlivé prsty již zmíněné v kapitole 1.4.2.1. Pro přehlednost jsou uvedeny v následující tabulce 3. Poznámka – prsty jsou číslovány od palce.

prst	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
1	$[-\pi/2, 0]$	$[0, \pi/2]$	$[0, \pi/2]$	$[0, \pi/2]$
2	$[-\pi/9, 0]$	$[-\pi/2, 0]$	$[-\pi/2, 0]$	$[-\pi/2, 0]$
3	$[-\pi/18, \pi/18]$	$[-\pi/2, 0]$	$[-\pi/2, 0]$	$[-\pi/2, 0]$
4	$[0, \pi/9]$	$[-\pi/2, 0]$	$[-\pi/2, 0]$	$[-\pi/2, 0]$
5	$[0, \pi/5]$	$[-\pi/2, 0]$	$[-\pi/2, 0]$	$[-\pi/2, 0]$

Tabulka 3: Pohybové limity pro jednotlivé prsty

2.3.3.2 Využívané funkce a jejich popis

Tento balíček funkcí pro modelování byl zvolen tak, aby poskytoval potřebné funkce pro vytvoření vizualizačního prostředí. Toolbox se jeví jako vhodný k modelování komplexního mechanismu horní končetiny, který je anatomicky věrný a jehož pohyby jsou ve fyziologických normách.

Nejprve je tedy tvořen model končetiny, poté jsou jednotlivým prstům přiřazeny pohybové limity, díky kterým následně můžeme naplánovat trajektorii pohybu jednotlivých prstů, a poté dochází k samotné vizualizaci, která závisí na vstupních hodnotách napětí načtených ze senzorů ohybu.

Z uvedeného toolboxu jsou využívány v rámci bakalářské práce pouze některé funkce, jejichž popis a vstupní a výstupní proměnné jsou uvedeny v tabulce 3.

Název funkce	Vstupní proměnné	Výstupní proměnné	Popis
Robot	Dh, joints	r	Základní funkce k definici manipulátoru – končetiny
Robot_complex	R1, R2, R2, ...	R	Funkce k vytvoření komplexního mechanismu
Robot_motion	R, q, ..., delay, trace)		Funkce k naplánování trajektorie pohybu mechanismu

Tabulka 4: Popis jednotlivých funkcí [16]

3 REALIZACE RUKAVICE

Tato kapitola obsahuje postup při realizaci rukavice se senzory ohybu doplněný o dokumentaci jednotlivých kroků. Provedení rukavice má vliv na možnosti vizualizace ohybů, proto je této kapitole věnována zvláštní pozornost.

K realizaci rukavice se senzory ohybu bylo využito následujících součástí a přístrojů: nylonová rukavice (viz 2.1.1), tři flex senzory o délce 2,2 palce a dva flex senzory o délce 4,5 palce od společnosti SpectraSymbol (viz 1.3.2), textilní oboustranná lepicí páska, mikropájka ZD-99 od společnosti TIPA, spol. s r. o., cínový drátek, konektory, smršťovací bužírka a vodiče. Rukavice je v této podobě připravena na připojení k vývojové desce Arduino, ať už přímo nebo přes nepájivé pole.

3.1 Připevnění senzorů

Nejprve byly na rukavici připevněny proužky textilní oboustranné lepicí pásky, jak lze vidět na obrázku 8.



Obrázek 8: Rukavice s proužky textilní oboustranné lepicí pásky

Po odlepení ochranné vrstvy byly připevněny flex senzory následujícím způsobem – 3 senzory o délce 2,2 palce na malíček, prostředníček a palec a 2 senzory o délce 4,5 palce na prsteníček a ukazovák. Umístění senzorů je zobrazeno na obrázku 9.



Obrázek 9: Umístění flex senzorů na jednotlivé prsty

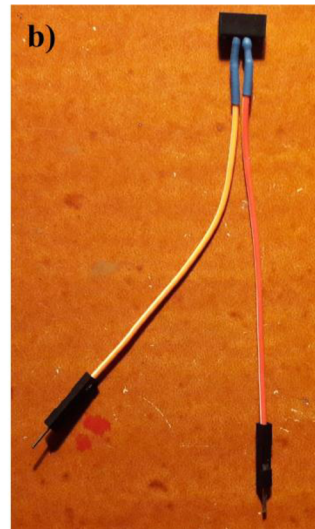
3.1.1 Propojení senzorů s vývojovou deskou Arduino

Aby mohly být senzory připojeny na nepájivé pole a následně k platformě Arduino, byly vyrobeny speciální konektory (viz obrázek 10 b)) pomocí vodičů, mikropájky ZD-99 (viz obrázek 10a)) a smršťovací bužírky.

Na flex senzory byly nasazeny vytvořené konektory, což byla výhodná a bezpečnější metoda než pájení konektorů přímo na flex senzory, které by se takto mohly poškodit a jejichž nahrazení by bylo nákladné i časově náročné. Rukavice s připevněnými senzory a nasazenými konektory pro připojení k nepájivému poli je zobrazena na obrázku 11.

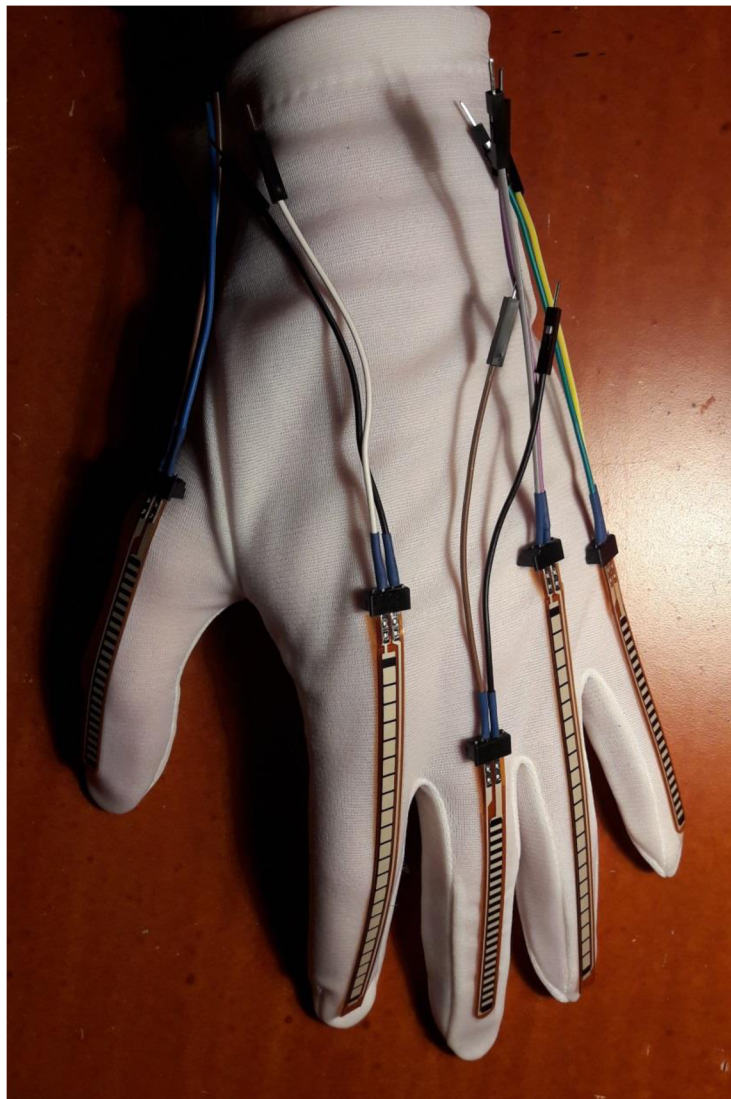


a)



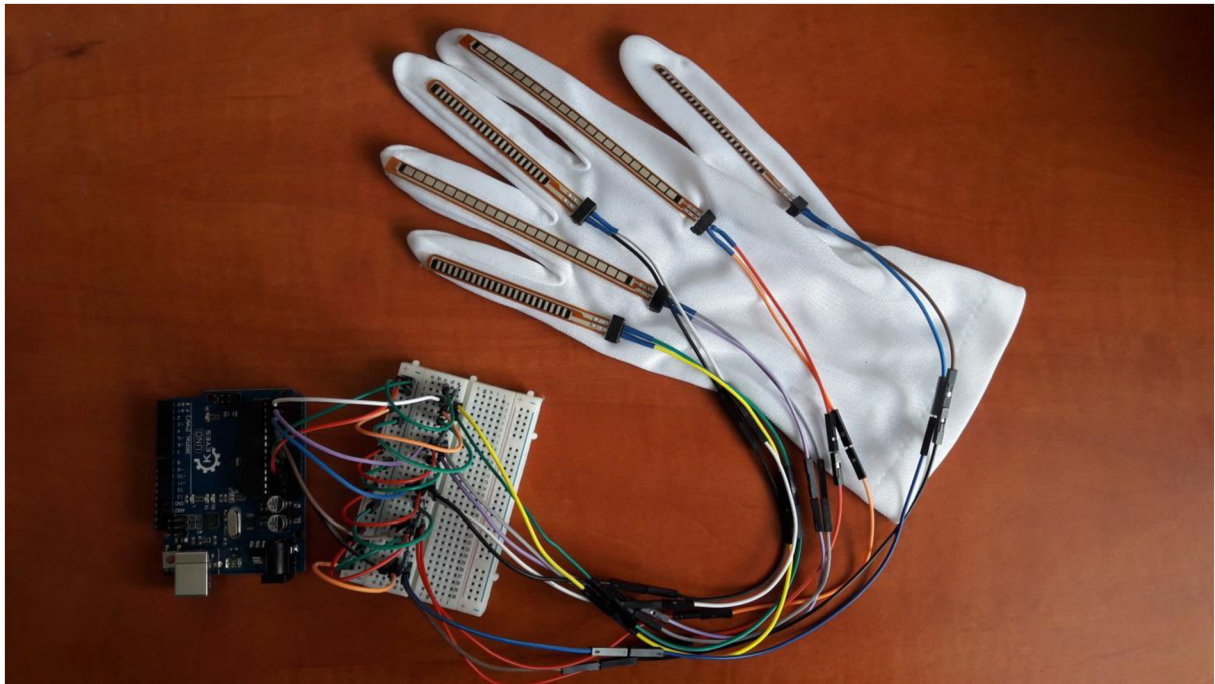
b)

Obrázek 10: a) Mikropájka ZD-99, b) vytvořený konektor pro připojení senzoru



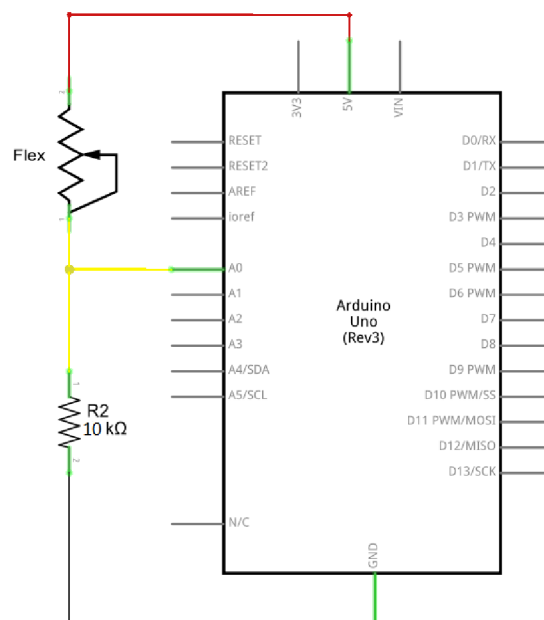
Obrázek 11: Rukavice se senzory a konektory pro připojení k nepájivému poli

K výslednému zapojení byly použity přídatné odpory, které vytvořily napěťové děliče, dále nepájivé kontaktní pole ZY-60, vodiče a vývojová deska Arduino UNO, ilustrační snímek je na obrázku 12.



Obrázek 12: Připojení flex senzorů k platformě Arduino přes nepájivé kontaktní pole

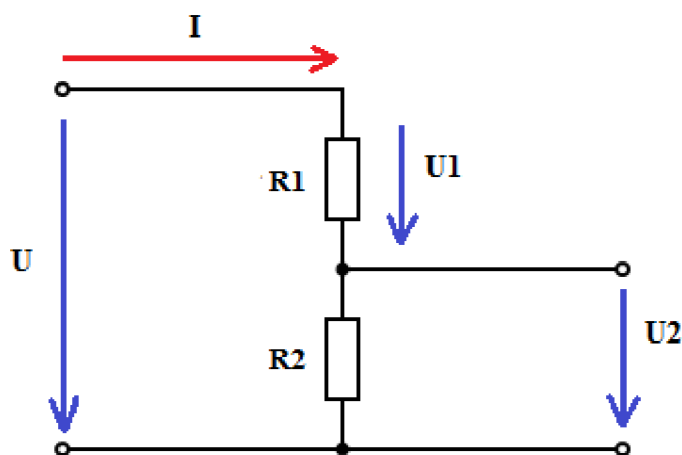
Schéma obvodu pro zapojení jednoho flex senzoru a přídatného odporu do vývojové desky Arduino je na obrázku 13.



Obrázek 13: Schéma obvodu [17]

Čtení analogových dat na Arduino pracuje v režimu snímání aktuální hodnoty napětí na vstupním pinu, tedy obdobně jako voltmetr. Při vstupním napětí 5V zobrazí sériový monitor hodnotu 1023 a při napětí 0V hodnotu 0. Pomocí funkce *analogRead* můžeme načíst hodnotu napětí na flex senzoru, a tím získat příslušnou hodnotu pro stupeň flexe prstu. Ovšem při zapojení pouze flex senzoru je hodnota v sériovém monitoru 1023, čili nemá už kam růst při teoretickém snížení odporu (při ohnutí senzoru v opačném směru, než je fyziologicky možné, totiž hodnota odporu klesá). Aby tedy mohla být změřena změna odporu flex senzoru na analogovém pinu Arduina, je nutné připojit do obvodu ještě přídatný odpor, který bude neměnný (jsou použity rezistor 10 K Ω), a tím vytvořit napěťový dělič, jehož obecné schéma je na obrázku 14.

Pokud je tedy vstupní napětí 5V, tak hodnota napětí na každé části (na flex senzoru i na rezistoru) je přímo úměrná jejímu odporu. Takže v případě, že flex senzor a rezistor mají stejný odpor, napětí 5V je rozděleno rovnoměrně (2,5 V) na každou část (hodnota 512 na sériovém monitoru). Napětí tedy bude rozděleno následovně: u kratších senzorů (2,2“) v poměru 1:3, u delších senzorů (4,5“) v poměru 1:1.



Obrázek 14: Obecné schéma napěťového děliče

Výše zmíněný postup je východiskem pro vytvoření laboratorní úlohy, ve které budou studenti pracovat s knihovnou Wiring. Pro účely vizualizace ohybu je ovšem využíváno načítání dat pomocí programovacího prostředí Matlab, hodnoty uvedené v tabulce 4 jsou tedy hodnoty napětí získané využitím funkce *readVoltage* zmíněné v kapitole 2.2.2.

Do tabulky číslo 4 byly zaznamenány hodnoty napětí pro 10 stupňů ohybu jednotlivých prstů – bez flexe (0), postupná flexe interfalangeálních kloubů (1 až 8) a úplná flexe (zatnutí pěsti, 9). Je zde patrná lineární závislost změny napětí na výstupu na stupni ohybu. Případné drobné nelinearity v elektrickém chování senzorů jsou závislé pouze na poškození či vzniku miniaturních prasklin odporového prvku v průběhu mechanického namáhání a deformace.

Na palci, prostředníku a malíku jsou aplikovány krátké flex senzory, proto jsou zde hodnoty odlišné, jak již bylo uvedeno v kapitole 2.3.2.

Stupeň flexe	Hodnota napětí				
	palec	ukazovák	prostředník	prsteník	malík
0	1,246	2,576	1,237	2,449	1,285
1	0,841	2,033	0,860	1,887	0,909
2	0,635	1,980	0,846	1,818	0,890
3	0,562	1,896	0,797	1,764	0,855
4	0,557	1,784	0,772	1,711	0,846
5	0,508	1,740	0,679	1,672	0,831
6	0,499	1,711	0,650	1,652	0,797
7	0,479	1,667	0,631	1,642	0,758
8	0,455	1,598	0,606	1,545	0,530
9	0,430	1,510	0,523	1,427	0,477

Tabulka 5: Naměřené hodnoty pro 10 stupňů ohybu prstů

4 REALIZACE VIZUALIZAČNÍHO PROSTŘEDÍ

V této části bakalářské práce je popsán proces vytváření realizačního prostředí, jehož návrh byl již popsán v kapitole 2.3. Jsou vysvětleny principy jednotlivých funkcí a výsledné prostředí je zdokumentováno pomocí snímků pohybů vytvořeného modelu končetiny.

Vizualizační prostředí je realizováno v jedné z nejnovějších verzí programu MATLAB, a to R2016a. K jeho realizaci byl použit toolbox Matlab Toolbox for Modeling, který byl již popsán v kapitole 2.3.3 a má podobu anatomického modelu horní končetiny (od zápěstí po konečky prstů) sestaveného z jednotlivých vektorů a křivek.

Vývojový diagram, který je obsahem přílohy A, je pro přehlednost zjednodušen, tedy zobrazen je jen princip vizualizace ohybu jednoho prstu. Zdrojový kód pro tvorbu vizualizačního prostředí je obsahem přílohy B. Kód pro načítání signálu a vizualizaci pohybů ruky je obsažen na přiloženém DVD.

4.1 Čtení signálu

Díky využití softwarové podpory pro Arduino zmíněné v kapitole 2.2.1 lze velmi jednoduše zahájit komunikaci s vývojovou deskou Arduino UNO. Realizace tohoto spojení proběhne pomocí příkazu:

```
a = arduino();
```

Vstupní proměnná může být vynechána, nebo může obsahovat specifikaci portu či vývojové desky (UNO, DUE, MEGA, ...), a výstupní proměnnou je hardwarové připojení.

Samotné čtení signálu z analogového pinu vývojové desky Arduino probíhá pomocí funkce *readVoltage*. Příkaz pro čtení dat vypadá následovně:

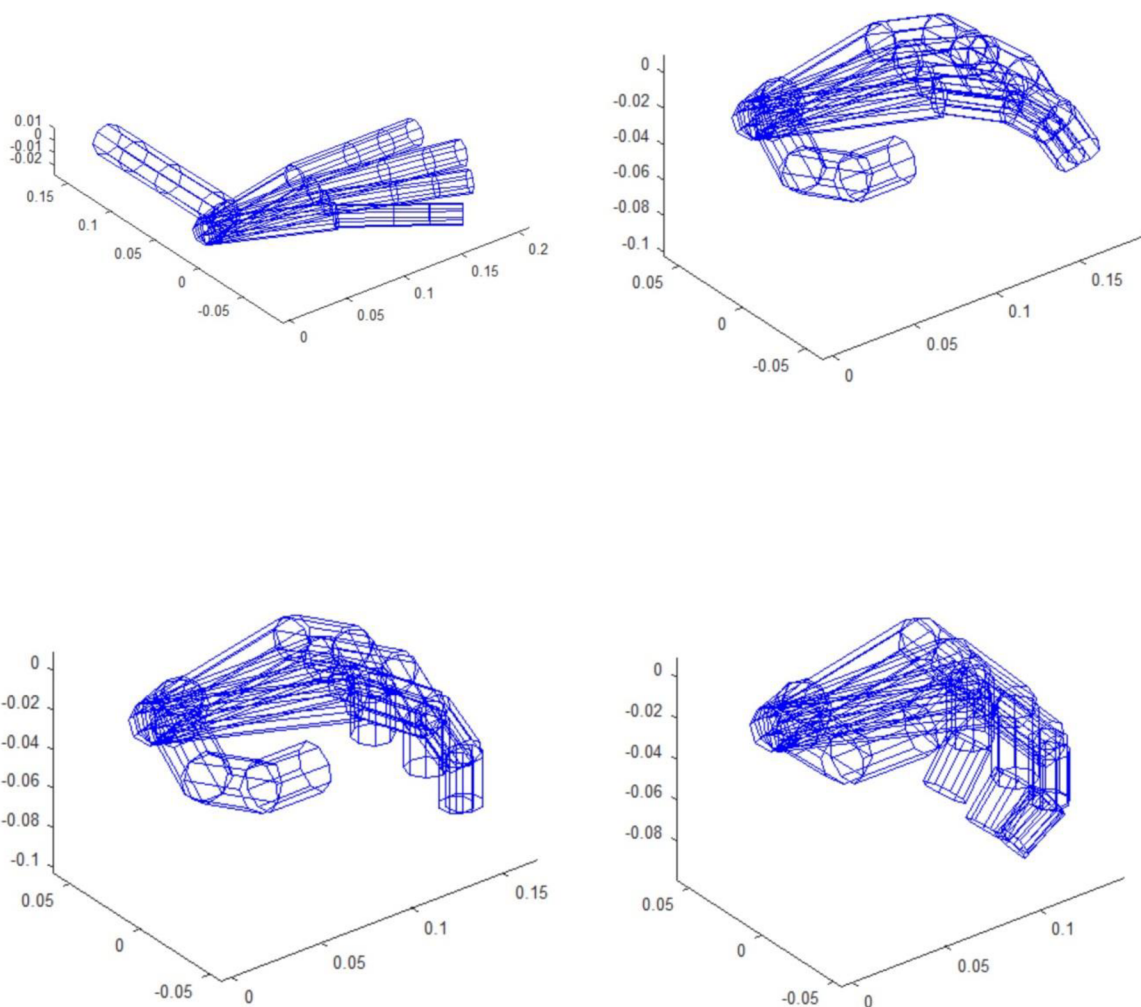
```
b = readVoltage(a, 'A1');
```

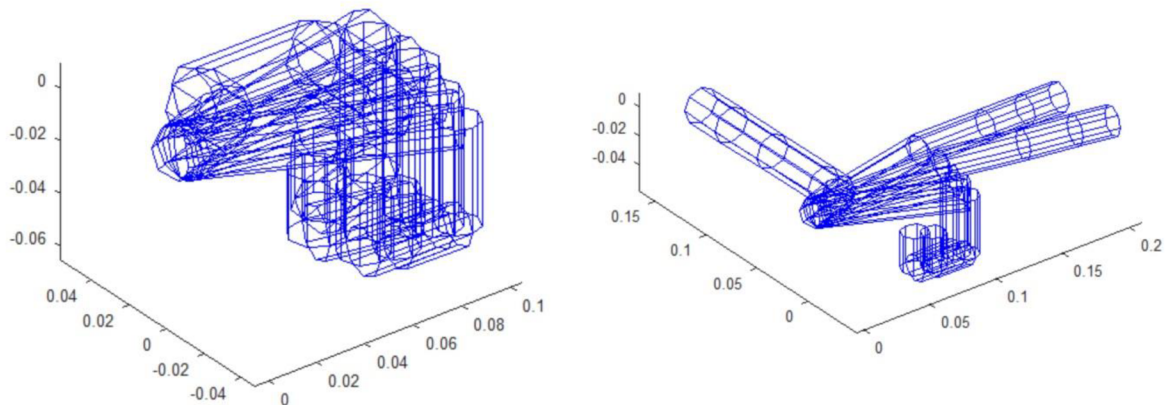
Vstupními proměnnými jsou: již zmíněné hardwarové připojení a specifikace analogového pinu (A0 – A5). Výstupní proměnnou je vektor hodnot výstupního napětí.

4.2 Vizualizace pohybů

Vizualizační prostředí bylo vytvořeno za pomoci již popsaného toolboxu pro modelování komplexních mechanismů s využitím DH parametrů a pohybových omezení pro jednotlivé prsty – viz kapitoly 1.4.1.2 a 2.3.3.

Na obrázku 15 je zobrazena ruka v různých pozicích od natažených prstů po úplné zatnutí pěsti. Na posledním snímku je model ruky ukazující na prstech číslo 3.





Obrázek 15: Model ruky vytvořený pomocí toolboxu pro modelování

K vytvoření pohybů jednotlivých prstů je využívána funkce *robot_motion*, která funguje na principu plánování trajektorie každého konkrétního pohybu. Pokud například prst nevykonává žádný pohyb, je i přesto nutné vytvořit pro něj trajektorii, a to nulovou. Konkrétní příkaz pro rozpohybování prstů je uveden níže:

```
r = robot_motion(hand, [q1; q2; q3; q4; q5], 0.1, 0);,
```

kde *hand* značí model končetiny, *q1* až *q5* jsou jednotlivé vektory trajektorií pohybu, parametr 0.1 je zpoždění (delay) procesu vykreslování pohybu a parametr 0 je tzv. stopa (trace), která určuje způsob vykreslování pohybu – v tomto případě je v každém okamžiku viditelná pouze jedna konfigurace (pokud tento parametr nastavíme do pozice 1, jsou viditelné všechny konfigurace dané parametry *q*).

Parametry *q1* až *q5* musí vždy respektovat limitaci pohybů jednotlivých prstů uvedenou v kapitole 2.3.3.1 v tabulce 3, aby nedocházelo k vytváření trajektorií pohybů, které nejsou v souladu s fyziologickým normálem.

5 LABORATORNÍ ÚLOHA

Výstupem bakalářské práce je kompletní laboratorní úloha vhodná k výuce senzoriky, která je koncipována pro práci s jedním senzorem ohybu, slouží k experimentálnímu ověření vlastností senzoru a obsahuje vzorový protokol, který shrnuje teoretické i praktické poznatky o senzorech ohybu nabyté během laboratorního cvičení.

5.1 Zadání – práce s jedním senzorem ohybu

Studenti dostanou zadáno, aby se během laboratorního cvičení, zaměřeného na senzory ohybu, seznámili s principem fungování jednoho senzoru ohybu – tato úloha je koncipována pro práci se senzorem o délce 4,5“.

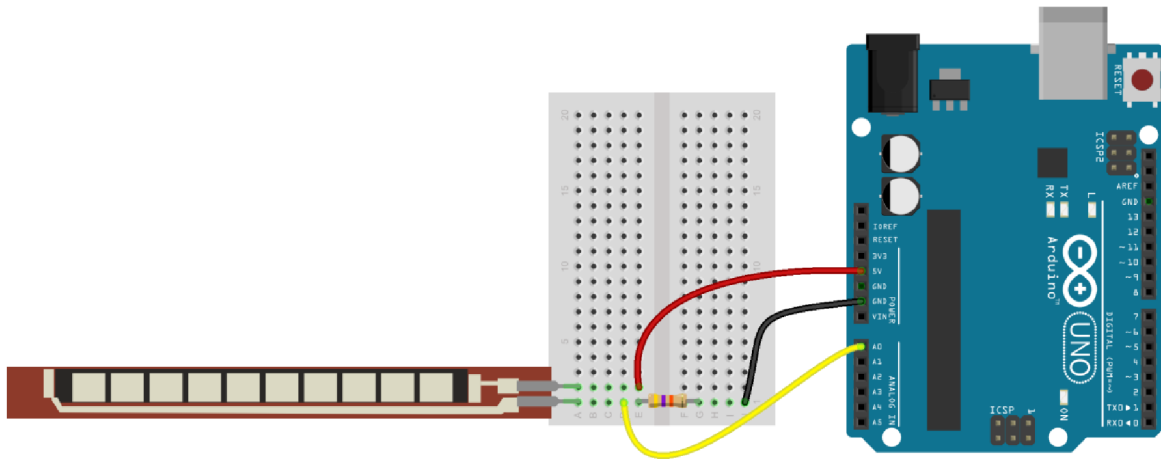
Úloha je logicky rozdělena na několik na sebe navazujících úkolů, a to: propojení senzoru ohybu s vývojovou deskou Arduino UNO přes nepájivé pole podle schématu v zadání, následné načtení signálu ze senzoru pomocí knihovny Wiring, ověření jeho statických a dynamických vlastností a vypracování protokolu – do tabulky zaznamenat naměřené hodnoty napětí na senzorech, zakreslit do grafu a posoudit průběh (lineární, exponenciální, ...).

5.1.1 Připojení flex senzoru

Prvním úkolem je propojení senzoru s vývojovou deskou Arduino UNO. Na každém pracovišti budou nachystány následující pomůcky:

- vývojová deska Arduino UNO
- nepájivé pole
- flex senzor o délce 4,5“
- vodiče
- rezistor o odporu 10 K Ω

Zadáno bude také schéma zapojení uvedené na obrázku 16.



Obrázek 16: Schéma zapojení flex senzoru [17]

5.1.2 Načtení signálu

Dalším úkolem je načtení dat z analogového pinu vývojové desky Arduino UNO, do kterého byl zapojen výstup senzoru ohybu. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.2, nejjednodušším způsobem, jak programovat Arduino je využití knihovny Wiring.

Zadání bude obsahovat pouze nápovědu k vytvoření jednoduchého kódu k načítání dat, který může pro načítání z analogového pinu A0 vypadat například takto:

```
void setup() {
  // inicializace sériové komunikace na 9600 bitů za sekundu:
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  // načtení vstupní hodnoty z analogového pinu 0:
  int sensorValue = analogRead(A0);
  // výpis požadované načtené hodnoty:
  Serial.println(sensorValue);
  // zpoždění mezi čtením hodnot
  delay(2500);
}
```

5.1.3 Ověření vlastností senzoru


Obsahem tohoto úkolu je vytvoření posloupnosti stupňů ohybu od stavu 0 (senzor je rovný – ohyb o 0°) až do stavu 9 (maximální ohyb o 180°) s krokem přibližně 20°. Studenti mají taktéž vyzkoušet ohyb senzoru v opačném směru a diskutovat změny hodnot na sériovém monitoru.

Hodnoty pro všechny stupně ohybu senzoru budou zapsány v tabulce obsažené v protokolu a následně vyneseny do grafu, u kterého bude posouzen průběh. V závěru protokolu je třeba diskutovat princip senzorů ohybu a jeho souvislost se změnou hodnot a průběhem grafu.

5.1.4 Obsah protokolu

Protokol obsahuje hlavičku dokumentu, kde budou vyplněny potřebné údaje. Dále zadání celého cvičení, využívané pomůcky, popis jednotlivých úkolů, tabulku pro zápis hodnot, milimetrový papír pro zakreslení grafu a prostor pro zápis závěrečné diskuze k úloze.

5.2 Vzorový protokol

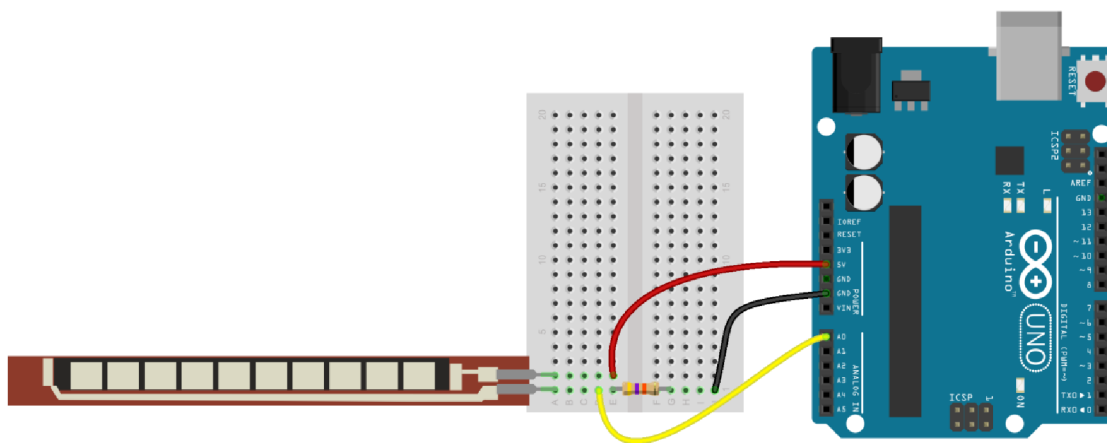
	Předmět	
	Jméno	
	Ročník	Studijní skupina
Datum	Den a čas	Odevzdáno
Číslo úlohy	Název úlohy <p style="text-align: center;">Ověření vlastností senzoru ohybu</p>	

Tabulka 6: Vzorová hlavička protokolu

Zadání: Ověřte vlastnosti senzoru ohybu s využitím vývojové desky Arduino UNO, vypracujte protokol – vyplňte tabulku, vynesete hodnoty do grafu a do závěru napište svými slovy, na jakém principu fungují senzory ohybu a jaké jsou jejich vlastnosti. Posuďte také, zda senzory rozlišují místo svého ohybu.

Pomůcky: vývojová deska Arduino UNO, nepájivé pole, flex senzor o délce 4,5“, 10 kΩ rezistor, vodiče

Úkol č. 1: Připojte senzor ohybu k vývojové desce Arduino dle následujícího schématu:



Obrázek 17: Schéma zapojení senzoru

Úkol č. 2: Vytvořte jednoduchý kód k načítání dat z analogového pinu A0. Napověda: sériovou komunikaci nastavte na 9600 baudů, k načítání využijte funkci *readAnalog* a data zobrazte v sériovém monitoru – funkce *Serial.println*.

Úkol č. 3: Postupně ohýbejte senzor od polohy 0 (rovný) až do polohy 9 (maximálně ohnutý) s krokem přibližně 20°. Hodnoty zaznamenejte do tabulky.

Stupeň ohybu	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
Hodnota										

Tabulka 7: Vzorová tabulka pro hodnoty ze sériového monitoru

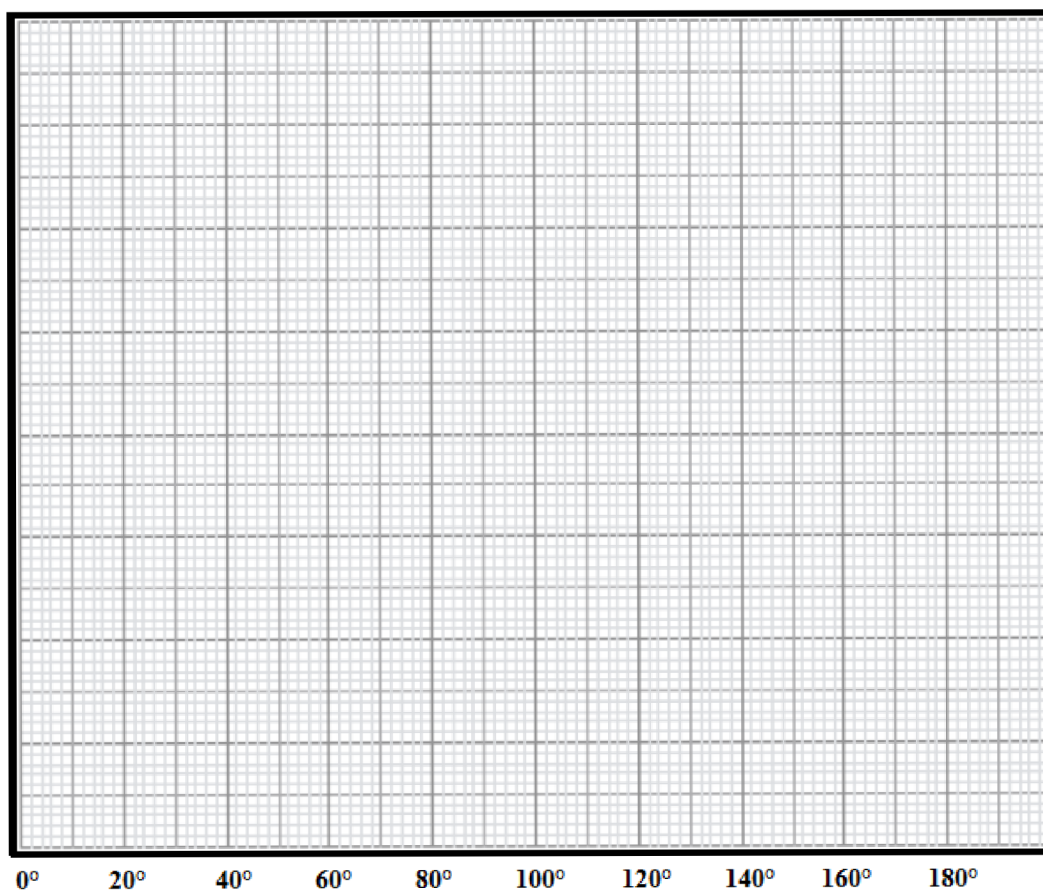
Vyzkoušejte ohyb v opačném směru a napište, jak se změní hodnoty na sériovém monitoru.

Stupeň ohybu	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
Hodnota										

Tabulka 8: Vzorová tabulka pro hodnoty při ohybu v opačném směru

Poznámka: Buďte opatrní při maximálním ohýbání senzoru, aby nedošlo k jeho poškození.

Úkol č. 4: Naměřené hodnoty vynesete do grafu a posuďte jeho průběh (lineární, exponenciální, ...). Osa x – stupně ohybu senzoru, osa y – hodnoty v sériovém monitoru.



Obrázek 18: Vzorové pole pro vytvoření grafu

Závěr:

6 DISKUZE

V této části práce budou diskutovány vytvořený demonstrační přípravek i laboratorní úloha, jejich současný stav, různé varianty realizace nebo případná vylepšení současného stavu.

6.1 Demonstrační přípravek

Pro realizaci rukavice se senzory ohybu byly využity senzory o dvou různých délkách, 2,2 a 4,5“, a to za předpokladu, že tak dojde k zohlednění všech potenciálních míst ohybu prstů – v metakarpofalangeálních i interfalangeálních kloubech. Experimentální cestou, jakou bylo například posuzování změn hodnot při čtení signálu z obou druhů senzorů ohýbaných se stejnou intenzitou, ale v jiných místech, bylo ovšem zjištěno, že použité flex senzory nemají schopnost rozlišovat konkrétní místo ohybu a reagují pouze na intenzitu deformace.

Taktéž materiál rukavice byl zvolen tak, aby byl přiléhavý a bylo možné na něj připevnit senzory, proto se nylonové rukavice jeví jako velmi vhodné, ale při dlouhodobějším používání a testování funkčnosti zapojení rukavice začalo docházet k postupnému opotřebení materiálu. Nehledě na to, že nedošlo k zohlednění různé velikosti ruky potenciálních uživatelů tohoto prostředku. V dlouhodobějším měřítku by se tedy pravděpodobně více osvědčil materiál, který by byl méně elastický, a přípravek by mohl být zhotoven minimálně ve dvou velikostech pro širší spektrum uživatelů.

Součástí demonstračního přípravku je i vizualizační prostředí. To bylo vytvořeno pomocí již zmiňovaného toolboxu pro modelování komplexních mechanismů tak, aby věrně reprezentovalo anatomickou strukturu končetiny. Ovšem samotná vizualizace ohybu prstů neprobíhá natolik rychle, aby se dalo říct, že se jedná o vizualizaci v reálném čase. To je způsobeno zpožděním v modelování celého mechanismu a plánování trajektorie pohybu prstů.

6.2 Laboratorní úloha

Uvedená laboratorní úloha je vhodná pro výuku sensoriky na technické vysoké škole. Zadání je optimalizováno pro práci s jedním senzorem ohybu, uvedené úkoly mají logickou návaznost tak, aby bylo patrné, co je očekávaným výstupem úlohy a co by mělo být obsahem vytvořeného vzorového protokolu.

Při tvorbě dané úlohy byla zohledněna možnost, že studenti neabsolvovali úvod do předmětu sensorika, a této situaci byla přizpůsobena obtížnost jednotlivých úkolů. Cílem bylo dosáhnout takového zpracování úlohy, které by bylo srozumitelné i pro širší laickou veřejnost.

ZÁVĚR

Úvodní část práce se věnuje rozpracování teoretických podkladů pro účely této práce. Je rozdělena do více částí, zabývá se nejprve problematikou fyzikálních principů a konstrukce senzorů ohybu, dále jejich možnými aplikacemi a v neposlední řadě využitím ve snímání ohybu prstů, kde je stručně popsána i anatomická struktura horní končetiny a diskutována problematika stupňů volnosti kloubů. První část je důležitá pro návrh celého systému, jelikož z ní návrhová část vychází. Druhá kapitola se skládá ze tří částí, je zde zpracován návrh rukavice, komunikačního rozhraní a vizualizačního prostředí. Třetí a čtvrtá část práce se zabývá realizací navrženého hardwarového přípravku a vizualizačního prostředí. Pátá kapitola obsahuje popis laboratorní úlohy navržené pro výuku sensoriky a vytvořený vzorový protokol a poslední kapitola diskutuje použité metody a postupy k realizaci demonstračního přípravku i laboratorní úlohy.

Hlavním cílem bakalářské práce bylo zpracování podkladů, ze kterých bude vycházet návrhová i realizační část, návrh řešení pro celý systém a jeho realizace, následné vytvoření laboratorní úlohy a vzorového protokolu.

Systém využívá principu snímání ohybu pomocí flex senzorů, propojení s vývojovou deskou Arduino UNO, komunikaci s počítačem pomocí USB rozhraní a zpracování dat pomocí programovacího prostředí Matlab. K získání potřebných dat k následné vizualizaci je potřebné umístění senzorů na rukavici a jejich propojení s vývojovou deskou Arduino UNO. Po zvážení různých možností upevnění senzorů bylo vybráno přilepení pomocí oboustranné textilní lepicí pásky a následná výroba vlastních konektorů, do nichž byly upevněny flex senzory a bylo tak zabráněno možnému poškození senzorů v případě pájení vodičů přímo na jejich vývody. Celkem bylo tedy připevněno 5 flex senzorů – 3 o délce 2,2 palce a dva o délce 4,5 palce – na jednotlivé prsty, které byly následně propojeny s nepájivým polem XY-60 a z něj vyvedeny do analogových pinů vývojové platformy Arduino UNO.

Vývojová platforma Arduino díky USB rozhraní komunikuje s počítačem, kde je v programovacím prostředí Matlab vytvořen program pro vizualizaci ohybu prstů. Dále je v rámci této práce vytvořena laboratorní úloha pro výuku sensoriky, jež pracuje se zjednodušeným konceptem při použití jednoho senzoru, slouží k experimentálnímu ověření vlastností senzorů a jejím výstupem je vzorový protokol.

Kromě výukových účelů je možné snímání ohybu prstů či končetin pomocí senzorů ohybu aplikovat také v oblastech využívajících ovládání počítačů či robotických systémů.

SEZNAM LITERATURY

- [1] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors (Physics, Designs, and Applications)*. 4.vyd. Springer-Verlag New York, 2010. ISBN 978-1-4939-0040-4.
- [2] JUSTA, Josef. *Aplikace polohových snímačů pro řízení*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická.
- [3] HRUŠKA, František. *Senzory. Fyzikální principy, úpravy signálů, příklady použití*. Učební texty. 2. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 978-80-7454-096-7
- [4] Flex Sensor. *www.spectrasymbol.com – Potentiometer Technologies* [online]. 2016 [cit. 2016-11-02]. Dostupné z: <http://www.spectrasymbol.com/flex-sensor>
- [5] Flex Sensor 2.2" – SEN-10264. *SparkFun Electronics* [online]. 2016 [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/10264>
- [6] 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. 2016-11-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/285619338_Resistive_flex_sensors_A_survey
- [7] *Atlas anatomie*. 1. vyd. Praha: Svojtka a Vašut, 1996. 96 s. Poznej a chraň své tělo. ISBN 8071800929.
- [8] KUO, Li-Chieh. Hand Biomechanics. *Department of BioMedical Engineering* [online]. Dostupné z: <http://www.bme.ncku.edu.tw/files/classoutline/hand%20biomechanics1.pdf>
- [9] LUŇÁČEK, Libor. KOSTRA HORNÍ KONČETINY. *Fotografický interaktivní atlas* [online]. Dostupné z: <http://www.atlasloveka.upol.cz/cs/csdwnl/cs020101.pdf>
- [10] VODA, Zbyšek. Průvodce světem Arduina. Bučovice: Martin Stříž, 2015, 240s. ISBN 978-80-87106-90-7.
- [11] ArduinoBoardUno. *Arduino*. [online]. 2016 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [12] Arduino Support from MATLAB. *MathWorks – MATLAB & Simulink* [online]. 2016 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-matlab.html>
- [13] KARBAN, Pavel. *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 80-251-1301-9.
- [14] REICHL, Jaroslav. Wheatstoneův můstek. *Fyzika :: MEF*. [online] 2016 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1631-wheatstoneuv-mustek>

- [15] PAJAŁ, I. The Matlab Toolbox for Modeling Complex Mechanisms. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2014-01-1, **19**(2), -. DOI: 10.2478/ijame-2014-0019. ISSN 1734-4492. Dostupné také z: <http://www.degruyter.com/view/j/ijame.2014.19.issue-2/ijame-2014-0019.xml>
- [16] GREPL, Robert. *Kinematika a dynamika mechatronických systémů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 9788021435308.
- [17] Arduino Hookup Guide. *Flex Sensor Hookup Guide – learn.sparkfun.com* [online]. 2017 [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/flex-sensor-hookup-guide>
- [18] Kinematical scheme of human hand. *3D active workspace of human hand anatomical model | BioMedical Engineering OnLine | Full Text*. [online]. 2017 [cit. 2017-20-05]. Dostupné z: <https://biomedical-engineering-online.biomedcentral.com/articles/10.1186/1475-925X-6-15>

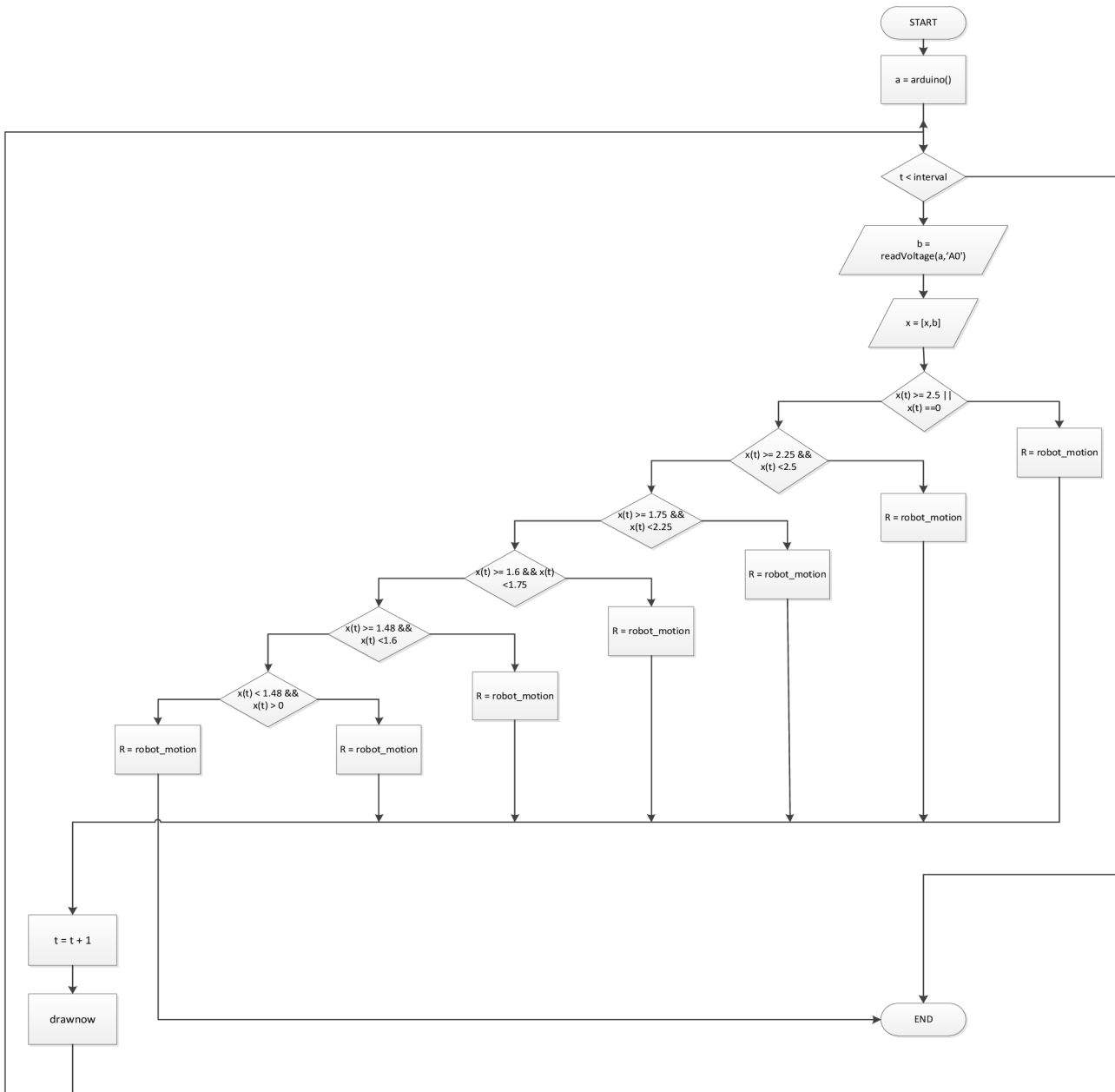
SEZNAM ZKRATEK

ZKRATKA	VÝZNAM
DC	<i>Direct Current</i> – stejnosměrný elektrický proud
DH parametry	<i>Denavit-Hartenbergovy parametry</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i> – grafické uživatelské rozhraní
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> – dvousměrná sériová sběrnice od firmy Philips
PP	Polypropylen
PPy	Polypyrrol
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinyl-fluorid
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – pulzně šířková modulace
Servo	Servomotor
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> – sériové periferní rozhraní
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – univerzální sériová sběrnice

SEZNAM PŘÍLOH

A	Vývojový diagram	48
B	Zdrojový kód pro tvorbu vizualizačního prostředí	49
C	Kinematické schéma horní končetiny	51
D	Obsah přiloženého DVD	52

A Vývojový diagram



B Zdrojový kód pro tvorbu vizualizačního prostředí

```
%% 1) Model ruky - nejprve je pomocí funkce robot vytvořeno pět
samostatných mechanismů prstů
q1 = -pi/8; q2 = pi/4; q3 = pi/4; q4 = pi/4;
finger1 = robot([dh(pi,0,0,q1); dh(-pi/2,0.015,0,q2); dh(0,0.05,0,q3);...
dh(0,0.04,0,q4)], ['r', 'r', 'r', 'r'],...
'RobotBase', rp2t(rody(pi/2),[0.04;0.03;-0.015]),...
'RobotGrasper', [0.03; 0; 0], 'RobotGrasperSize', 0,...
'RobotCylinderRadius', 0.012); % palec
q1 = 0; q2 = -pi/16; q3 = -pi/8; q4 = -pi/8;
finger2 = robot([dh(pi,0,0,q1); dh(-pi/2,0,0,q2); dh(0,0.05,0,q3);...
dh(0,0.03,0,q4)], ['r', 'r', 'r', 'r'],...
'RobotBase', [0.095;0.022;0],...
'RobotGrasper', [0.025; 0; 0], 'RobotGrasperSize', 0,...
'RobotCylinderRadius', 0.01); % ukazovák
finger3 = robot([dh(pi,0,0,q1); dh(-pi/2,0,0,q2); dh(0,0.055,0,q3);...
dh(0,0.035,0,q4)], ['r', 'r', 'r', 'r'],...
'RobotBase', [0.095;0;0],...
'RobotGrasper', [0.025; 0; 0], 'RobotGrasperSize', 0,...
'RobotCylinderRadius', 0.01); % prostředník
finger4 = robot([dh(pi,0,0,q1); dh(-pi/2,0,0,q2); dh(0,0.05,0,q3);...
dh(0,0.03,0,q4)], ['r', 'r', 'r', 'r'],...
'RobotBase', [0.09;-0.02;0],...
'RobotGrasper', [0.025; 0; 0], 'RobotGrasperSize', 0,...
'RobotCylinderRadius', 0.009); % prsteník
finger5 = robot([dh(pi,0,0,q1); dh(-pi/2,0,0,q2); dh(0,0.04,0,q3);...
dh(0,0.025,0,q4)], ['r', 'r', 'r', 'r'],...
'RobotBase', [0.085;-0.038;0],...
'RobotGrasper', [0.023; 0; 0], 'RobotGrasperSize', 0,...
'RobotCylinderRadius', 0.008); % malík

%% Vytvoření komplexního mechanismu ruky
hand = robot_complex(finger1, finger2, finger3, finger4, finger5, ...
'RobotBase', [0;0;0], ...
'RobotModel', 'config', ...
'RobotCylinderRadius', 0.01);

%% Nastavení rozsahu pohybů pro jednotlivé prsty 1-5
robot_set(finger1, 'RobotRange', [-pi/2, 0; 0, pi/2; 0, pi/2; 0, pi/2]);
robot_set(finger2, 'RobotRange', [-pi/9, 0; -pi/2, 0; -pi/2, 0; -pi/2, 0]);
robot_set(finger3, 'RobotRange', [-pi/18, pi/18; -pi/2, 0; -pi/2, 0; -pi/2,
0]);
robot_set(finger4, 'RobotRange', [0, pi/9; -pi/2, 0; -pi/2, 0; -pi/2, 0]);
robot_set(finger5, 'RobotRange', [0, pi/5; -pi/2, 0; -pi/2, 0; -pi/2, 0]);
```

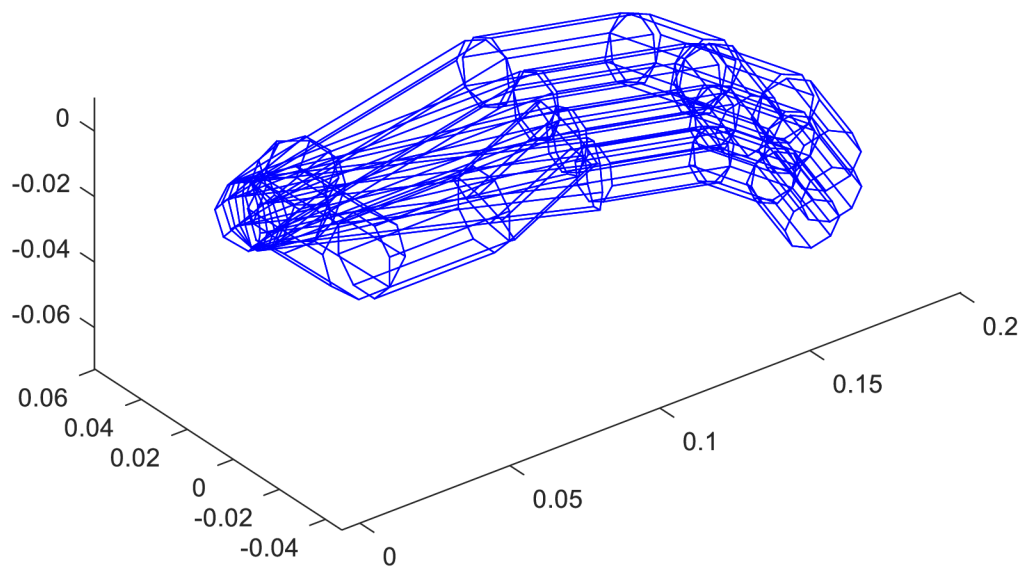
```
%% Zobrazení modelu ruky
```

```
axis ([-0.01 0.01 -0.01 0.01 -0.01 0.01]); % rozsah os zobrazované 3D  
oblasti
```

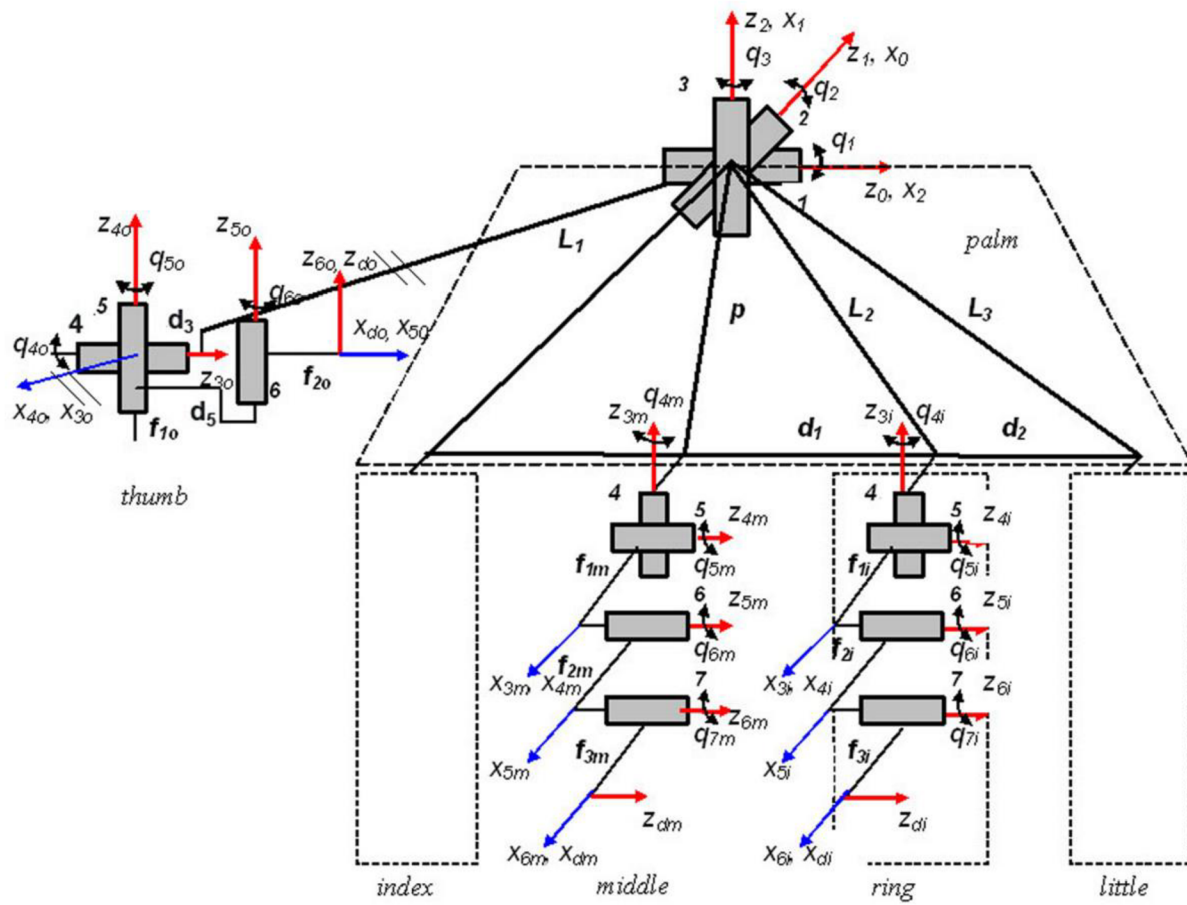
```
axis equal;
```

```
robot_plot(hand, 'dmesh');
```

Výstup:



C Kinematické schéma horní končetiny



Zdroj: [18]

D Obsah přiloženého DVD

Přiložené DVD obsahuje následující položky:

- Elektronická verze bakalářské práce ve formátu .pdf
- Zdrojový kód pro načítání signálu a vizualizaci pohybu ruky
- Vytvořený vzorový protokol ve formátu .pdf
- Videozáznam vizualizace pohybu prstů ve formátu .mp4
- The Matlab Toolbox for Modeling Complex Mechanisms a dokumentace k toolboxu ve formátu .pdf