



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SYSTÉM SNÍMÁNÍ POLOHY PRSTŮ LIDSKÉ RUKY

SENSING THE POSITION OF THE FINGERS OF A HUMAN HAND

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Andrej Frnka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Petyovský, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Andrej Frnka

ID: 219952

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

System snímání polohy prstů lidské ruky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout systém pro snímání polohy prstů reálné lidské ruky, použitelný k záznamu a reprodukci polohy prstů v čase.

1. Seznamte se a nastudujte metody i principy pro měření polohy prstů lidské ruky.
2. Diskutujte možnosti komerčních řešení snímání polohy prstů lidské ruky dostupných na trhu.
3. Definujte požadavky na navrhovaný systém měření polohy prstů lidské ruky.
4. Navrhněte blokové schéma systému snímání. Definujte jednotlivé komponenty a jejich požadované parametry.
5. Realizujte systém snímání polohy prstů lidské ruky.
6. Na vhodném experimentu odzkoušejte, nakalibrujte a zhodnoťte použitelnost a přesnost měření.
7. Na vhodné demonstrační úloze prezentujte využití systému.
8. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte další možná vylepšení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] EVERETT, H.,R.: Sensors for Mobile Robots theory and application, CRC Press 1995, ISBN 1568810482.
[2] VIRIUS, M. : Jazyky C a C++ (2. vydání), Grada 2011, ISBN 80-247-3917-5.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Petr Petyovský, Ph.D.

Konzultant: Ing. František Burian, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Cieľom tejto bakalárskej práce je návrh a realizácia systému snímania polohy troch prstov ľudskej ruky, použiteľný k záznamu polohy prstov v čase. Časť tejto práce je zameraná na teoretický úvod do problematiky snímania polohy prstov, a získanie potrebných znalostí pre následný návrh takéhoto systému. Pre systém sú definované požiadavky na základe, ktorých sú vybraté komponenty. Systém je realizovaný ako dátová rukavica v podobe exoskeletonu. Pre snímanie polohy prstov ľudskej ruky sú použité senzory ohybu od spoločnosti Spectra Symbol. V systéme je použitý mikrokontrolér MSP430F5529, ktorého firmware je implementovaný v jazyku C. Výstupom práce je dátová rukavica snímajúca polohu prstov ľudskej ruky s požadovanou presnosťou.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Robotika, ľudská ruka, snímanie polohy prstov, dátová rukavica

ABSTRACT

The goal of this bachelor thesis is to design and realize system sensing the position of three fingers of a human hand. Part of this thesis deals with introduction into human finger sensing and acquire knowledge necessary for system design. Components of a system are chosen based on defined requirements. System is realized as a exoskeleton data glove. For finger position sensing system uses flex sensors by Spectra Symbol. Microcontroller MSP430F5529 is used for this system and its firmware is implemented in C language. The result of this thesis is a data glove, which measures finger position with required accuracy.

KEYWORDS

Robotics, humand hand, fingers position sensing, data glove

FRNKA, Andrej. *Systém snímání polohy prstů lidské ruky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023, 87 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: Ing. Petr Petyovský, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Andrej Frnka
VUT ID autora: 219952
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2022/23
Téma záverečnej práce: Systém snímaní polohy prstů lidské ruky

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Petrovi Petyovskému, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci. Moje poďakovanie patrí aj konzultantovi Ing. Františkovi Burianovi, Ph.D. za odbornú pomoc a konzultácie bakalárskej práce.

Obsah

Úvod	13
1 Motívacia snímania polohy prstov ľudskej ruky	14
1.1 Robotika bližšie k ľuďom	14
1.2 Zjednodušenie v priemysle	14
1.3 Snímanie pre rozpoznanie znakovkej reči	15
1.4 Prínos pre zdravotníctvo	15
1.5 Rozhranie počítač a človek	16
1.6 Herný priemysel	16
2 Riešenia pre snímanie polohy prstov ľudskej ruky	17
2.1 Neobrazové snímanie polohy prstov	17
2.1.1 Senzory na snímanie polohy prstov	18
2.1.2 Dátové rukavice	21
2.2 Obrazové snímanie	21
2.2.1 Komerčné nástroje na obrazové snímanie ľudskej ruky	23
2.3 Farebné rukavice	24
3 Komerčné metódy snímania polohy prstov ľudskej ruky	26
3.1 Dátová rukavica PowerGlove	26
3.2 Herný ovládač Kinect	26
3.3 Spoločnosť Manus	27
4 Návrh snímacieho systému	28
4.1 Požiadavky na systém snímajúci polohu prstov ľudskej ruky	28
4.1.1 Metóda snímania	28
4.1.2 Snímanie polohy prstov	28
4.1.3 Poloha a orientácia ruky	28
4.1.4 Prenos dát	29
4.1.5 Výpočetná jednotka pre spracovanie dát	29
4.1.6 Konštrukcia dátovej rukavice	29
4.2 Komponenty systému	30
4.2.1 Snímače ohybu prstov ľudskej ruky	30
4.2.2 Snímač pohybu ľudskej ruky	32
4.2.3 Mikrokontrolér navrhovaného systému	33
4.2.4 Výsledný navrhovaný systém	34

5	Meranie charakteristík senzoru ohybu	35
5.1	Návrh úlohy merania senzorov ohybu	35
5.2	Uhlová závislosť senzoru ohybu	35
5.2.1	Návrh merania uhlovej závislosti senzoru ohybu	36
5.3	Opakovateľnosť senzoru ohybu	41
5.3.1	Výsledky merania opakovateľnosti senzoru ohybu	41
5.4	Teplotná závislosť senzoru ohybu	43
5.4.1	Návrh merania teplotnej závislosti senzoru ohybu	43
5.4.2	Postup merania teplotnej závislosti senzoru ohybu	43
5.4.3	Výsledky merania teplotnej závislosti senzoru ohybu	44
5.5	Závislosť výstupného odporu od rýchlosti ohybu	45
5.5.1	Návrh merania závislosti výstupného odporu od rýchlosti ohybu	45
5.5.2	Postup merania závislosti výstupného odporu od rýchlosti ohybu	45
5.5.3	Výsledky merania závislosti výstupného odporu od rýchlosti ohybu	46
5.6	Záver merania charakteristík senzorov ohybu	47
6	Mechanický návrh exo-skeletonu rukavice	48
6.1	Návrh exo-prstov	48
6.2	Model rukavice	50
7	Realizácia systému snímania polohy prstov ľudskej ruky	52
7.1	Hardwarová časť systému	52
7.1.1	Delič napätia	52
7.2	Firmwarová časť systému	53
7.2.1	Ovládanie periférií mikrokontroléru MSP430	54
7.2.2	Knižnice pre spracovanie senzorov systému	55
8	Použitie systému pre snímanie polohy prstov ľudskej ruky	57
8.1	Návrh merania ohybu prstov ľudskej ruky	57
8.2	Kalibrácia senzorov	57
8.3	Meranie ohybu prstov ľudskej ruky	58
8.4	Výsledky merania ohybu prstov	58
8.4.1	Výsledok prvého merania	58
8.4.2	Výsledok druhého merania	60
8.5	Zhodnotenie presnosti systému snímania polohy prstov	61
9	Demonštrácia použitia systému snímania polohy prstov ľudskej ruky	62
9.1	Softwarová aplikácia DataGloveAppCmd	62

10 Výsledky bakalárskej práce	63
10.1 Porovnanie realizovaného systému s Manus VR rukavicou	63
Závěr	64
Literatúra	66
Zoznam symbolov a skratiek	69
Zoznam príloh	70
A Meranie senzorov ohybu	71
B Schéma zapojenia systému	76
C Realizácia hardwaru systému	77
D Meranie ohybu dátovou rukavicou	79
E Dátová rukavica	86
F Obsah elektronickej prílohy	87

Zoznam obrázkov

1.1	Aplikácia snímania prstov pre preklad znakovkej reči [5]	15
1.2	Zariadenie pre zrkadlovú rehabilitáciu od firmy Syrebo [7]	15
2.1	Princíp neobrazového snímania ľudskej ruky	18
2.2	Konštrukcia senzoru ohybu [8]	19
2.3	Princíp obrazového snímania ľudskej ruky	22
2.4	Snímanie ľudskej ruky pomocou MediaPipe Hands	23
2.5	Princíp farebnej rukavice	24
3.1	PowerGlove od spoločnosti Mattel [17]	26
3.2	Snímanie pomocou systému Kinect [18]	27
3.3	Manus Prime X Haptic [19]	27
4.1	Náčrt navrhovanej rukavice	29
4.2	Bloková schéma systému snímania prstov ľudskej ruky	30
4.3	Konštrukcia sandwich snímača ohybu	31
4.4	Snímač ohybu Spectra Symbol[21]	32
4.5	IMU senzor OKY3259-5[22]	32
4.6	Vývojová sada MSP430F5529 LaunchPad Development Kit[23]	33
4.7	Bloková schéma systému snímania s vybratými komponentami	34
5.1	Prípravok pre meranie	36
5.2	Upevnenie senzorov	37
5.3	Prípravok so senzormi	37
5.4	Meranie bez objektu ohybu	38
5.5	Výsledný prípravok	38
5.6	Prevodná charakteristika senzorov ohybu	39
5.7	Lineárny model prevodnej charakteristiky senzorov ohybu	40
5.8	Chyba výstupu senzorov ohybu	40
5.9	Opakovateľnosť výstupných hodnôt senzoru ohybu č.1	41
5.10	Opakovateľnosť výstupných hodnôt senzoru ohybu č.2	41
5.11	Opakovateľnosť výstupných hodnôt senzoru ohybu č.3	42
5.12	Aparát pre meranie teplotnej závislosti senzoru ohybu	43
5.13	Teplotná závislosť senzorov ohybu	45
6.1	Prvý náčrt exo-ukazováka	48
6.2	Druhý náčrt exo-ukazováka	49
6.3	Simulácia dvojklábu	49
6.4	Model rukavice s pevným kĺbom	50
6.5	Model rukavice s voľným kĺbom	51
7.1	Delič napätia	52
7.2	UML diagram firmwaru systému	54

8.1	Kalibrácia senzorov	58
8.2	Graf prvého merania ohybu prstov	59
8.3	Graf rozdielov výstupu systému od skutočných hodnôt prvého merania	59
8.4	Chyba merania pomocou výslednej rukavice - Palec	60
8.5	Chyba merania pomocou výslednej rukavice - Ukazovák	60
8.6	Chyba merania pomocou výslednej rukavice - Prsteník	61
9.1	Komunikácia dátovej rukavice a aplikácie	62
10.1	Výsledná podoba dátovej rukavice	63
A.1	Závislosť senzoru 1 na rýchlosti ohybu	72
A.2	Závislosť senzoru 2 na rýchlosti ohybu	74
A.3	Závislosť senzoru 3 na rýchlosti ohybu	74
B.1	Schéma zapojenia systému snímania polohy prstov ľudskej ruky	76
E.1	Vyvlieknutie senzorov pri meraní ohybu	86
E.2	Výpis dát pomocou aplikácie DataGloveAppCmd	86

Zoznam tabuliek

5.1	Zmena výstupného odporu v skúmanom rozsahu	44
5.2	Hodnota R_{max} pre jednotlivé úseky - senzor 1	46
5.3	Hodnota R_{max} pre jednotlivé úseky - senzor 2	46
5.4	Hodnota R_{max} pre jednotlivé úseky - senzor 3	46
7.1	Minimálna zmena hodnoty napätia pri ohybe o 5°	53
8.1	Príklad kalibračných hodnôt senzorov ohybu	58
A.1	Hodnoty meraní 1 až 4 opakovateľnosti senzorov ohybu	71
A.2	Hodnoty merania 5 opakovateľnosti senzorov ohybu	71
A.3	Tabuľka uhlovej závislosti senzorov ohybu	72
A.4	Vypočítaná chyba senzorov ohybu od Spectra Symbol	73
A.5	Opakovateľnosť senzoru 1	73
A.6	Opakovateľnosť senzoru 2	74
A.7	Opakovateľnosť senzoru 3	74
A.8	Teplotná závislosť senzorov ohybu	75
C.1	Uhlová závislosť napätového deliča	77
C.2	Závislosť ΔU senzorov ohybu od $\Delta\phi$	78
D.1	Prvé meranie ohybu prstov ľudskej ruky	79
D.2	Rozdiel výsledku systému od skutočného uhlu prvého merania	80
D.3	Meranie 1-3 ohybu ukazováku a prsteníku druhým modelom rukavice	81
D.4	Meranie 4-6 ohybu ukazováku a prsteníku druhým modelom rukavice	82
D.5	Chyba meraní 1-3 ukazováku a prsteníku	83
D.6	Chyba meraní 4-6 ukazováku a prsteníku	84
D.7	Meranie 1-6 ohybu palca druhým modelom rukavice	85
D.8	Chyba meraní 1-6 palca	85

Úvod

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom a realizáciou systému snímania prstov ľudskej ruky. Téma tejto práce bola vymyslená autorom. Dôvod výberu témy tejto práce bolo využitie doteraz získaných znalostí programovania mikrokontrolérov pre systém, ktorý by bolo možné použiť ako ovládač v oblasti robotiky, alebo systém použiteľný v oblasti zdravotníctva.

Začiatok práce sa bude venovať motivácií snímania prstov ľudskej ruky. V kapitole budú uvedené odvetvia v ktorých je použité snímanie polohy prstov ruky, alebo v ktorých by sa mohlo v budúcnosti vyskytnúť.

V druhej kapitole bude snímanie rozdelené na dve metódy, ktoré budú následne popísané. Ďalej budú v kapitole uvedené výhody a nevýhody jednotlivých metód. Taktiež budú spomenuté a v skratke popísané typy snímačov, ktoré jednotlivé metódy používajú.

V rámci rešerše budú v práci popísané aj tri komerčné systémy, ktoré využívajú pre svoju funkčnosť snímanie polohy prstov ľudskej ruky. V tejto kapitole budú spomenuté aj technické parametre rukavice Manus VR. Niektoré z týchto parametrov budú slúžiť pre porovnanie s realizovaným systémom v tejto práci.

Následne sa práca bude sústrediť na návrh systému snímania prstov ľudskej ruky. V tejto kapitole budú definované požiadavky na systém, ktorý má byť v rámci bakalárskej práce realizovaný. V tejto časti sa práca bude zaoberať výberom komponentov, podľa daných požiadaviek, a ich krátkemu popisu. Taktiež bude uvedená bloková schéma navrhovaného systému.

V práci bude následne popísaný návrh a priebeh meraní senzorov ohybu od spoločnosti Spectra Symbol. Toto meranie bude podstatné pre rozhodnutie, či použitie senzorov ohybu od spoločnosti Spectra Symbol bude vyhovovať požiadavkam.

Následne sa bakalárska práca začne sústrediť na realizáciu navrhnutého systému. Ako prvá bude uvedená realizácia exoskeletonu, ktorý bude od systému požadovaný. Následne sa realizácia bude zaoberať hardwarom systému a firmwaru, ktorý bude implementovaný v jazyku C.

Realizovaný systém bude použitý na úlohu merania ohybu prstu podľa makety. V tejto časti bude overené, či systém spĺňa požiadavky, ktoré boli predom navrhnuté.

Funkčnosť realizovaného systému bude prezentovaná na aplikácii, ktorá bude prijímať dáta pomocou zbernice USB. Vo výsledku bude realizovaný systém porovnaný s komerčným systémom.

1 Motívacia snímania polohy prstov ľudskej ruky

Pomocou technológie sa ľudstvo neustále snaží riešiť problémy v rôznych oblastiach. Týka sa to zjednodušenia a zefektívnenia ľudskej práce alebo života ako takého. Jednou z mnohých dnešných oblastí záujmu patrí určite snímanie polohy ľudských prstov a teda ľudskej ruky ako takej. Z počiatku sa to nemusí zdať ako niečo príliš podstatné a prevratné v oblasti technológií. Pravdou ale je, že snímanie ľudskej ruky sa v dnešnej dobe využíva v mnohých odvetviach, ako napríklad robotika alebo zdravotníctvo. V nasledujúcich podkapitolách budú v krátkosti rozobraté niektoré z týchto odvetví, je to podstatné pre pochopenie a predstavu dôležitosti tejto tematiky v oblasti automatizácie.

1.1 Robotika bližšie k ľuďom

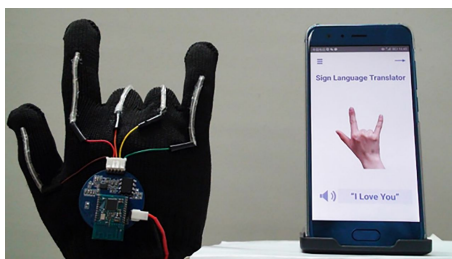
Myšlienka o tom, že dostaneme robotov do bežných domácností alebo všeobecne bližšie ľuďom mimo priemyselných hál, začína byť čoraz skutočnejšia. Keďže títo roboti majú za úlohu plniť úlohy dané človekom, je nutné ho nejakým spôsobom riadiť a ovládať. Jeden zo spôsobov akým bude možná komunikácia s týmito robotmi a teda ich pokynovanie je ukazovanie. Napríklad pre určenie smeru je nutné tento smer ukázať, prípadne ukázať na daný predmet. Je teda nutné zaistiť to, aby robot dokázal tieto pokyny zaznamenať a rozlíšiť. Zároveň ovládanie robotov pomocou ľudskej ruky môže byť veľmi užitočné v rôznych ľuďom nebezpečných prostrediam, napríklad v rôznych výskumných centrách. [3]

1.2 Zjednodušenie v priemysle

Spôsob akým je väčšina dnešných priemyselných robotov programovaná alebo ovládaná je pomocou pomalých metód na ktoré je zároveň nutný školení personál, napríklad pomocou zariadenia Teach-Pendant. Taktiež je nutné školenie podľa toho od akej firmy je daný priemyselný robot. Pre pokrok v automatizácii priemyslu je ale nutné tieto metódy nahradiť rýchlejšími a dostupnejšími metódami. Spôsob akým zefektívniť spoluprácu priemyselných robotov a ľudských pracovníkov je ich jednoduchším ovládaním. K tomu môže napomôcť práve efektívnejšia komunikácia týchto dvoch skupín. Komandovaním týchto robotov zo strany človeka, by sa predišlo komplikovanejšiemu používaniu zariadení ako je práve napríklad Teach-pendant (ručný ovládací panel). Toto ovládanie by teda urýchlilo proces, zvýšilo bezpečnosť a teda sprístupnilo by priemyselné roboty viac medzi ľudských pracovníkov.

1.3 Snímanie pre rozpoznanie znakovkej reči

Jednou z úloh techniky a taktiež jedným z cieľov jej napredovania, by mala byť pomoc znevýhodneným ľuďom. Táto podkapitola sa zameria na riešenie konkrétneho problému v ktorom je snímanie prstov ľudskej ruky nevyhnutné. Ľudia so sluchovým hendikepom sa dorozumievajú pomocou znakovkej reči. Tu ale vzniká problém komunikácií s ľuďmi ktorý znakovú reč neovládajú. Znaková reč pochopiteľne nie je rozšírená a tak vzniká nová úloha techniky, ako tento problém vyriešiť [4]. Vďaka snímaniu prstov ľudskej ruky môžeme vytvárať nové alebo zlepšovať už existujúce aplikácie na preklad znakovkej reči do hovorenej alebo písanej formy a naopak.



Obr. 1.1: Aplikácia snímání prstov pre preklad znakovkej reči [5]

1.4 Prínos pre zdravotníctvo

Využitie snímání ľudskej ruky v zdravotníctve je možné nájsť v širšom spektre aplikácií. Môže sa jednať o snímání paralyzovaných pacientov, predom spomínaná komunikácia s hluchými pacientami ale jeden z určite najväčších prínosov je zlepšenie rehabilitácie ľudí po infarkte. Konkrétnym príkladom využitia je takzvaná „zrkadlová“ rehabilitácia. Táto rehabilitácia spočíva v použití páru rukavíc. Jedna rukavica je použitá ako snímač zdravej ruky. Rukavica sníma ohyb prstov a silu úchopu. Namerané dáta sú následne použité pre správnu funkčnosť druhej rukavice, nazvanej ako motorová rukavica. Motorová rukavica je použitá pre asistenciu postihnutej ruky pacienta a teda napomáha k rehabilitácii postihnutej časti. [6]



Obr. 1.2: Zariadenie pre zrkadlovú rehabilitáciu od firmy Syrebo [7]

1.5 Rozhranie počítač a človek

Výskumníci z CV (Počítačové videnie – Computer Vision) a HCI (Interakcia človek a počítač – Human Computer Interaction) sa taktiež zameriavajú na zlepšenie interakcie človeka s počítačom a ďalšími inými elektronickými zariadeniami. Vylepšenie tejto interakcie môže zjednodušiť napríklad prezentovanie či už v škole alebo na rôznych konferenciách a to posúvaním jednotlivých stránok diaľkovo bez akejkoľvek nutnosti použitia bežných prostriedkov ako myš a podobne. Zároveň to môže byť veľká výpomoc pre ľudí ktorí sú telesne znevýhodnení alebo pre seniorov v bežných domácnostiach. Tieto elektronické zariadenia sa teda stávajú viac užívateľsky prijateľné. [3]

1.6 Herný priemysel

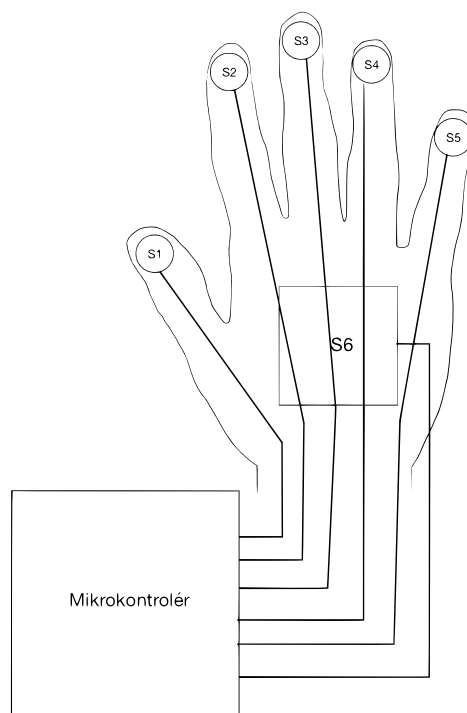
Odvetvie ktoré sa taktiež zaoberá snímaním polohy prstov ruky je herný priemysel. Už niekoľko rokov sa tento priemysel snaží zlepšiť zážitok z hier, alebo ho rovno bližšie preniesť k realite. Príkladom je napríklad dnes už veľmi známy Kinect ktorý dokáže snímať človeka ako celého. Taktiež je snímanie použité pre VR (Virtuálna realita – Virtual reality) kde dnes už existujú celé rukavice ako ovládače pre VR konzolu. Príklad VR rukavíc bude možné vidieť na obrázku 3.3 v podkapitole 3.3. Prvé ovládače tohto typu vznikli už v 1989 pre hernú konzolu od spoločnosti Nintendo pod názvom Power Glove.

2 Riešenia pre snímanie polohy prstov ľudskej ruky

Snímanie prstov ľudskej ruky a všeobecne ľudskej ruky ako takej, je pomerne zložitá záležitosť. Snímanie je totižto ovplyvnené mnohými prekážkami ako napríklad: tvar ruky, svetlo, okolie, farba pleti, vzdialenosť, pozícia a smer. Táto zložitosť bude samozrejme závisieť aj od toho o aké snímanie sa jedná. Ako prekážku je nutné počítať samozrejme aj kvalitu snímačov. Snímanie polohy ruky sa dá rozdeliť do dvoch skupín. Obrazové snímanie a neobrazové snímanie.[4] Obrazové snímanie spočíva v použití kamier na získanie obrazu kde je snímaná ruka. Použitie obrazového snímania je pohodlnejšie pre užívateľa pretože nemusí mať snímajúce zariadenie priamo na svojej ruke. Naopak neobrazové snímanie používa skupinu senzorov, podľa snímaného typu pohybu. V tejto kapitole budú predstavené metódy a popísané princípy na akých sú tieto metódy založené. Taktiež budú predstavené určité druhy senzorov ktoré sa často vyskytujú pri snímaní polohy ľudských prstov a taktiež celej ruky. V úvode tejto kapitoly je nutné upozorniť na to, že sa jedná o základné alebo typické metódy a princípy snímania prstov ľudskej ruky a ruky všeobecne. Tento smer je dosť rozšírený a je teda možné stretnúť sa aj s inými princípmi ako tie, ktoré budú popísané v nasledujúcich kapitolách.

2.1 Neobrazové snímanie polohy prstov

Snímanie prebieha aplikovaním senzorov priamo na snímanej ruke užívateľa. Na obrázku 2.1 je vidieť senzory S1-S5 ktoré slúžia na snímanie polohy prstov ľudskej ruky. Senzor S6 je senzor pohybov, ako rotácia zápästia alebo pohyb ruky v priestore. Výstup týchto senzorov je následne spracovaný vo výpočetnej jednotke, napríklad v mikrokontroléry alebo FPGA. Počet senzorov sa bude odvíjať od potreby pre danú aplikáciu. Nie vždy musí byť nutné snímanie všetkých prstov alebo snímanie rotácie a pohybu ruky v priestore alebo rotácie.



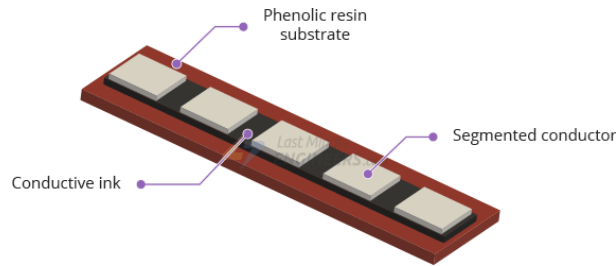
Obr. 2.1: Princíp neobrazového snímania ľudskej ruky

2.1.1 Senzory na snímanie polohy prstov

Na snímanie prstov ľudskej ruky môžeme použiť viac typov senzorov. Je možné použiť napríklad tenzometre, senzory ohybu, senzory tlaku alebo IMU (Inerciálna meracia jednotka – Inertial Measurement Unit) senzory. V tejto podkapitole si ro-
zoberieme jednotlivé princípy senzorov.

Senzory ohybu

Často používanými senzormi pre snímanie ohybu sú napríklad odporové tenzometre. Zmenu odporu pri ohybe týchto senzorov popisuje rovnica (2.1), kde l je pôvodná dĺžka vodiča, S je prierez vodiča, a ρ je merný odpor vodiča. Takýmto senzorom je aj senzor ohybu od spoločnosti Spectra Symbol. Tieto senzory boli prvýkrát použité v rukavici Power-Glove, spomínanej v podkapitole 1.6. Konštrukcia a princíp senzoru je jednoduchý. Na obrázku 2.2 je možné vidieť konštrukciu, ktorá pozostáva z Fenolformaldehydovej živice a tenkej vodivej vrstvy. Táto tenká vodivá vrstva slúži ako rezistor. Senzor ešte pozostáva z ďalšieho vodivého materiálu, ktorý je takzvané segmentovaný, čiže rozčlenený na segmenty a vložený na rezistívnu vrstvu. Keď sa senzor začne ohýbať, dôjde k predĺženiu rezistívnej vrstvy a zmenšeniu prierezu. Vtedy sa hodnota odporu senzoru zväčší. Výhodou tohto typu senzorov je jednoduchosť a citlivosť na malé ohyby. V prípade ak je nutné snímať aj zrýchlenie a rýchlosť



Obr. 2.2: Konštrukcia senzoru ohybu [8]

pohybu prstov tak tieto senzory nie je možné použiť.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (2.1)$$

Inerciálna meracia jednotka

IMU (Inerciálna meracia jednotka – Inertial Measurement Unit) nie je len jeden senzor, je to kombinácia senzorov akcelerometer a gyroskop (prípadne aj kompas). Tieto senzory spolu tvoria jedno zariadenie, Inerciálnu meraciu jednotku. IMU je v podstate komplexný snímač ktorý pomocou akcelerometru sníma zrýchlenie objektu a pomocou gyroskopu jeho uhlovú rýchlosť. Akcelerometer a gyroskop sú MEMS (Mikro-Elektro-Mechanické Systémy – Micro-Electro-Mechanical Systems) snímače a často sú integrované spoločne na jednom čipe. Ich výhodou oproti senzorom ohybu je rýchlejšia kalibrácia, možnosť snímania rýchlosti, zrýchlenia alebo náklonu [9].

Akcelerometer Tento senzor sa používa na meranie zrýchlenia alebo vibrácií, čo je v podstate tiež forma zrýchlenia. Existuje viac spôsobov prevedenia akcelerometru (kapacitný, indukčný, piezoelektrický, tepelný atd.). V prípade merania polohy prstov ľudskej ruky budeme uvažovať už spomínané MEMS akcelerometre. Akcelerometre obsahujú nosník, na ktorý vplyva zotrvačná sila práve v prípade zrýchlenia. Tento nosník je pripevnený na pružinách. Zloženie sa ďalej odvíja od princípu. V prípade kapacitného MEMS akcelerometru je na čipe niekoľko diferenčných kapacitných snímačov. Každý diferenčný snímač obsahuje tri elektródy. Dve sú statické a jedna je pohyblivá. Táto elektróda je priamo spojená s nosníkom. V prípade zrýchlenia na nosník vplyva zotrvačná sila, čo spôsobí zúženie dielektrika medzi pohyblivou elektródou a statickými elektródami. Toto má za následok zmenu kapacity, ktorá je meraná a spracovaná elektronikou na čipe.

Gyroskop V prípade MEMS gyroskopu sa využíva Coriolisovho javu. Senzor meria silové účinky Coriolisovej sily ktorá odpovedá uhlovej rýchlosti. Druhy MEMS gyroskopov poznáme s lineárnym rezonátorom, s vibračným rezonátorom a vibrujúcim prstencom. Princíp gyroskopu spočíva v kmitaní nosníka ktorý sa pri rotácií, a teda uhlovej rýchlosti, vychýli pod vplyvom Coriolisovej sily. Pri použití diferenčných kapacitných snímačov v tom prípade dôjde opäť k zmene kapacít medzi statickými elektródami a elektródou pripevnenou na nosníku.[10]

2.1.2 Dátové rukavice

Systém, ktorý zabezpečuje neobrazové snímanie polohy ľudskej ruky sa volá dátová rukavica. Je to rukavica, ktorá pozostáva zo snímačov, ktoré snímajú jednotlivé pohyby na ruke. To znamená poloha prstov, pohyby ruky ako rotácia v zápästí, alebo pohyb ruky v priestore. Na dátovej rukavici musí byť aj jednotka na spracovanie dát týchto snímačov. Vo väčšine prípadov sa bude jednať o mikrokontrolér s dostatočným množstvom vstupov pre meranie polohových veličín. Dátové rukavice môžu byť rôzne konštruované, môže sa jednať o rukavicu z látky, prípadne iného podobného materiálu, alebo rukavicu v podobe exo-skeletonu.

2.2 Obrazové snímanie

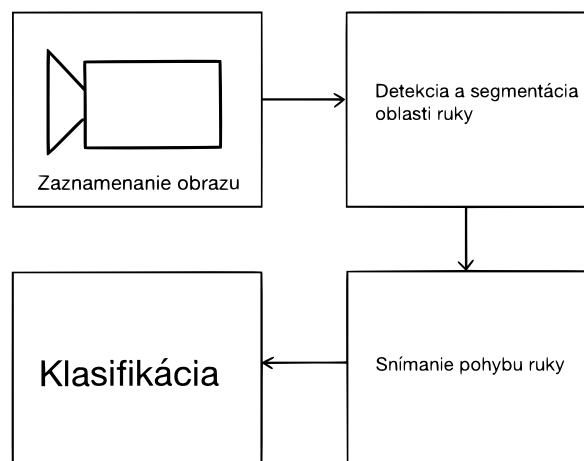
Tento spôsob snímania predstavuje viac výhod oproti neobrazovému snímaniu. V prípade použitia rukavíc a sady snímačov je pre dosiahnutie presných výsledkov nutná komplexná kalibrácia, čo neplatí v prípade obrazového snímania. Taktiež pri obrazovom snímaní nie je nutné nosiť žiadne zariadenie, ktoré k snímaniu slúži. Problémom pri obrazovom snímaní predstavuje ale prostredie v ktorom sa snímaná ruka nachádza. Získaný obraz môže byť veľmi presvetlený alebo prostredie na obraze môže obsahovať mnoho objektov ktoré skomplikujú proces nájdania ruky v obraze.[11] To znamená, že toto snímanie bude veľmi závislé na kvalite techniky ktorou je obraz získaný a taktiež prostredí ako už bolo spomínané. Ďalšou výhodou je ale dostupnosť. Pre obrazové snímanie môže postačovať aj použitie webkamery, ktorá je v dnešnej dobe dostupná skoro každému. Týmto sa dá predísť nákupu drahých senzorov, výpočetných jednotiek alebo iných potrebných materiálov ktoré sú nutné pre neobrazové snímanie. Obrazové snímanie spočíva v troch fázach [12] ktoré je možné vidieť na obrázku 2.3. Popis týchto troch fáz bude v nasledujúcich častiach.

Detekcia a segmentácia Cieľom je zaznamenať ruku a následne ju rozoznať od pozadia ktoré je taktiež zachytené v obraze. Táto časť je súčasťou predspracovania obrazu pre nasledujúce fázy. Používajú sa rôzne metódy. Kvôli svojej jednoduchosti medzi najznámejšie a veľmi často používané patrí metóda detekcie farby pleti. Ďalšia veľmi populárna metóda je detekcia kontúr, teda obrysov ruky. Kontúry ruky sa získajú pomocou operátorov detekcie hrán. Jej výhodou oproti predošlej metóde je, že nie je až tak ovplyvnená svetlom obrazu. Jej nevýhodou je ale detekcia hrán aj objektov pozadia. Ďalšou metódou je metóda subtrakcie pozadia. Táto metóda porovnáva obraz ktorý je definovaný ako pozadie s aktuálnym obrazom. Na základe toho vie rozoznať snímaný pohyb ruky od pozadia. Nevýhodou tejto metódy je, že je vhodná pre statické pozadia, konštantnú svetlosť. Je ale možné použiť metódu pre

pomaly sa meniace pozadia. V takom prípade sa obraz pozadia snímok po snímku aktualizuje. [12]

Snímanie pohybu ruky Ľudská ruka je pre úlohu snímania zložitý objekt. Je to kvôli tomu, že sa nejedná o objekt stáleho tvaru ale o článkovitý objekt, ktorý sa zároveň pohybuje rôznou rýchlosťou. Používané algoritmy v tomto procese sa snažia predpovedať pohyby ruky. Napríklad metóda s názvom Optical Flow (Optický tok) robí tento predpoklad na základe pozície objektu a zmene jasů v jeho okolí, táto metóda teda používa pixely obrazu. [12]

Klasifikácia Klasifikácia gesta je poslednou fázou tohto procesu. Vstupom sú spracované dáta predošlými fázami a výstupom je gesto [12]. Gesto je teda poloha a orientácia prstov a ruky. Na toto výsledné spracovanie sa používajú techniky z umelej inteligencie, napríklad neurónové siete.



Obr. 2.3: Princíp obrazového snímania ľudskej ruky

2.2.1 Komerčné nástroje na obrazové snímanie ľudskej ruky

Cielom tejto podkapitoly je stručne predstaviť dva nástroje ktoré sú verejne dostupné a spoločne sa dajú použiť pre snímanie ľudskej ruky.

Mediapipe

Jedná sa o koncept od spoločnosti Google. Mediapipe slúži na vytváranie reťazcov, ktoré majú slúžiť na vytvorenie predpokladu výstupu z určitých vstupných dát zo senzorov. Tento reťazec je vytvorený ako graf komponentov. Jednotlivé komponenty grafu sú inferenčný model, algoritmy na spracovanie vstupu a transformáciu dát. Inferenčný model je proces známy zo strojového učenia. Jedná sa o proces, kde je použitý predom natrénovaný model na vytvorenie hypotézy zo vstupných dát. Vstupom do grafu sú teda výstupy zo senzorov, v tejto problematike sa bude jednať o obraz obsahujúci ľudskú ruku, a výstupom je lokalizácia ruky a jej štruktúra. [14] Pre snímanie ľudskej ruky je vytvorené konkrétne riešenie s názvom MediaPipe Hands. Na snímanie ľudskej ruky je použité strojové učenie, ktoré zabezpečí detekciu dlane a model ruky vytvorený z 21 orientačných bodov.

Detektor dlane Vstupom je nespracovaný obraz na ktorom lokalizuje dlaň. Výstupom je ohraničený priestor v obraze kde sa dlaň nachádza.

Bodový model ruky Vstupom je ohraničený priestor z detektoru dlane. Výstupom je:

- 21 bodov ktoré definujú x,y,z súradnice ruky,
- pravdepodobnosť výskytu ruky na obraze,
- binárna klasifikácia o ktorú ruku sa jedná (ľavá, pravá),

[15]



Obr. 2.4: Snímanie ľudskej ruky pomocou MediaPipe Hands

OpenCV

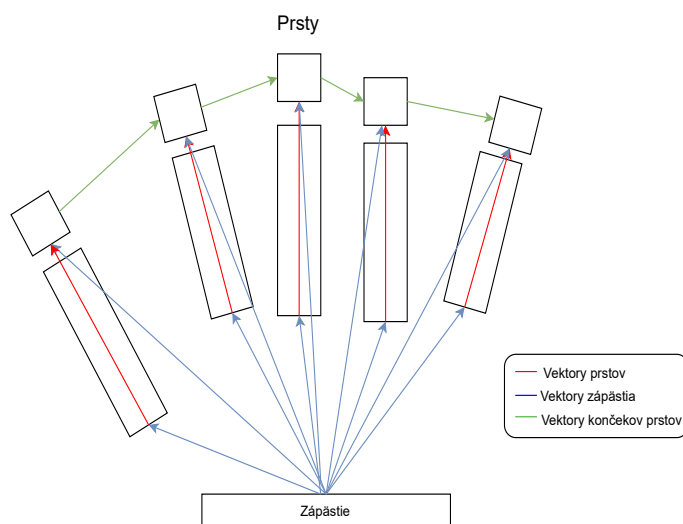
Jedná sa o softvérovú knižnicu pre aplikácie CV a strojového učenia. Knižnica obsahuje 2500 algoritmov slúžiacich na detekciu tváry, ľudskej ruky, klasifikáciu pohybov a mnoho ďalších. Algoritmy sú použité v mnohých komerčných produktoch. Knižnica podporuje Windows, Linux, Android a Mac OS a algoritmy sú dostupné v jazykoch C++, Java, Matlab a Python. Táto knižnica teda predstavuje rozsiahlu škálu použiteľnosti a dostupnosti pre mnohé firmy, aplikácie a užívateľov.

2.3 Farebné rukavice

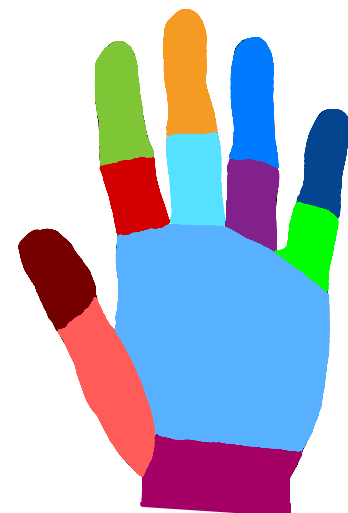
Použitie farebných rukavíc na snímanie polohy ľudskej ruky patrí do obrazového snímania. Užívateľ síce musí mať nasadenú rukavicu, snímačom je ale kamera.

Princíp snímania spočíva v rozdelení jednotlivých prstov na dve časti, taktiež rozdelenie dlane na dve časti. Takto sa dosiahne dvanásť rôznych častí ruky, ktoré sa odlišia rôznou farbou. Farebné rozdelenie jednotlivých častí uľahčuje ich detekciu pre výpočty, ktoré sú nutné na klasifikáciu gesta ruky, a teda polohy prstov. Pre určenie tvaru ruky sú definované nasledujúce parametre:

- Pozíciu desiatich častí prstov,
- Vektory zápästia - vektory medzi zápästím a prstami ľudskej ruky,
- Vektory prstov - vektory medzi začiatkom a koncom prstov ľudskej ruky,
- Vektory končekov prstov - desať vektorov medzi končekmi prstov ľudskej ruky,



(a) Určenie jednotlivých polôh častí ruky pomocou vektorov



(b) Možné rozloženie farieb na farebnej rukavici

Obr. 2.5: Princíp farebnej rukavice

Na klasifikáciu gesta sa používajú metódy ako „Decision tree“ alebo „nearest neighbour method“. [16] Na obrázku 2.5a je možné vidieť rozdelenie jednotlivých častí touto metódou.

3 Komerčné metódy snímania polohy prstov ľudskej ruky

V tejto kapitole budú predstavené komerčne dostupné systémy, ktoré vo svojich aplikáciach používajú metódy snímania polohy prstov ľudskej ruky. Na začiatku bude predstavený jeden z prvých systémov a následne budú spomenuté aj moderné systémy.

3.1 Dátová rukavica PowerGlove

PowerGlove bola vytvorená firmou Mattel ako prvý herný ovládač tohto typu. Rukavica slúžila ako herný ovládač pre videohernú konzolu Nintendo Entertainment System od spoločnosti Nintendo. PowerGlove sníma polohu štyroch prstov ľudskej ruky. Na snímanie prstov sú použité snímače ohybu ktoré boli predstavené v 2.1.1. PowerGlove dokáže zaznamenať štyri rôzne polohy prstu. Táto dátová rukavica v roku 1989 vzbudila obrovský záujem, ktorý bol ale zakrátko nasledovaný úpadkom kvôli slabej kvalite zariadenia.

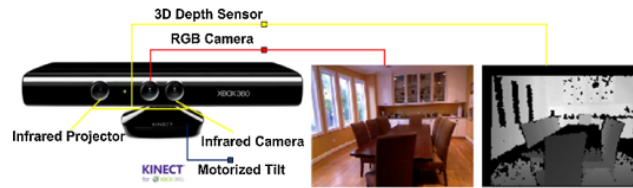


Obr. 3.1: PowerGlove od spoločnosti Mattel [17]

3.2 Herný ovládač Kinect

Kinect je bezdotykový herný ovládač od spoločnosti Microsoft pre hernú konzolu Xbox. Popis Kinectu je možné vidieť na obrázku 3.2 Táto konzola prišla na trh v roku 2010. Systém snímania spočíva v použití RGB kamery a 3D hĺbkového senzoru. Hĺbkový senzor pozostáva z dvoch komponentov: infračervená kamera a infračervený projektor. Hĺbkový senzor slúži na určenie vzdialenosti snímaného objektu od kamery Kinectu. Princíp použitia hĺbkového senzoru je vo vyžiarení infračerveného svetla projektorom do priestoru, zatiaľ čo infračervená kamera zachytí odraz tohto svetla. [18]

Použitie Kinectu sa ale dostalo aj mimo herného priemyslu a začal byť veľmi využívaný v rôznych odvetviach pre štúdiu a vylepšenie CV.



Obr. 3.2: Snímanie pomocou systému Kinect [18]

3.3 Spoločnosť Manus

Spoločnosť Manus má na výber z väčšieho množstva produktov, ktorými je možné snímať nie len polohu prstov ľudskej ruky, ale celkovo osôb a objektov v prostredí. Spoločnosť sa zameriava na herný priemysel, konkrétne na virtuálnu realitu. Medzi produkty patrí aj dátová rukavica Prime X Haptic ktorú je možné vidieť na obrázku 3.3. Táto rukavica dokáže nie len snímať polohu prstov ale aj poskytnúť haptickú spätnú väzbu užívateľovi, ktorú spôsobí virtuálny objekt ktorý drží. Dalším produktom je SteamVR Pro Tracker, ktorý je možné pripevniť na rôzne časti tela a s použitím softwaru Polygon snímať ľudský pohyb, ktorý je následne interpretovaný do VR. Podľa technickej dokumentácie Manus VR je presnosť snímania ohybu prstov $\pm 3^\circ$. Pre snímanie ohybu prstov sú použité flexibilné analógové senzory. Na jednotlivých prstoch je snímaný hánkový kĺb a stredný (proximálny interfalangeálny) kĺb. Opakovateľnosť použitých flexibilných senzorov je viac ako 1 000 000 ohybov. Táto rukavica taktiež sníma orientáciu palca a ruky pomocou IMU jednotky s deviatimi stupňami voľnosti. Presnosť snímania orientácie je rovnako ako presnosť snímania ohybu $\pm 3^\circ$. Manus VR rukavica používa na prenos nameraných dát bezdrôtovú rádiovú komunikáciu o 2.4GHz.



Obr. 3.3: Manus Prime X Haptic [19]

4 Návrh snímacieho systému

V tejto kapitole bude popísaný návrh systému na snímanie ľudskej ruky. Cieľom kapitoly je popísať kroky návrhu, jednotlivé komponenty systému a iné možné riešenia, ktoré z uvedených dôvodov neboli použité. Na začiatku kapitoly budú uvedené požiadavky na systém, ktorý bude snímať polohu prstov ľudskej ruky. Následne bude uvedená bloková schéma systému a budú vybraté a popísané jednotlivé komponenty.

4.1 Požiadavky na systém snímajúci polohu prstov ľudskej ruky

V tejto časti budú definované požiadavky na systém, ktorý má za úlohu snímať polohu a pohyby ľudskej ruky.

4.1.1 Metóda snímania

Ako prvá požiadavka musí byť metóda ktorou bude snímanie zabezpečené. V predošlých kapitolách boli predstavené dve metódy a to obrazová a neobrazová. Táto požiadavka definuje smer ktorým sa bude návrh následne uberať. Pre tento systém bola zvolená neobrazová metóda. Systém bude teda ďalej navrhovaný ako dátová rukavica. Metóda bola zvolená kvôli vyskúšaniam a overeniu možnosti snímania polohy prstov pomocou dátovej rukavice.

4.1.2 Snímanie polohy prstov

Požadovaná presnosť merania ohybu prstov pre navrhovaný systém je 10° . Cieľom nie je snímať rýchlosť alebo orientáciu prstov ale docieľiť požadovanú presnosť v meraní ohybu prstu. Systém má za úlohu snímať polohu troch prstov (palec, ukazovák, prostredník) na ľudskej ruke.

4.1.3 Poloha a orientácia ruky

Pre čo najlepšiu praktickú využiteľnosť dátovej rukavice je nutné okrem pohybu v prstoch snímať polohu v (xyz) priestore a orientáciu ruky, resp. uhlové natočenie ruky.

4.1.4 Prenos dát

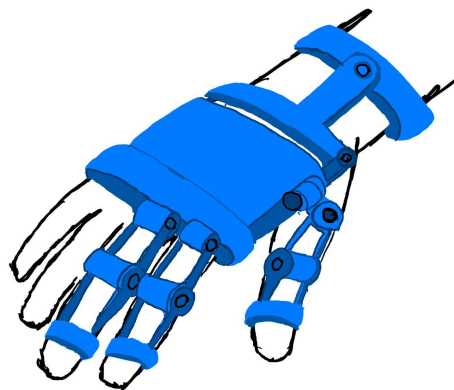
Od navrhovaného systému sa očakáva, že sa bude jednať o mobilné zariadenie. Pre túto požiadavku je nutné teda zabezpečiť bezdrôtový prenos nameraných a spracovaných dát. Aby bol systém čo najviac kompatibilný pre užívateľov rôznych zariadení, je požadovaná bezdrôtová komunikácia pomocou Bluetooth.

4.1.5 Výpočetná jednotka pre spracovanie dát

Keďže je požadované aby systém bol bezdrôtový bude pre jeho napájanie použitá batéria. Z dôvodu vyššej výdrže batérie, a teda vyššieho času používania, by mala byť výpočetná jednotka schopná pracovať v nízko výkonovom mode. Použitá výpočetná jednotka by taktiež mala byť schopná komunikovať, s ostatnými modulmi systému, pomocou komunikačného rozhrania SPI (Serial Peripheral Interface – Sériové periférne rozhranie). Od jednotky sa taktiež požaduje 12-bitový A/D prevodník.

4.1.6 Konštrukcia dátovej rukavice

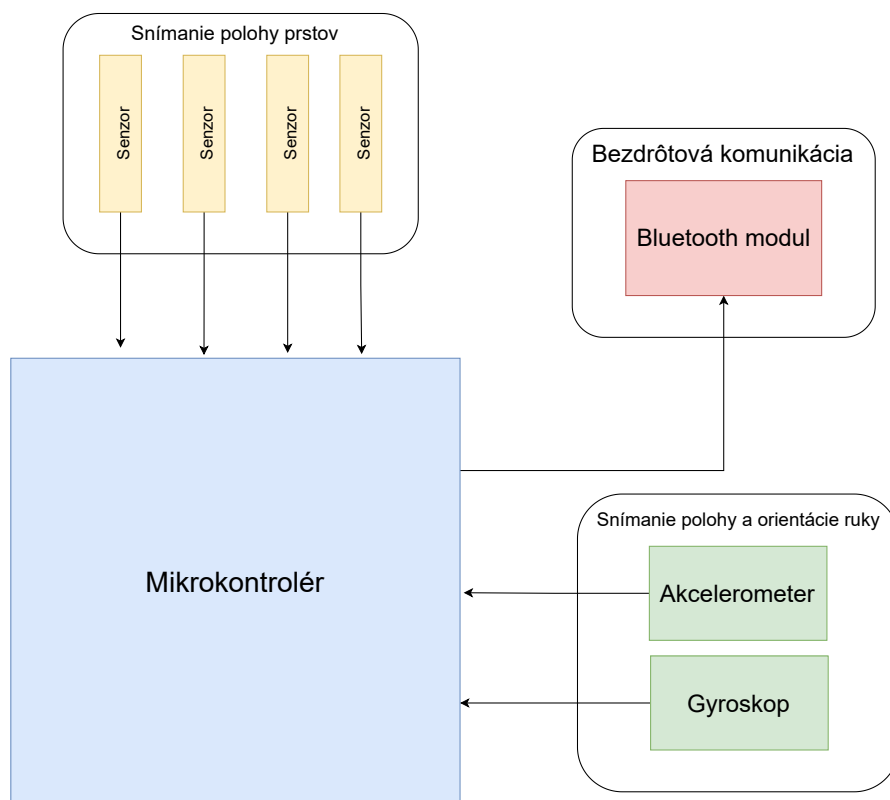
Jednou z posledných požiadaviek je spôsob, ako bude dátová rukavica skonštruovaná. Pre tento návrh je požadovaná konštrukcia rukavice v podobe exoskeletonu. Použitie látkovej rukavice je menej pohodlné pre užívateľa a taktiež je pre plastový materiál jednoduchšie čistenie. Náčrt predpokladanej konštrukcie je na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Náčrt navrhovanej rukavice

4.2 Komponenty systému

V tejto podkapitole budú popísané jednotlivé komponenty, ktoré boli vybraté na základe požiadavok určených v predošlej podkapitole 4.1. Pri výbere snímačov pre snímanie ohybu prstov bude popísaná aj možnosť domácej výroby snímačov pre použitie v tomto systéme.



Obr. 4.2: Bloková schéma systému snímania prstov ľudskej ruky

4.2.1 Snímače ohybu prstov ľudskej ruky

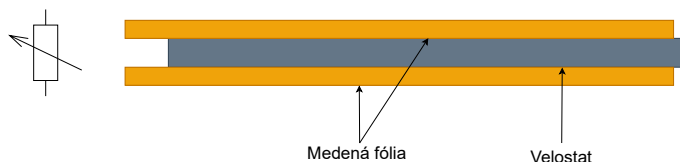
Pre splnenie určených podmienok pre snímanie polohy štyroch prstov na ľudskej ruke bolo zvažované použitie senzorov ohybu od firmy Spectra Symbol. Princíp tohto typu senzorov bol už popísaný v časti 2.1.1. Pre systém neboli špecializované žiadne podmienky na snímanie ohybu prstov v tepelne náročných prostrediach. Vybraté snímače sú ale schopné pracovať v tepelnom rozmedzí -35°C až $+80^{\circ}\text{C}$ čo vyhovuje pre užívanie v bežnom prostredí. Snímače sú dostupné v dvoch rôznych dĺžkach a to: 112.24mm (95.25mm aktívna dĺžka) s odporom vo vyrovnanom stave $10\text{K}\Omega \pm 30\%$ a kratšou verziou 73.66mm (55.37mm aktívna dĺžka) s hodnotou odporu senzoru vo vystretom stave $25\text{K}\Omega \pm 30\%$.

Vytvorenie snímaču ohybu

Z dôvodu vyššej ceny snímaču ohybu od spoločnosti Spectra Symbol, rádovo desiatky eur za jeden kus, bola zvážená náhrada týchto snímačov ohybu vytvorená v domácich podmienkach.

Citlivý člen snímaču Vytvorenie snímaču ohybu spočíva v použití piezorezistívneho materiálu s názvom Velostat¹. Velostat je materiál, ktorý je vytvorený z polyolefínu, čo je polymerový materiál, napusteným časticami karbonu. Tieto karbonové častice urobia tento polymer vodivý. Materiál mení svoju vodivosť, alebo teda odpor, pri ohýbaní, tlaku, rozťahovaní. Piezorezistívny efekt spočíva v približovaní vodivých častíc² karbonu silovým pôsobením na materiál a výsledkom je vyššia vodivosť, teda nižší odpor materiálu.[20]

Konštrukcia snímaču Snímaču je nutné zabezpečiť vstupnú a výstupnú elektródu a taktiež piezorezistívny materiál zapúzdiť. Najviac používaný spôsob použitia materiálu Velostat je v takzvanej sandwichovej konštrukcii. Konštrukcia je zobrazená na obrázku 4.3 a spočíva v nanosení vodivých elektród po celej dĺžke Velostatu z oboch strán. Pri konštrukcii boli navrhnuté a testované aj vlastné riešenia, avšak ani jeden neprejavil lepšie výsledky ako práve sandwichová konštrukcia. Ako vodivý materiál elektród bola zvolená medená lepiaca fólia.



Obr. 4.3: Konštrukcia sandwich snímača ohybu

Záver tvorenia snímaču ohybu

Počas priebehu tvorenia snímaču sa došlo k záveru, že takouto cestou snímač nie je možné spoľahlivo vytvoriť. Výsledné vytvorené snímače síce preukázali charakter odporového tenzometru, no často sa nezhodovali vo svojich hodnotách odporu. Vytvorenie snímačov iným postupom, než prezentovaným v tejto práci, môže byť témou budúcej práce. Pre navrhovaný systém teda boli dočasne zvolené snímače ohybu od Spectra Symbol (viz obrázok 4.4). Týmto snímačom sa venuje nasledujúca kapitola (viz 5) kvôli zisteniu, či vyhovujú požiadavkám pre navrhovaný systém.

¹Známy aj pod názvom Linqstat,

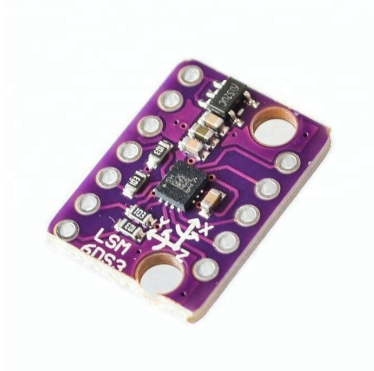
²Jav je tiež známy pod názvom Perkolácia,



Obr. 4.4: Snímač ohybu Spectra Symbol[21]

4.2.2 Snímač pohybu ľudskej ruky

Jednou z požiadaviek na systém je snímanie orientácie a polohy ruky. Pre navrhovaný systém bude použité riešenie bežne používané vo väčšine dátových rukavíc, to znamená použitie IMU senzoru. Pre navrhovaný systém bol vybraný IMU senzor OKY3259-5 od firmy Okystar (viz obrázok 4.5). Tento senzor používa integrovaný obvod LSM6DS3. OKY3259-5 používa dve komunikačné rozhrania a to I2C (Inter-Integrated Circuit) a SPI. V prípade navrhovaného systému bude kvôli vyššej rýchlosti zvolené práve rozhranie SPI.



Obr. 4.5: IMU senzor OKY3259-5[22]

4.2.3 Mikrokontrolér navrhovaného systému

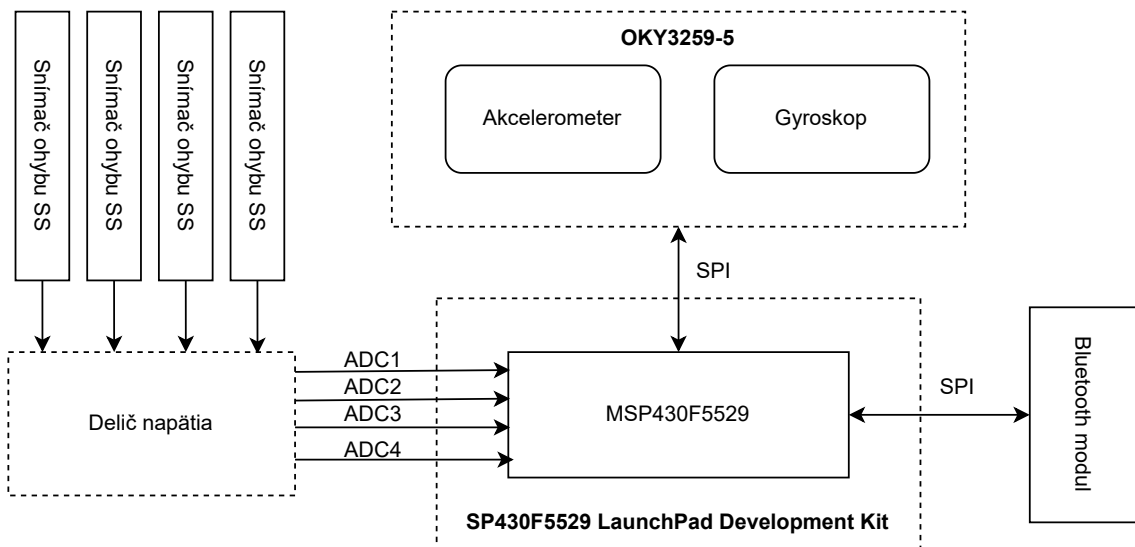
Pre navrhovaný systém bola zvolená vývojová sada SP430F5529 LaunchPad Development Kit, s integrovaným mikrokontrolérom MSP430F5529 z rady eZ-FET. Táto vývojová sada je od spoločnosti Texas Instruments a je možné ju vidieť na obrázku 4.6. Mikrokontrolér podľa požiadavok dokáže pracovať v Low-Power (nízko výkonom) mode .Taktiež podľa požadovaných podmienok je mikrokontrolér schopný komunikovať cez rozhranie SPI. Toto rozhranie bude slúžiť pre komunikáciu IMU senzoru a prídavného Bluetooth modulu. Mikrokontrolér predstavuje 16-bitový RISC (Reduced instruction set computer – procesor s redukovanou inštrukčnou sadou) procesor a 12-bitový A/D prevodník, ktorý bol požadovaný.



Obr. 4.6: Vývojová sada MSP430F5529 LaunchPad Development Kit[23]

4.2.4 Výsledný navrhovaný systém

V tejto podkapitole je možné vidieť blokovú schému navrhovaného systému (viz obrázok 4.7). Bloková schéma uvažuje vybrané komponenty ktoré zabezpečujú meranie, vybraný mikrokontrolér na spracovanie dát a komunikačnú zbernicu SPI, ktorá zabezpečuje komunikáciu medzi MSP430F5529, OKY3259-5 a bluetooth modulom. V blokovej schéme je vidieť, že pre snímanie ohybu bolo navrhnuté použiť napäťový delič, teda meranie úbytku napätia na snímači ohybu pomocou vstupu A/D prevodníku mikrokontroléru. Pre snímanie palca bolo navrhnuté použitie dvoch senzorov ohybu, kvôli možnosti snímania zovretia tohto prstu.



Obr. 4.7: Bloková schéma systému snímania s vybranými komponentami

5 Meranie charakteristík senzoru ohybu

V tejto kapitole bude popísané meranie charakteristík sensorov ohybu, potrebných pre rozhodnutie použiteľnosti týchto sensorov pre navrhnutý systém. Dôvodom meraní charakteristík bolo, že v rámci rešeršu nebola nájdená dostatočná technická dokumentácia, a teda dostatok informácií, potrebných pre ich použitie pre aplikáciu merania ohybu prstov ľudskej ruky. Merania prebiehali v spolupráci so skupinou merania, ktorá spadá pod Ústav automatizácie a meracej techniky. Pre zmeranie závislosti výstupnej veličiny sensorov, teda ich odporu, na uhle ohybu bol vytvorený prípravok, ktorý sa skladal z rotačného stolíku, dosičky pre pripevnenie sensorov a opornej steny. V rámci týchto meraní bola taktiež zmeraná teplotná závislosť odporu sensorov pomocou kalibračnej pece AOIP GEMINI, so sériovým číslom 32900-3. Hodnota odporu sensorov bola v každej úlohe meraná multimetrom Tesla BM 579 MY4700105134410A. V jednotlivých úlohách sú senzory rozlíšené číslami 1,2,3 a toto označenie im prísluší v každej nasledujúcej úlohe.

5.1 Návrh úlohy merania sensorov ohybu

Na začiatku bolo nutné navrhnuť čo je dôležité pre použitie sensorov ohybu od Spectra Symbol pri meraní ohybu prstov ľudskej ruky. V rámci technickej dokumentácie nebola uvedená napríklad prevodná charakteristika $R = f(\phi)$. Z tohto dôvodu bolo navrhnuté zmeranie nasledujúcich charakteristík:

- Prevodná charakteristika $R = f(\phi)$,
- Teplotná závislosť odporu senzoru,
- Opakovateľnosť,
- Vplyv rýchlosti ohybu na hodnote výstupného odporu,

V nasledujúcich podkapitolách budú popísané postupy a návrhy konkrétnych úloh meraní.

5.2 Uhlová závislosť senzoru ohybu

Ako prvá bola meraná závislosť $R = f(\phi)$. Táto charakteristika je podstatná pre zistenie charakteru výstupu sensorov ale aj z dôvodu kalibrácie sensorov, ktorá je nutná pre správne meranie ohybu. Pre zabezpečenie čo najpresnejšieho ohybu ϕ [°] bol použitý rotačný stolík. Aby meranie čo najviac simulovalo reálne použitie boli použité dve pomocné steny. Prvá stena bola statická a na tejto stene boli senzory pevne upevnené. Druhá stena bola statická voči rotačnému stolíku, a teda zabezpečovala ohyb senzoru do požadovaného uhlu. Na tomto druhom konci senzory neboli pevne upevnené, a to z dôvodu potrebnej vôle pre lineárny pohyb. Prípravok je



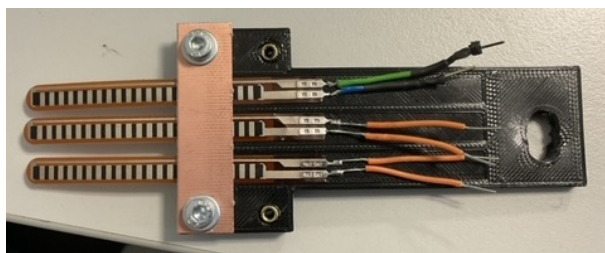
Obr. 5.1: Prípravok pre meranie

možné vidieť na obrázku 5.1. Sensory boli upevnené na plôške ktorá bola vytvorená na upevnenie troch sensorov. Toto bolo kvôli umožneniu merania všetkých sensorov naraz. Plôšku aj s uchytenými senzormi je možné vidieť na obrázku 5.2.

Pred začatím merania bolo nutné určiť podmienky ako sensory premerať čo najspolahlivejšie. Prvotná myšlienka bola zmerať ohyb senzoru vo viacerých bodoch. Z princípu zmeny odporu, teda zväčšenia dĺžky vodivého materiálu medzi segmentami, bolo zvažované ohýbať sensory po určitých počtoch segmentov. Minimálny počet týchto segmentov bol určený tak, aby nedošlo k nevratnej deformácii materiálu a teda poškodeniu senzoru. Segmentov na senzore je 23 a teda jednotlivé merania boli rozdelené pre posuvy od počiatku trikrát po šesť segmentov a jedenkrát pre päť segmentov. Keďže zmyslom tejto práce nie je podrobné premeranie charakteristiky týchto sensorov, upustilo sa od tohto návrhu a bol zvolený nový spôsob, ktorý definuje ohyb vo vzdialenostiach stredného kĺbu prsta ukazováku, čo je presne jeden z bodov ohybu použitý pre tento systém. Táto dĺžka je samozrejme definovaná stavbou ruky autora a teda sa nejedná o obecné premeranie.

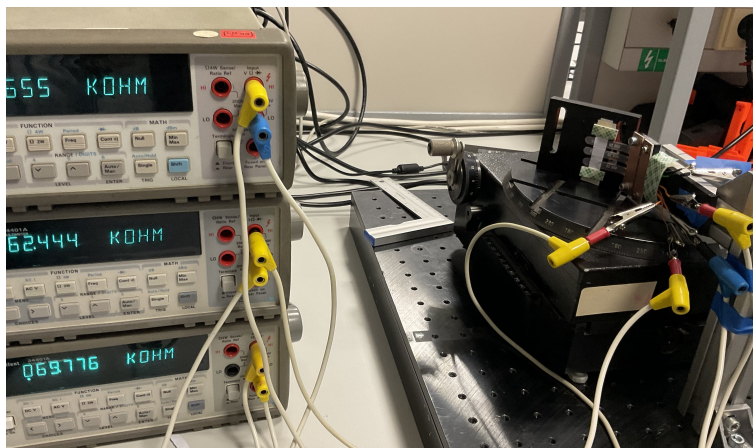
5.2.1 Návrh merania uhlovej závislosti senzoru ohybu

V tejto časti bude popísaný návrh, priebeh a úpravy merania, ktoré z priebehu merania vyplynuli. Ako bolo spomenuté v úvode do tohto merania, na prípravku boli použité dve steny pre senzor. Na statickú stenu boli sensory upevnené ako je možné vidieť na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Upevnenie senzorov

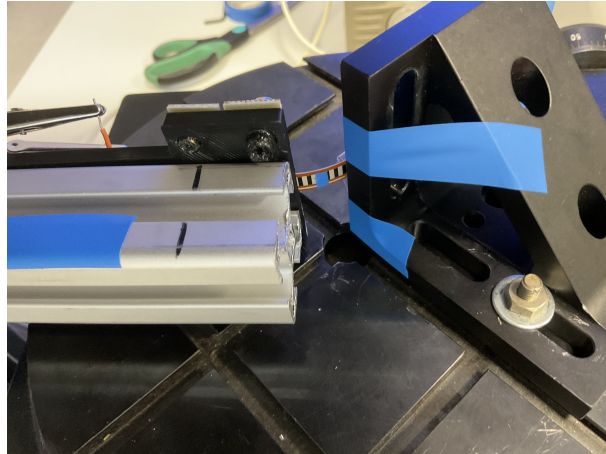
Výsledný prípravok je možné vidieť na obrázku 5.3. Pôvodne boli navrhnuté dva spôsoby merania kde prvé meranie bolo definované ohybom senzoru bez objektu ohybu. Rádus tohto ohybu nebol predom určený a jednalo sa o postavenie bodu ohybu do stredu vzdialenosti medzi dvomi stenami. Toto je možné vidieť na obrázku 5.4. Modrá značka predstavuje približnú polohu kĺbu. Druhé meranie malo simulovať ohyb okolo kĺbu a na to bol použitý valcový objekt s polomerom približne rovným stredového kĺbu v zovrätej polohe prsta. Od prvého spôsobu sa upustilo, pretože počas ohybu dochádzalo k deformáciám plastového, ale aj papierového pásiku, ktorý senzor držal. To zapríčinilo posuv bodu ohybu a teda nepresnosť v meraní. Zároveň bolo zvažované, že druhý spôsob merania bude postačujúci a vhodnejší pre získanie charakteristiky. Ako výsledný spôsob merania teda ostal druhý spôsob, ktorý bol už predom spomenutý. Prípravok pre výsledné meranie je teda vidieť na obrázku 5.5.



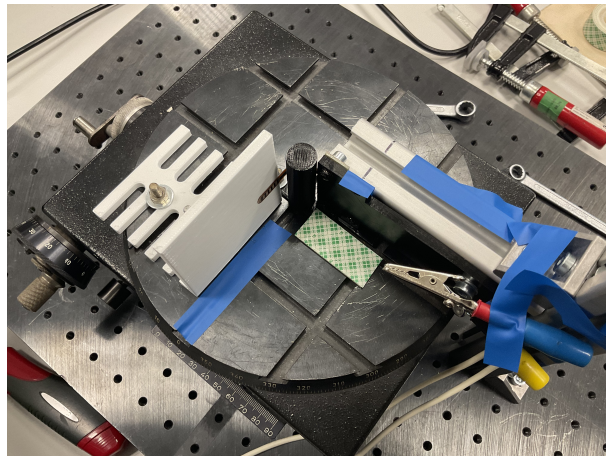
Obr. 5.3: Prípravok so senzormi

Postup merania uhlovej závislosti senzoru ohybu

Cieľom merania bolo získanie prevodnej charakteristiky $R = f(\phi)$ a taktiež opakovateľnosti hodnôt senzoru. Ako bolo spomenuté v návrhu merania, meranie senzoru ohybu od Spectra Symbol spočívalo v postupnom ohybe okolo valcového objektu.

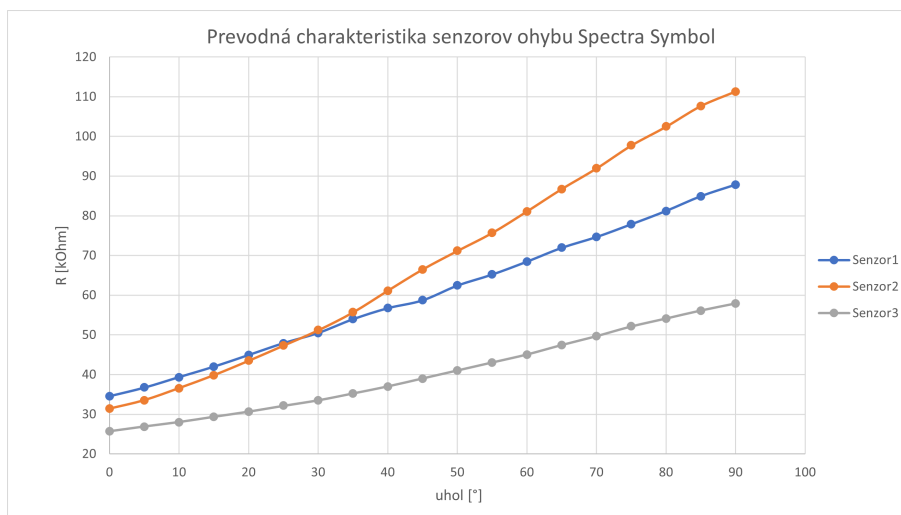


Obr. 5.4: Meranie bez objektu ohybu



Obr. 5.5: Výsledný prípravok

Tento objekt bol upevnený v strede rotačného stolíka. Ohyb senzoru prebiehal v rozsahu 0° - 90° s krokom 5° . Počas priebehu merania bolo spozorované, že čím väčší stupeň ohybu pôsobil na senzory, tým viac sa hodnota s rastúcim časom v tomto uhle ohybu znižovala. Výstup senzorov predstavoval akési ustálovanie na hodnotu, ktorá počas merania nebola známa. Z tohto dôvodu bolo rozhodnuté zmerať aj toto chovanie senzorov aby sa prípadne mohol nájsť spôsob ako a či vôbec kompenzovať toto chovanie. Pre toto meranie navrhol a vytvoril software pán Ing. Jiří Fialka Ph.D., zo skupiny merania z Ústavu automatizácie a meracej techniky. Postup tohto merania spočíval v ohnutí senzoru do uhlu 90° a následnom čakaní po dobu štyroch minút na ustálenie hodnoty.



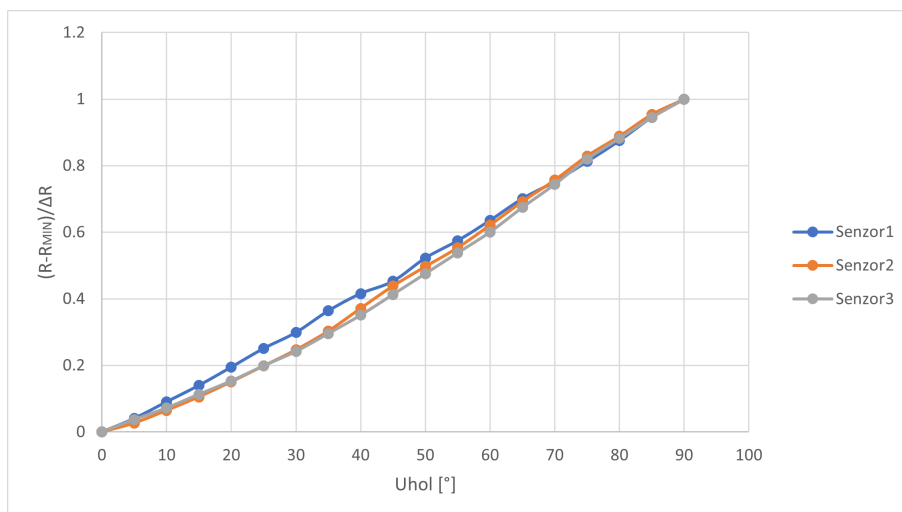
Obr. 5.6: Prevodná charakteristika senzorov ohybu

Výsledky merania uhlovej závislosti senzoru ohybu

Na grafe 5.6 je možné vidieť charakteristiky troch senzorov ohybu. Senzor označený číslom 3 sa svojimi hodnotami najviac líši od senzorov 1 a 2. Je to z toho dôvodu, že tento senzor bol čisto nový, teda pred meraním nebol namáhaný, resp. ohýbaný. Prvé dva senzory boli ešte pred meraním používané na testovanie a teda už došlo k deformáciám, ktoré mali vplyv na vnútornú štruktúru senzorov. Z grafu sa charakteristiky javia lineárne. Aby sa priebehy dali porovnať boli namerané hodnoty normalizované do rozsahu 0-1 a to pomocou 5.1.

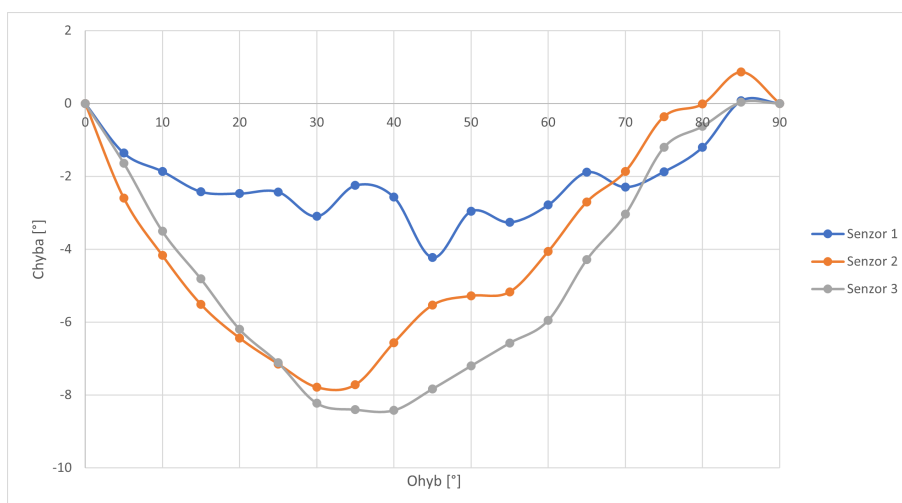
$$\frac{R - R_{MIN}}{\Delta R} = \frac{R - R_{MIN}}{R_{MAX} - R_{MIN}} \quad (5.1)$$

Prevodnú charakteristiku senzorov ohybu je možné podľa grafu 5.7 považovať za lineárnu. Táto informácia bola veľmi podstatná pre kalibráciu senzorov. Čo sa týka výsledku merania časového ustálenia hodnôt odporu senzorov bola zmena odporu pre senzor 1 $\Delta R = 9.94k\Omega$. V prípade senzoru 2 $\Delta R = 21.28k\Omega$ a pre senzor 3 $\Delta R = 6.05k\Omega$. Zmerané hodnoty je možné vidieť v elektronickej prílohe bakalárskej práce. Pre zistenie či senzory budú schopné splniť požiadavok na presnosť snímania 10° boli stupne ohybu a výstupný odpor senzorov normalizované do rozsahu 0-1. Ich diferenciou a následným prevodom na stupne, pomocou výpočtu 5.2, bol získaný rozdiel výstupu senzorov v stupňoch a reálnemu uhlu v ktorom boli senzory ohnuté pomocou prípravku. Na grafe 5.8 je možné vidieť, že najväčšia chyba je 8.42° čo spĺňa požiadavok na presnosť senzorov pre snímanie ohybu prstov. Tabuľka spočítanej chyby je uvedená v prílohe (viz A.4).



Obr. 5.7: Lineárny model prevodnej charakteristiky senzorov ohybu

$$\alpha = 90 \cdot \left(\frac{R - R_{MIN}}{\Delta R} - \frac{\phi}{90} \right) \quad [^\circ] \quad (5.2)$$



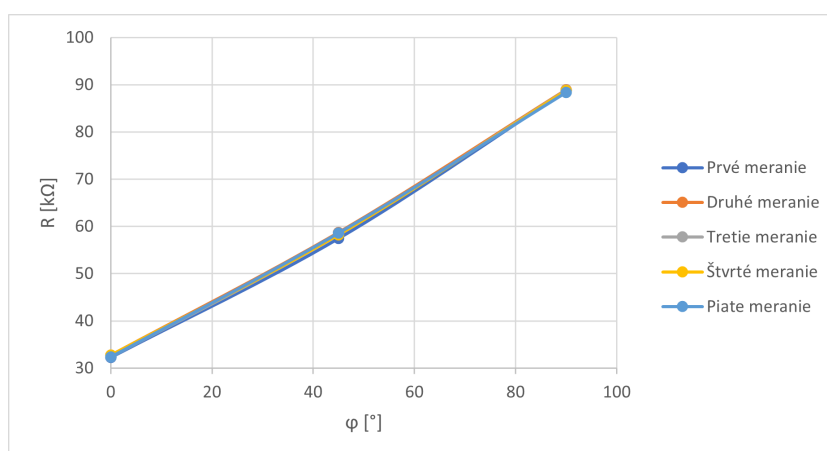
Obr. 5.8: Chyba výstupu senzorov ohybu

5.3 Opakovateľnosť senzoru ohybu

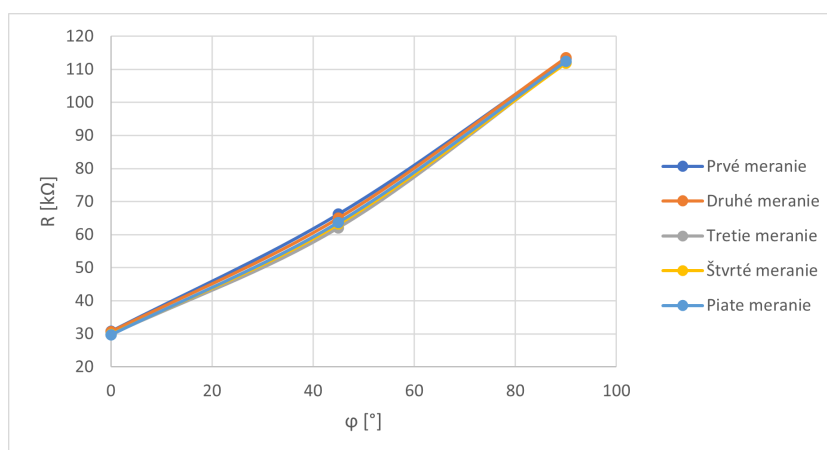
Ďalším parametrom, ktorý bol zmeraný bola opakovateľnosť hodnôt senzoru ohybu. Pre toto meranie boli zvolené tri uhly a to uhly 0° , 45° , 90° . Meranie bolo vykonané pre každý senzor päťkrát. Pre vykonanie tohto merania bol použitý rovnaký prípravok ako v prípade merania prevodnej charakteristiky popísanej v podkapitole 5.2.

5.3.1 Výsledky merania opakovateľnosti senzoru ohybu

Výsledné tabuľky A.1 a A.2 sú uvedené v prílohe tejto bakalárskej práce. Výsledky z merania opakovateľnosti je ale možné vidieť na grafe 5.9, grafe 5.10 a grafe 5.11.

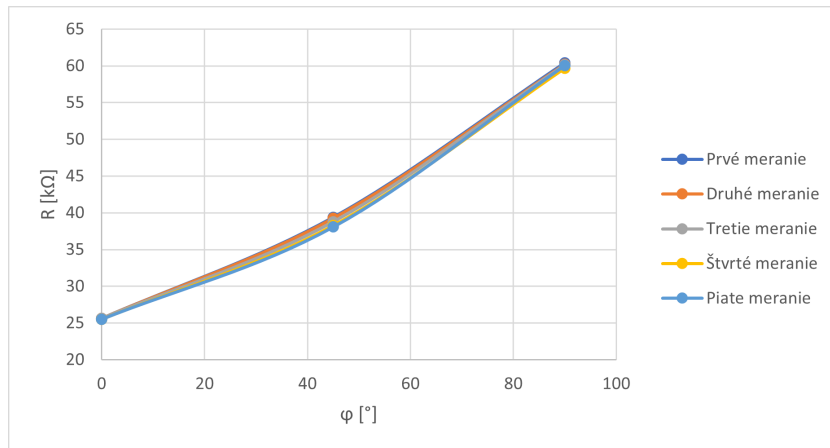


Obr. 5.9: Opakovateľnosť výstupných hodnôt senzoru ohybu č.1



Obr. 5.10: Opakovateľnosť výstupných hodnôt senzoru ohybu č.2

Pre zistenie odchýliek hodnôt pre dané stupne bol vypočítaný rozdiel maximálnej hodnoty a minimálnej hodnoty získanej zo všetkých piatich meraní. Toto je možné

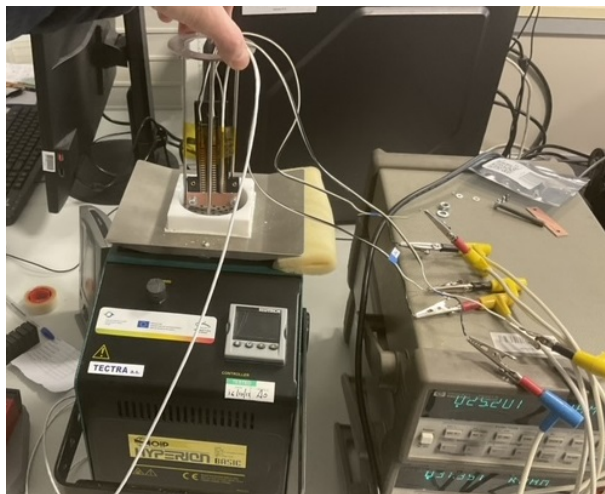


Obr. 5.11: Opakovateľnosť výstupných hodnôt senzoru ohybu č.3

vidieť na tabuľkách A.5, A.6, A.7. Z týchto tabuliek je tiež vidno, že najhoršia opakovateľnosť bola pri 45° senzoru 2 a to 4.16 $K\Omega$. To odpovedá zmene približne 5° čo stále nepresahuje chybu väčšiu ako 10°, čo je požadovaná presnosť snímania. Zvyšné výsledky ale predstavujú štyrikrát menšie odchylky a teda zanedbateľne malý rozdiel.

5.4 Teplotná závislosť senzoru ohybu

Vplyv teploty na výstupnú hodnotu sensorov bolo nutné zistiť kvôli možnému vzniku odchýliek v závislosti na teplote ľudskej pokožky. Pre toto meranie bola použitá teplelná banka, resp. kalibračná pec AOIP GEMINI so sériovým číslom 32900-3. Všetky tri senzory boli opäť pevne pripevnené na podložke ktorá bola použitá ako statická stena v predošlých meraniach. Aparát pre meranie je možné vidieť na obrázku 5.12



Obr. 5.12: Aparát pre meranie teplotnej závislosti senzoru ohybu

5.4.1 Návrh merania teplotnej závislosti senzoru ohybu

Pre toto meranie bolo najpodstatnejšie zistiť vplyv teploty ľudskej pokožky na výstupný odpor sensorov ohybu. Tento rozsah bol definovaný ako 30 °C až 40 °C. V rámci merania bolo ale navrhnuté zmerať väčší rozsah teplôt. Rozsah teplôt bol zvolený -20 °C až 50 °C. Teplota v tepelnej banke bola menená hysterézne. Postup merania je popísaný v nasledujúcej časti.

5.4.2 Postup merania teplotnej závislosti senzoru ohybu

Banka bola na začiatku merania zahriata na 20 °C. Postupne sa teplota v banke zvyšovala po 5 °C k hodnote 50 °C. Po nastavení žiadanej teploty v banke, pomocou teplotného regulátora, sa pred každým odčítaním hodnôt zo sensorov nechala teplota v banke ustáliť. Ustálenie trvalo v každom kroku merania päť minút. Po dosiahnutí teploty 50 °C v banke, čiže maximálnej zvolenej, bola teplota rovnakým spôsobom postupne nastavovaná k teplote -20 °C. Počas merania bolo použité aj externé tepelné čidlo, ktoré meralo teplotu priamo na dosičke na ktorej boli senzory

upevnené. Meranie teploty priamo na dosťičke bolo kvôli zisteniu možných odchýliek medzi teplotou v komore banky a teploty priamo na dotičke na ktorej boli senzory pripevnené. Predpokladalo sa, že pri veľmi nízkych teplotách bude kvôli nie ideálnej izolácií vonkajšieho vzduchu teplota v komore banky vyššia. To sa aj potvrdilo. Od teploty $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ vznikal teplotný rozdiel. Najnižšia teplota zmeraná externým čidlom bola $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ na prípravku, a $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ v komore pri žiadanej hodnote $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. V tabulkách merania boli ale uvedené žiadané hodnoty teploty.

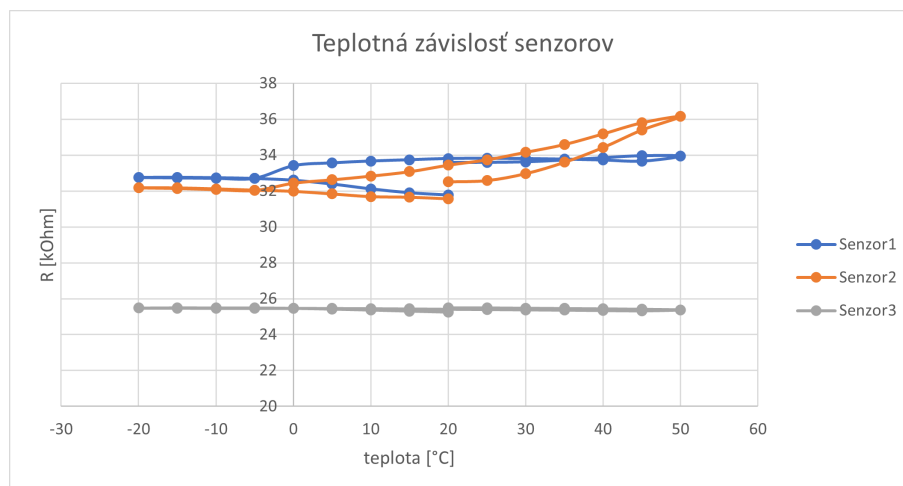
5.4.3 Výsledky merania teplotnej závislosti senzoru ohybu

Výslednú teplotnú závislosť všetkých troch sensorov ohybu je možné vidieť na grafe 5.13. Tabuľka A.8 z merania je uvedená v prílohe k bakalárskej práci. Z výsledkov merania je vidieť, že teplotná závislosť sensorov je minimálna. Najviac sa zmena odporu v závislosti na teplote prejavila pre senzor 1. Podstatným rozsahom teplôt je $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozdiel výstupného odporu v tomto rozsahu je uvedený v tabuľke 5.1. Hodnoty v tabuľke vyjadrujú rozdiel odporov pri teplotách $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Prvý riadok sa týka časti hysterézy kedy sa teplota zvyšovala a druhý riadok sa týka hodnôt pri znižovaní teploty. Rozdiel hodnôt odporu sensorov nepresiahol $1\text{K}\Omega$ až na senzor č.2 ktorého hodnota sa zmenila o $1.46\text{ K}\Omega$. Sensory boli počas merania v polohe 0° . Podľa prevodnej charakteristiky (viz. 5.6) je odpor senzoru 2 v tomto uhle $R = 31.4\text{ K}\Omega$, pričítaním rozdielu k tejto hodnote bol získaný $R = 32.9\text{ K}\Omega$. Po prevedení hodnoty na stupne ohybu bol získaný uhol ohybu $\phi = 1.63^{\circ}$. Chyba $\Delta\phi = 1.63^{\circ}$ teda nepresiahla 10° a chybu vzniknutú vplyvom teploty teda nie je nutné kompenzovať. Sensory ohybu od spoločnosti Spectra Symbol je možné použiť v rozsahu teplôt $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez nutnosti kompenzovania chyby.

$$90 \cdot \frac{R - R_{min}}{\Delta R} = 90 \cdot \frac{32.9 - 31.4}{79.9} = 1.63^{\circ}$$

$\Delta R [k\Omega]$		
Senzor 1	Senzor 2	Senzor 3
0.229	1.46	0.036
0.08	1.03	0.04

Tab. 5.1: Zmena výstupného odporu v skúmanom rozsahu



Obr. 5.13: Teplotná závislosť senzorov ohybu

5.5 Závislosť výstupného odporu od rýchlosti ohybu

Posledným meraním senzorov ohybu bolo meranie závislosti výstupu od rýchlosti ohybu. V prípade, že by na amplitúdu výstupu senzorov ohybu mala vplyv rýchlosť akou je tento ohyb vykonávaný, museli by byť pre systém navrhnuté obmedzenia.

5.5.1 Návrh merania závislosti výstupného odporu od rýchlosti ohybu

V tomto meraní bolo cieľom získať výstupné hodnoty odporu senzorov v závislosti na rýchlosti ohybu, teda zmena uhlu voči zmene času $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$. Uhol bol menený z počiatočnej hodnoty 0 ° do 30 °. Čas za ktorý sa ohyb vykonal nebol predom presne daný. Aby meranie bolo presnejšie než použitím stopiek, bol použitý opäť software ktorý bol použitý v podkapitole 5.2.1. Tento merací program totižto udával závislosť amplitúdy výstupného odporu v závislosti na čase. Tento čas bolo možné použiť pre určenie Δt .

5.5.2 Postup merania závislosti výstupného odporu od rýchlosti ohybu

Pre túto úlohu bol opäť použitý prípravok z predošlých meraní (viz. 5.5). Ohyb senzoru prebehol trikrát so snahou troch rôznych rýchlostí. Ako bolo predom uvedené, časová zmena nebola predom presne daná a jednalo sa len o pomalšiu alebo rýchlejšiu rotáciu rotačného stolíka. Po dosiahnutí uhlu 30 ° bola na okamih približne o

1 sekundu zmena uhlu $\Delta\phi = 0^\circ$. Následne sa ohyb senzoru dostal opäť do počiatočnej polohy, teda uhlu 0° . Toto bolo pre tri senzory vykonané trikrát a to s rôznou rýchlosťou ohybu.

5.5.3 Výsledky merania závislosti výstupného odporu od rýchlosti ohybu

Na výsledných priebehoch (viz A.1, A.2, A.3) je vidieť, že sa amplitúda výrazne nemenila podľa rýchlosti ohybu. Rýchlosti v jednotlivých meraniach nie sú ale rovnaké. Nepresnosť je spôsobená tým, že prípravok nebol akokoľvek automatizovaný a rýchlosť závisela čisto od rýchlosti ručného nastavovania uhlu rotačného stolíku. Hodnoty boli rozdelené do jednotlivých úsekov podľa rýchlostí, a v týchto úsekoch bola nájdená maximálna amplitúda. Toto je možné vidieť v tabulkách 5.2, 5.3, 5.4.

Úsek	R_{max} [K Ω]
1	50.4
2	50.2
3	49.9

Tab. 5.2: Hodnota R_{max} pre jednotlivé úseky - senzor 1

Úsek	R_{max} [K Ω]
1	49.2
2	48.9
3	49.2

Tab. 5.3: Hodnota R_{max} pre jednotlivé úseky - senzor 2

Úsek	R_{max} [K Ω]
1	33.2
2	33.0
3	32.9

Tab. 5.4: Hodnota R_{max} pre jednotlivé úseky - senzor 3

5.6 Záver merania charakteristík senzorov ohybu

V rámci merania charakteristík senzorov ohybu bola ako prvá zmeraná prevodová charakteristika $R = f(\phi)$. Výsledok merania tejto charakteristiky ukázal, že závislosť $R = f(\phi)$ je možné pokladať za lineárnu. Taktiež bola uvedená charakteristika chyby výstupu senzorov v stupňoch. Chyba ale neprekročila 10° a senzory teda dokážu zabezpečiť požadovanú presnosť snímania ohybu prstov.

Rozdiel hodnôt pri meraní opakovateľnosti sa pre senzory 1 a 3 pohyboval v prípade uhlov 40° a 90° do $1K\Omega$ a uhol 45° nepresiahla odchyľka $1.5k\Omega$. Senzor 2 predstavoval väčšie odchyľky kedy pre uhly 45° bola odchyľka $1.157K\Omega$ a 90° bola odchyľka $1.64k\Omega$. Takéto odchyľky predstavujú ale zanedbateľný rozdiel ohybu v stupňoch. Horší prípad nastal v prípade senzoru 2 pri 45° , kedy bola odchyľka $4.161K\Omega$ čo predstavuje zmenu uhlu približne o 4° . V požiadavkách na navrhovaný systém snímania polohy prstov ľudskej ruky je presnosť požadovaná na 10° čo teda ešte tento prípad spĺňa. Nie je teda nutná kompenzácia, zároveň sa jedna o jeden z dvoch senzorov, ktoré boli počas experimentov viac namáhané a teda vnútorná štruktúra bola zmenená. Senzor 3 bol pri meraní použitý ako čisto nový a teda najlepšie reprezentuje použitie senzorov ohybu od Spectra Symbol pre navrhovaný systém.

Meranie teplotnej závislosti senzorov ohybu ukázalo, že v teplotnom rozsahu 30°C až 40°C nie je nutné navrhovať kompenzáciu odchyľky výstupných hodnôt. Senzor 3 preukázal minimálnu teplotnú závislosť a jeho odchyľka výstupného odporu sa pohybovala v rádoch stotín. Najväčšiu teplotnú závislosť prejavil senzor 2, kedy sa jeho maximálna odchyľka rovnala $\Delta R = 1.456K\Omega$. Odchyľka je ale opäť zanedbateľná z pohľadu požiadavky presnosti pre senzory ohybu.

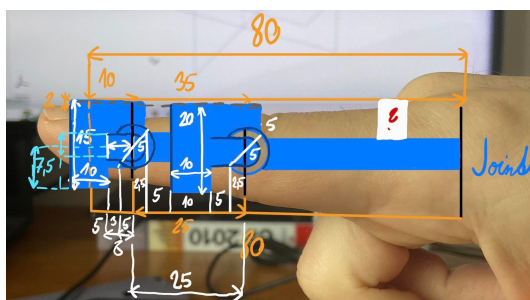
Senzory taktiež neprejavili závislosť pri rôznych rýchlostiach ohybu. Toto meranie ale nebolo vykonané pre veľký rozsah rýchlostí a bolo limitované prípravkom, ktorého mechanizmus ani neumožňoval vyššie rýchlosti ohybu ktoré by mohli nastať práve ohybom prstu.

6 Mechanický návrh exo-skeletonu rukavice

System pre snímanie bol vytvorený ako rukavica v podobe exo-skeletonu tak, ako to bolo dané požiadavkami. Pôvodne bolo navrhnutý ako jeden z prstov prostredník. Počas návrhu rukavice sa ale tento prst musel zameniť za prsteniček. Dôvod tejto zmeny bol, že dva exo-prsty vedľa seba by si kvôli svojím rozmerom navzájom prekážali. Exo-prsteniček a exo-ukazovák boli navrhnuté a vymodelované pomocou softwaru SolidWorks 2022. Taktiež bola vymodelovaná časť rukavice, ktorá slúži ako prepojenie časti hánok ruky, prstov a zápästia. V rámci tejto bakalárskej práce teda bol navrhnutý model ukazováku a prsteníku. Kvôli komplikovanosti mechaniky palca bola táto časť prevzatá z verejne dostupného modelu z [24]. Z tohto modelu bolo taktiež prebraté zápästie rukavice. V nasledujúcej podkapitole bude uvedený postup návrhu rukavice. Počas popisu návrhu rukavice budú komponenty, ktoré predstavujú prsty rukavice nazývané ako exo-prsty.

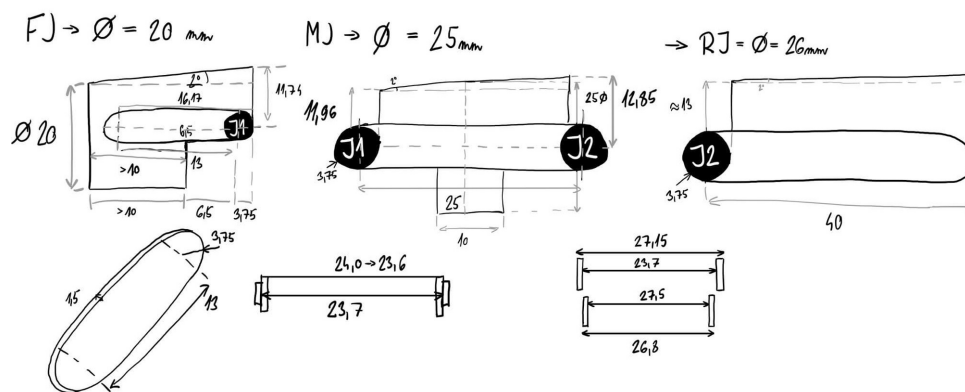
6.1 Návrh exo-prstov

Exo-prsty boli rozdelené na tri časti. Na prste ako takom sú dva kĺby a to - Proximálny interfalangeálny kĺb a Distálny interfalangeálny kĺb. Tretí kĺb ktorý je v počiatku prstu alebo teda na hánkach ruky sa nazýva metarkapofalangeálny kĺb. Jednotlivé časti boli rozdelené presne medzi tieto kĺby. V bode kde sa tieto časti spájajú bolo vytvorené ložisko, ktoré predstavuje kĺb exo-prstu. Prvotný náčrt exo-prstu bol hlavne na definovanie rozmerov dĺžok jednotlivých častí ako aj priemerov týchto častí. Priemer bol pôvodne určený pomocou zmerania obvodu jednotlivých kĺbov a prícítaniu 2mm, ako rezervu. Tento rozmer bol ale postupne upravovaný podľa výsledkov priebežnej tlačie. Tento prvotný náčrt je možné vidieť na obrázku 6.1. Rozmery sú uvádzané v jednotkách milimetrov [mm]. Následne bol vytvorený náčrt



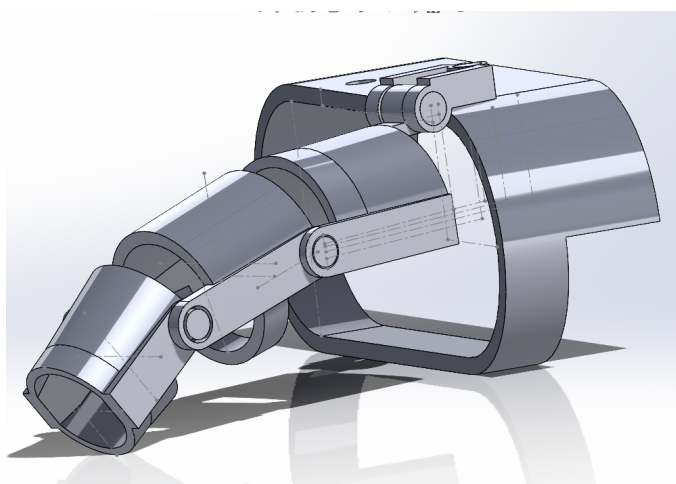
Obr. 6.1: Prvý náčrt exo-ukazováka

jednotlivých častí tak, aby boli schopné do seba rozmerovo zapadnúť a schopné kinematiky prsta ľudskej ruky. Tento náčrt je zobrazený na 6.2. Obrázky sú uvedené len



Obr. 6.2: Druhý náčrt exo-ukazováka

pre exo-ukazovák, no rovnakým spôsobom bol navrhnutý aj exo-prsteník. Následne boli prvé dve časti vymodelované v SolidWorks 2022. Pri modelovaní poslednej časti, ktorá má spájať exo-prsty so zvyškom rukavice bolo nutné zvážiť, akým spôsobom zabezpečiť dva stupne volnosti, ktoré metarkapofalangeálny kĺb zabezpečuje. Prvý navrhnutý spôsob bol použiť guľový kĺb ktorý by bol čiastočne zapúzdený v časti hánok exo-rukavice. Od tohto návrhu sa ale upustilo, pretože bol náročný na 3D tlač. Ďalším návrhom bolo použiť dva zložené kĺby, resp. dvojkĺb. Dvojkĺb bol zložený z dvoch kĺbov kedy jeden umožňoval voľnosť pohybu smerom hore/dole a druhý vľavo/vpravo. Tento návrh sa po vymodelovaní najskôr overil pomocou SolidWorks Assembly. Jednalo sa o overenie, či sú exo-prsty schopné kinematiky prsta ľudskej ruky a či jednotlivé komponenty do seba zapadajú. Na obrázku 6.3 je možné vidieť simuláciu ohybu exo-ukazováku a zároveň orientácií do strany.



Obr. 6.3: Simulácia dvojkĺbu

6.2 Model rukavice

Zvyšná časť rukavice bola upravená tak aby bola kompatibilná s exo-palcem a zápästím ktoré bolo prebraté z [24], a následne vytlačená na 3D tlačiarňi. Prvý model reálnej rukavice je možné vidieť na obrázku 6.4. Model mal kvôli dvojkĺbu pevnú väzbu prstov s časťou dlaňe, čo bolo pôvodne aj jedným s cieľov návrhu. Problém ale vznikol kvôli spojeniu dvoch jemne odlišných modelov. Exo-palec z [24] nebol navrhnutý na rovnakú ruku ako exo-prsty popisované v predošlej podkapitole. Exo-palec mal väčšiu vôľu, čo síce je výhodné pri zovretí, ale miestami dochádzalo k tomu, že po návrate prstov zo zovretia do plne vystretej polohy sa táto vôľa prejavila tým, že jeden z kĺbov exo-palca sa nenastavil presne podľa ľudského prstu a spôsobil jemný sklz smerom dopredu. Tento kĺb je označený na obrázku 6.4a. Aby k tomuto nedochádzalo sa musela rukavica natlačiť hlbšie do ruky a na to nesedel pôvodne navrhnutý exo-ukazovák a exo-prsteník. Tie boli pri ohybe prstu od určitého uhlu vtlačané do ruky. Tento problém nenastával vždy, no aj napriek tomu bolo zvažované riešenie problému. Jedným z riešení by bolo predĺženie kostry ktorá spája všetky časti a umiestnenie kĺbu ktorý spôsoboval sklz do väčšej vzdialenosti od exo-prstov. Druhý návrh bolo zamenenie dvojkĺbu za voľnú väzbu exo-ukazováku a exo-prsteníku pomocou šnúrky. Toto by umožnilo väčšej voľnosti v nasadení rukavice a zároveň by zabezpečilo všetky stupne voľnosti pre exo-prsty, ktoré ľudský prst má. Tento model je možné vidieť na 6.5



(a) Zovreté prsty



(b) Otvorené prsty

Obr. 6.4: Model rukavice s pevným kĺbom



(a) Zovreté prsty



(b) Otvorené prsty

Obr. 6.5: Model rukavice s voľným kĺbom

7 Realizácia systému snímania polohy prstov ľudskej ruky

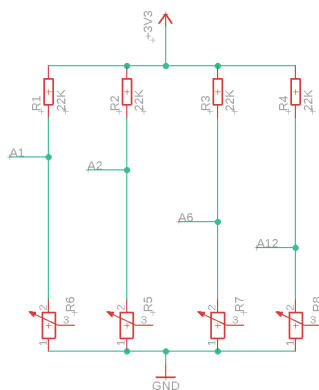
Cielom tejto kapitoly je popis realizácie systému na základe návrhu a postupu popísanom v predošlých kapitolách. Systém je možné rozdeliť na hardwarovú časť a firmwarovú časť. V časti hardwaru bude popísaný napäťový delič. Vo firmwarovej časti budú popísané knižnice, ktoré zabezpečujú ovládanie periférií mikrokontroléru a spracovanie výstupu senzorov.

7.1 Hardwarová časť systému

V tejto časti bude popísaný napäťový delič, ktorý je použitý pre spracovanie výstupu senzorov ohybu. Schéma zapojenia systému je v prílohe bakalárskej práce (viz. B.1)

7.1.1 Delič napätia

V predošlých krokoch boli navrhnuté pre snímanie ohybu prstov senzory od spoločnosti Spectra Symbol. Tieto senzory boli popísané v podkapitole 2.1.1 a celá kapitola 5 sa venuje meraniu charakteristík týchto senzorov. Aby bolo možné spracovať výstup týchto senzorov pomocou mikrokontroléru bolo navrhnuté použiť jeden napäťový delič pre snímanie ukazováku a jeden pre snímanie prsteníka. Pre snímanie palca boli navrhnuté dva napäťové deliče. Palec je snímaný dvomi senzormi ohybu aby bolo možné snímať jeho zovretie do vnútra dlane a je teda nutné použiť dva senzory ohybu. Schému deliča napätia je možné vidieť na obrázku 7.1



Obr. 7.1: Delič napätia

Senzor 1	Senzor 2	Senzor 3
ΔU_{MIN} [V]		
0.0180	0.0154	0.0207

Tab. 7.1: Minimálna zmena hodnoty napätia pri ohybe o 5°

Citlivosť merania

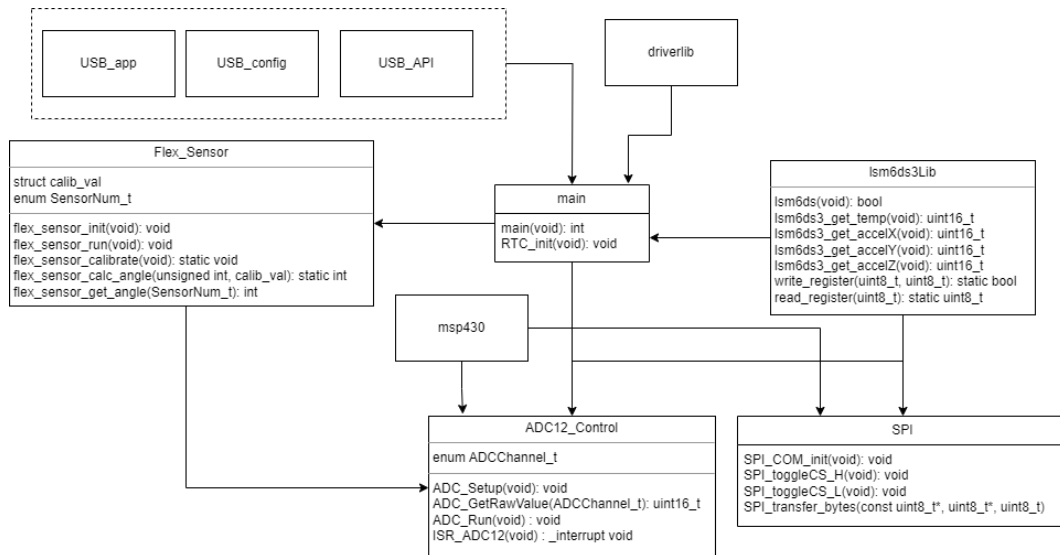
Delič napätia bol navrhnutý s hodnotami referenčných odporov $R_{ref} = 22K\Omega$. Toto sú približne rovnaké hodnoty ako majú senzory ohybu od spoločnosti Spectra Symbol vo vyrovnanom stave. Delič by bol teda v tomto stave vyvážený. Aby bolo overené, že takto navrhnutý delič napätia dokáže pri ohybe prstu o 5° priviesť na vstup A/D prevodníku dostatočnú zmenu vstupného napätia bola najskôr zistená citlivosť 12-bitového A/D prevodníku pomocou prepočtu (7.1). Rozdelením napätia 3.3V na 2^{12} hodnôt je získaný jeden dielik digitálnej hodnoty výstupu prevodníku. Toto je teda minimálny rozdiel vstupného napätia, ktorý spôsobí na výstupe prevodníku zmenu hodnoty a jedná sa o citlivosť 12-bitového A/D prevodníku. Citlivosť je $0.000805 \text{ V} = 0.805 \text{ mV}$. Prepočtom hodnôt, získaných zo zmeranej charakteristiky 5.6 v kapitole 5, pomocou (7.2) bola vypočítaná tabuľka hodnôt napätia na senzorech ohybu. Následne bola zistená zmena napätia ΔU na senzore ohybu pri ohybe $\Delta\phi = 5^\circ$. V tabuľke C.2, ktorá je uvedená v prílohe, je možné vidieť hodnoty ΔU pri zmene $\Delta\phi$ celým rozsahom 0° - 90° . Podstatným údajom bola ale najmenšia ΔU . Pre jednotlivé senzory je táto hodnota uvedená v tabuľke 7.1. Porovnaním týchto minimálnych zmien výstupu deliča napätia s hodnotou 0.805 mV teda vyplýva, že takto zvolené hodnoty referenčných odporov budú vyhovovať pre navrhnutý systém snímania polohy prstov ľudskej ruky.

$$\text{Citlivosť} = \frac{U_{ref}}{2^N} = \frac{3.3}{4096} = 0.000805 \text{ V}/\text{LSB} = 0.805 \text{ mV}/\text{LSB} \quad (7.1)$$

$$U_{senzor} = U_{ref} \cdot \frac{R_{senzor}}{R_{senzor} + R_{ref}} \quad [\text{V}] \quad (7.2)$$

7.2 Firmwarová časť systému

V tejto časti budú popísané programové knižnice potrebné na obsluhu periférií mikrokontroléru, alebo na spracovanie dát potrebných pre získanie uhlov prstov ľudskej ruky. Firmware systému bol implementovaný v programovacom jazyku C, vo vývojovom prostredí Code Composer Studio 12.0.0, od spoločnosti Texas Instruments. Celý firmware systému popisuje aj UML diagram na obrázku 7.2.



Obr. 7.2: UML diagram firmwaru systému

7.2.1 Ovládanie periférií mikrokontroléru MSP430

V tejto sekcii bude popísaná časť systému, ktorá má za úlohu ovládanie periférií mikrokontroléru MSP430. V prvom kroku bude popísaná knižnica, ktorá ovláda A/D prevodník. V druhom kroku bude popísaná knižnica zabezpečujúca komunikáciu senzoru lsm6ds3, a MSP430 pomocou protokolu SPI.

Knižnica ADC12_Control

Pomocou modulu mikrokontroléru ADC12_A systém dokáže merať napätie na senzore ohybun zapojenom v deliči napätia. Aby bolo možné modul nastaviť a čítať hodnoty na vstupe, bola vytvorená táto knižnica. Na nastavenie A/D prevodníka bola implementovaná funkcia `ADC12_Setup`. Táto funkcia nastaví zvolené porty na vstupe periférie A/D prevodníku a prevodník nastaví nasledovne:

- 16 clk cyklov pre jednu vzorkovaciu periódu (sample and hold time),
- povolenie viac kanálovej konverzie,
- opakovaná konverzia kanálov (sequence mode),
- vzorkovací časovač ako zdroj pre `SAMPCON` clk,
- vstupný multiplexor pre zvolené vstupy A/D prevodníku,
- povolenie rutiny prerušenia,

Funkcia taktiež lokálne povoluje ISR. Táto rutina má za funkciu prečítať a uložiť hodnoty A/D prevodu do poľa hodnôt `ADC_Values`. Toto pole je statické a pre získanie hodnôt ktoré doňho boli zapísané pri ISR, bola vytvorená funkcia `ADC_GetRawValue`. Funkcia `ADC_Run` zapína nastavený prevodník a povoľuje konverziu.

Knižnica SPI

Túto knižnicu bolo potrebné vytvoriť pre zabezpečenie komunikácie s IMU senzorom lsm6ds3. Implementácia prebiehala s pomocou knižnice `driverlib`, od spoločnosti Texas Instruments. Pre nastavenie periférie USCI (Universal Serial Communication Interface – Univerzálne sériové komunikačné rozhranie) v SPI móde, bola implementovaná funkcia `SPI_COM_init`. Odosielanie správ po zbernici SPI zabezpečuje funkcia `SPI_transfer_bytes`. Jedná sa o komunikáciu Master/Slave v 3-wire (trojvodičovom) móde. Komunikáciu a prenos dát zahajuje mikrokontrolér, akožto Master, pomocou funkcie `SPI_toggleCS_L`. Táto funkcia nastaví výstup mikrokontroléru, ktorý je pripojený na vstupe CS lsm6ds3 do stavu 0. Na ukončenie prenosu dát je použitá funkcia `SPI_toggleCS_H`, ktorá privedie CS do stavu 1.

7.2.2 Knižnice pre spracovanie senzorov systému

Pre obidva typy senzorov používaných v systéme snímania prstov ľudskej ruky bola vytvorená knižnica, ktorá obsahuje funkcie na spracovanie dát a nastavenie. V nasledujúcich častiach budú stručne popísané funkcie implementované v týchto knižniciach.

Knižnica `Flex_Sensor`

Pre počiatočné nastavenie senzorov ohybu bola implementovaná funkcia `flex_sensor_init`. Funkcia nastavuje tlačítko P1.1 mikrokontroléru pre možnosť spustenia kalibrácie, príp. rekalibrácie. Stlačením tohto tlačítka sa zavolá rutina prerušenia `ISR_Calibrate`, ktorá nastavuje príznakové premenné `start_measurements` a `start_calibration`. Premenná `start_calibration` tvorí podmienku pre začatie kalibrácie, vtedy je zakázané meranie, v statickej funkcii `flex_sensor_calibrate`. Po začatí kalibrácie sa hľadá maximálna a minimálna hodnota na výstupe prevodníku. Tieto hodnoty sa počas kalibrácie ukladajú pre každý senzor zvlášť, a ukladajú sa do premennej typu štruktúry `calib_val`. Pre ukončenie kalibrácie sa opäť zavolá ISR, ktoré vypne kalibráciu, a pomocou príznaku `start_measurements` povolí podmienku pre meranie uhlov na jednotlivých, skalibrovaných senzoroach. Meranie zabezpečuje statická funkcia `flex_sensor_calc_angle`. Keďže sa jedná o statickú funkciu a nebolo by možné volať ju v iných moduloch, ako napríklad `main`, bola vytvorená funkcia `flex_sensor_get_angle`. Poslednou funkciou knižnice je `flex_sensor_run`. Táto funkcia zabezpečuje čítanie výstupu A/D prevodníku volaním `ADC_GetRawValue` (viz. 7.2.1), a volanie kalibračnej funkcie.

Knižnica lsm6ds3Lib

Aby bolo možné nastavenie a čítanie dát senzoru lsm6ds3, bola použitá funkcia `SPI_transfer_bytes` (viz. 7.2.1). Funkciou `lsm6ds3_init` je najskôr identifikovaný modul, a následne sú vykonané potrebné nastavenia. Pre nastavenie registrov lsm6ds3 bola implementovaná funkcia `write_register`, ktorá posiela dáta na zbernicu SPI. Pre čítanie výstupov senzoru lsm6ds3 bola implementovaná funkcia `read_register`, ktorá číta zbernicu SPI. Implementácia tejto funkcie bola potrebná pre funkcie `lsm6ds3_get_accelX`, `lsm6ds3_get_accelY`, `lsm6ds3_get_accelZ`. Tieto funkcie zabezpečujú získanie akcelerácia v osách x,y,z. V rámci tejto knižnice bola implementovaná aj funkcia `lsm6ds3_get_temp` pre získanie teploty. Táto funkcia ale nakoniec nebola využitá vo výslednom systéme.

8 Použitie systému pre snímanie polohy prstov ľudskej ruky

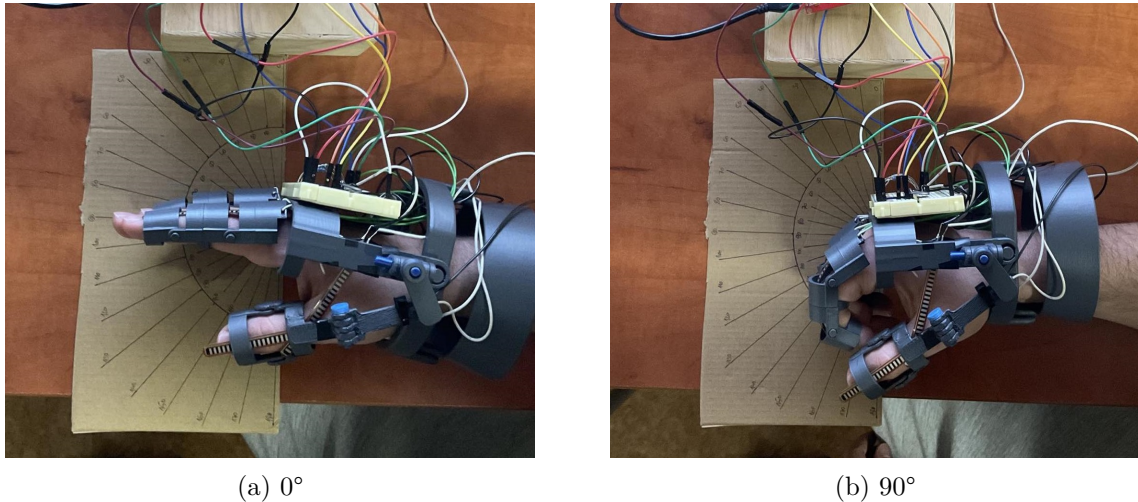
Táto kapitola sa bude zaoberať praktickým použitím realizovaného systému snímania ohybu prstov ľudskej ruky. Pre použitie bola navrhnutá úloha snímania ohybu prstov, ktorá bude popísaná v prvej časti tejto kapitoly. Ďalej bude popísaný proces snímania ohybu prstov v uhloch ϕ [°].

8.1 Návrh merania ohybu prstov ľudskej ruky

Pre otestovanie presnosti merania ohybu pomocou realizovaného systému bolo nutné mať počas celého merania definované uhly v ktorých sa snímané prsty približne nachádzajú. Uhly boli definované pomocou uhlomeru na tvrdom papieri. Rozsah merania bol 0°-90°. Meranie spočívalo v postupnom ohýbaní prstov z 90° na 180°. Meranie bolo rozdelené do dvoch bodov. V prvom bode bol meraný ohyb prstov ukazováku a prsteníku. Ohyb palca bol meraný zvlášť v druhom bode merania.

8.2 Kalibrácia senzorov

Pred začatím merania bolo nutné senzory ohybu skalibrovať. Kalibrácia bola spustená pomocou tlačítka P1.1, ktoré ako už bolo popísané v 7.2.2, zavolá ISR ktoré nastaví príznak pre povolenie kalibrácie, zároveň zakáže merania. Kalibrácia spočíva v hľadaní maximálnej a minimálnej hodnoty z výstupu A/D prevodníku pre príslušný senzor. Toto hľadanie sa vykonáva postupným ohybom senzoru zo stavu 0° až po ohyb, ktorý predstavuje 90°. Pre toto meranie sa senzory kalibrovali podľa makety s vyznačenými uhlami. Kalibrácia začala v bode 90° makety, to predstavuje minimum a pre systém teda 0°. Konečná poloha prstov na makete bola v bode 180°, to pre systém predstavuje 90°. Kalibrácia senzorov ohybu je nutná vždy práve v rozsahu 0°-90°, inak by systém nemusel udávať reálne uhly. Kalibráciu senzorov pre snímanie ukazováku a prsteníku je možné vidieť na obrázku 8.1. Hodnoty nakalibrovaných senzorov je možné vidieť v tabuľke 8.1, tieto kalibračné hodnoty boli získané počas prvého merania v sekcii 8.3. Senzor smínajúci zovretie palca nebol dostatočne kalibrovaný. Toto bolo z dôvodu jeho umiestnenia na konštrukcii exo-skeletonu. Pri ohybe palca počas kalibrácie tento senzor nie je ohýbaný dostatočne na to, aby sa správne kalibroval. Z tohto dôvodu nebude uvedený vo výsledkoch snímania a nájdenie lepšieho miesta na rukavici bude predmetom budúcich vylepšení.



Obr. 8.1: Kalibrácia senzorov

	ukazovák	prsteniček	palec	zovretie
ADC_{max}	2784	2880	3272	2647
ADC_{min}	2206	2275	2623	2494

Tab. 8.1: Príklad kalibračných hodnôt senzorov ohybu

8.3 Meranie ohybu prstov ľudskej ruky

Po ukončení kalibrácie bolo opäť stlačené tlačítko pre volanie ISR, ktoré pomocou príznakov zakáže kalibráciu a povolí počítanie uhlov zo získaných výstupov A/D prevodníku. Systém prepočítava výstupy prevodníku na uhly rovnicou (8.1), kde ADC_{raw} predstavuje aktuálny výsledok A/D prevodu, ADC_{max} , ADC_{min} sú hodnoty získané kalibráciou. Rovnica (8.1) bola určená na základe znalosti prevodnej charakteristiky senzorov, získanej v kapitole 5.2.

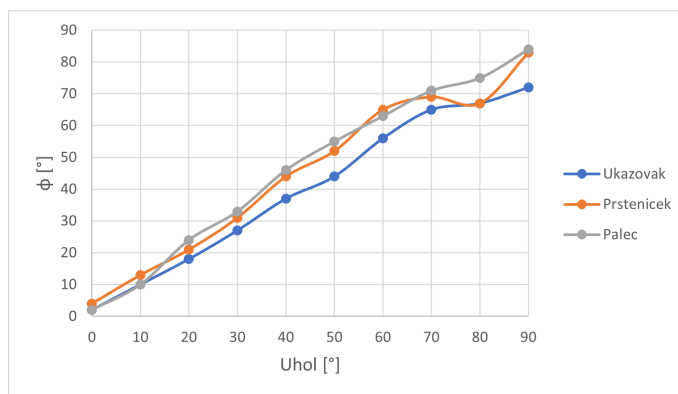
$$\phi = 90 \cdot \frac{ADC_{raw} - ADC_{min}}{ADC_{max} - ADC_{min}} \quad [^\circ] \quad (8.1)$$

8.4 Výsledky merania ohybu prstov

Táto sekcia je rozdelená na dve časti, ktoré popisujú prvé meranie, meranie s testovacou rukavicou, a druhé meranie s použitím výslednej rukavice.

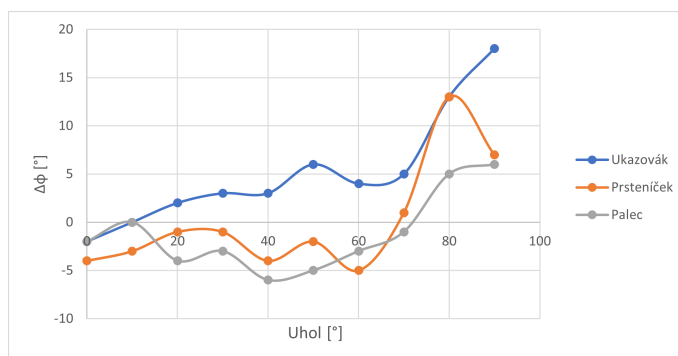
8.4.1 Výsledok prvého merania

Výsledky prvého merania prsteníku a ukazováku sú v tabuľke D.1, alebo na obrázku 8.2. Prvé meranie bolo vykonané iba raz z dôvodu testovania schopnosti rukavice.



Obr. 8.2: Graf prvého merania ohybu prstov

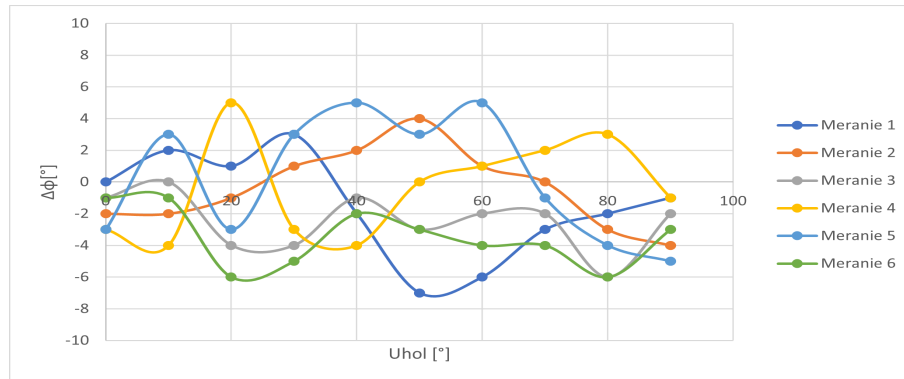
Počas merania došlo k vyvlečení senzorov ukazováku a prsteníku, z toho dôvodu bolo navrhnuté riešenie, ktoré používa flexibilny kus látky na zapúzdenie senzorov v exo-prstoch. Toto riešenie je použité v druhej verzii rukavice. Z nameraných výsledkov bola následne určená chyba merania systému čo je možné vidieť v tabuľke D.2, alebo grafe 8.3.



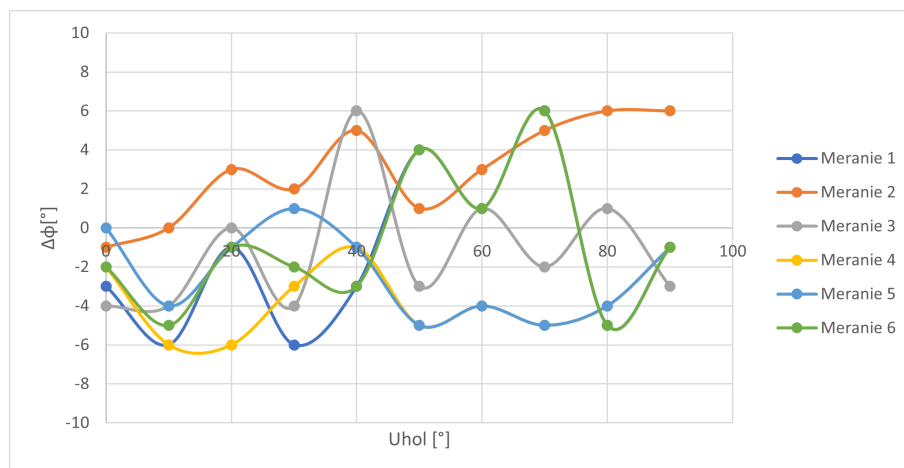
Obr. 8.3: Graf rozdielov výstupu systému od skutočných hodnôt prvého merania

8.4.2 Výsledok druhého merania

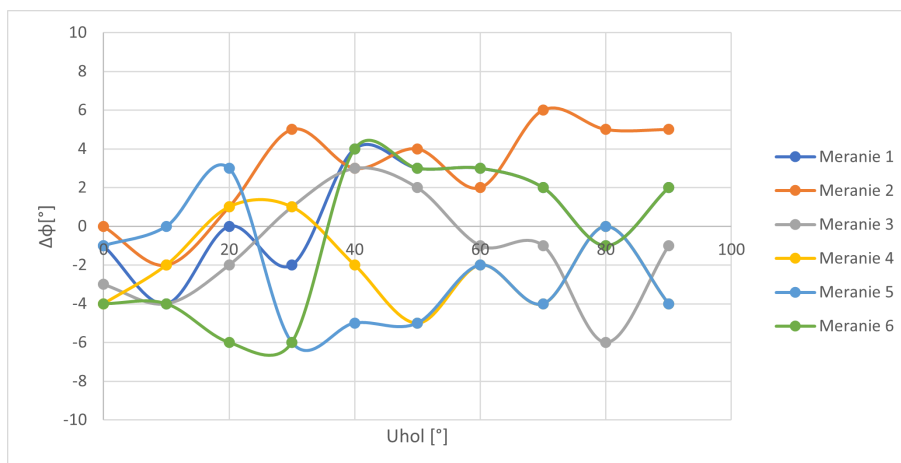
V prípade použitia upravenej rukavice nedochádzalo k vyvlečeniu senzorov pri vyššom ohybe. Vykonaných bolo šesť meraní pre každý prst. Výsledné tabuľky D.3, D.4, D.7 zmeraných hodnôt je možné vidieť v prílohe práce. Z nameraných hodnôt boli spočítané chyby meraní a tie je taktiež možné vidieť v prílohe (viz D.5, D.6, D.8).



Obr. 8.4: Chyba merania pomocou výslednej rukavice - Palec



Obr. 8.5: Chyba merania pomocou výslednej rukavice - Ukazovák



Obr. 8.6: Chyba merania pomocou výslednej rukavice - Prsteník

8.5 Zhodnotenie presnosti systému snímania polohy prstov

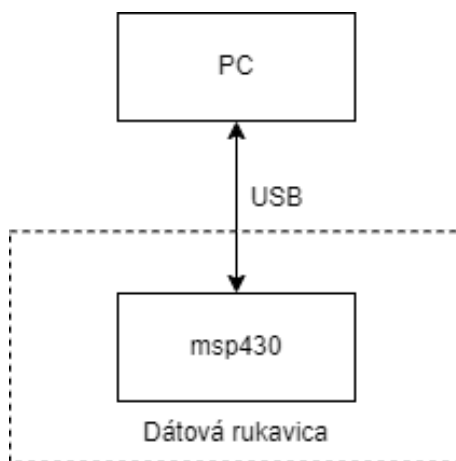
Z priebehu prvého merania ukazováku a prsteníku navrhnutým systémom je možné vidieť, že do uhlu 80° systém spĺňal požadovanú presnosť 10°. Po dosiahnutí 80° ale došlo k vyvlieknutiu sensorov z článkov exo-prstov (viz E.1). Toto poukazuje aj na to, že k vyvlieknutiu nedôjde vždy pri tomto ohybe. K vyvlieknutiu napríklad nemohlo dôjsť počas kalibrácie, inak by systém nerozpoznal že k vyvlieknutiu došlo počas merania, jedná sa teda o chybu konštrukcie článkov exo-prstov. K tomuto ale nedošlo v prípade palca, ktorého poloha bola snímaná v rámci požadovanej presnosti 10°. V druhej časti merania bola odstránená chyba s vyvliekaním sensorov. Z grafov 8.4, 8.6, 8.5 je možné vidieť, že systém ani raz nepredstavoval vyššiu nepresnosť než je 6°. Záverom teda je, že navrhnutý a realizovaný systém spĺňa požiadavku na presnosť snímania prstov, ktorá bola definovaná na 10°.

9 Demonštrácia použitia systému snímania polohy prstov ľudskej ruky

V tejto kapitole bude popísaná PC aplikácia DataGloveAppCmd, ktorá slúži ako demonštrácia použitia systému snímania polohy prstov, ktorý bol realizovaný ako dátová rukavica. Aplikácia spoločne s video demonštráciou použitia je súčasťou elektronickej prílohy k bakalárskej práci.

9.1 Softwarová aplikácia DataGloveAppCmd

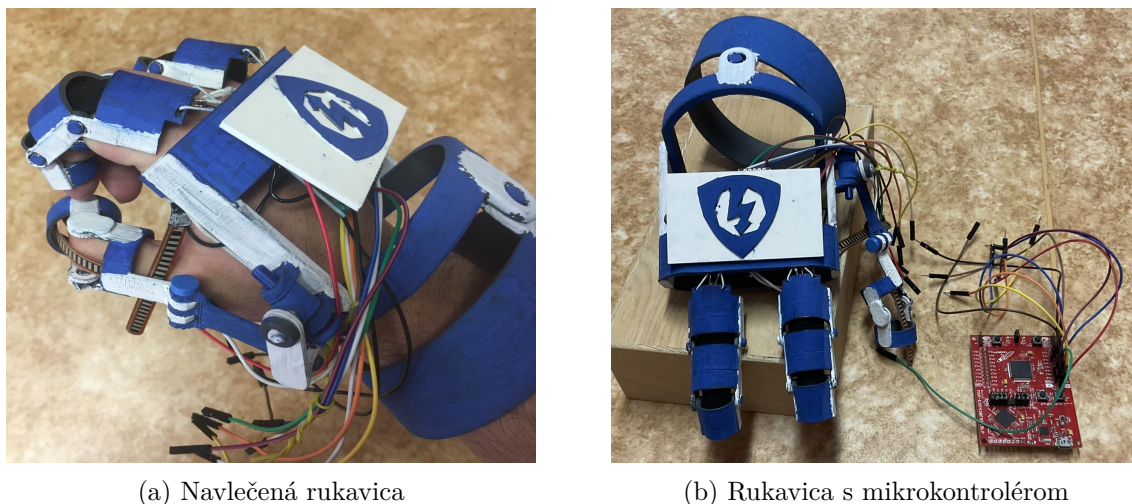
Aplikácia bola implementovaná pomocou programovacieho jazyka C++. Pre implementáciu bola využitá knižnica hidapi[25] s dostupným príkladom, ktorý bol následne upravený pre túto úlohu. PC a systém komunikuje pomocou zbernice USB (viz 9.1). Aplikácia ako prvé otvorí USB zariadenie a popíše pomocou deskriptora, ktorý je definovaný vo firmwari systému. Systém posiela požiadavok každých 100ms. Tvár správy v ktorom sú zahrnuté namerané dáta pomocou systému je $\langle \text{uhol}, \text{uhol}, \text{uhol}, \text{uhol}, x, y, z \rangle$. Systém teda do aplikácie posiela aj namerané dáta z akcelerometru lsm6ds3. Výstup akcelerometru posiela aplikáciou je gravitačné zrýchlenie ľudskej ruky v jednotkách mG. Aplikácia po spustení, vypíše popis zariadenia a následne cyklicky vypisuje aktuálne poslané dáta od systému do príkazového riadku. Príklad spustenej aplikácie je vidieť na obrázku E.2. V elektronickej prílohe je možné nájsť video s demonštráciou aplikácie.



Obr. 9.1: Komunikácia dátovej rukavice a aplikácie

10 Výsledky bakalárskej práce

V tejto časti bude uvedené krátke porovnanie s dátovou rukavicou od spoločnosti Manus, spomínanej v kapitole 3.3. Výsledná podoba dátovej rukavice je zobrazená na obrázku 10.1.



Obr. 10.1: Výsledná podoba dátovej rukavice

10.1 Porovnanie realizovaného systému s Manus VR rukavicou

Rukavica realizovaná v tejto bakalárskej práci a rukavica Manus VR používajú flexibilné analógové senzory pre snímanie ohybu prstov. Rozdiel je v snímaných kĺboch. Zatiaľ čo dátová rukavica realizovaná v tejto práci sníma ohyb v strednom a prednom kĺbe, rukavica Manus VR sníma hánkový kĺb a stredný kĺb. Presnosť Manus VR je $\pm 3^\circ$. Na základe jednoduchého merania presnosti realizovanej rukavice sa nedá jednoznačne určiť presnosť, no podľa uskutočneného merania nespĺňa presnosť ako Manus VR. V realizovanej rukavici bol pokus o snímanie orientácie, resp. zovretie palca. Tento pokus nebol úspešný, pretože bol použitý senzor ohybu, ktorému nebola nájdená dostatočne vhodná pozícia aby ho bolo možné správne kalibrovať, a aby bol schopný ohybu definovaného zovretím palca. Snímanie orientácie palca bude ďalším cieľom do budúcnosti. Manus VR toto snímanie zabezpečilo pomocou IMU senzoru s presnosťou $\pm 3^\circ$. Podľa technickej dokumentácie senzorov od spoločnosti Spectra Symbol je opakovateľnosť použitia senzorov viac než 1 000 000. Toto isté platí aj pre rukavicu Manus VR.

Záver

Predložená bakalárska práca sa zaoberala návrhom a realizáciou systému snímania polohy prstov ľudskej ruky. Na začiatku sa práca venuje teoretickému rešeršu. V tejto časti práca poskytuje náhľad do problematiky snímania polohy prstov ľudskej ruky. V tejto časti sú popísané metódy a princípy, ktoré sa pre snímanie používajú. Následne sú v práci popísané aj komerčne dostupné riešenia

So získaním väčšieho prehľadu v problematike začal návrh požiadavok na systém. Z týchto požiadaviek boli následne navrhnuté komponenty pre systém. Systém bol realizovaný ako dátová rukavica v podobe exoskeletonu. V tejto časti sa taktiež určitý čas práce venoval vytvoreniu senzorov ohybu, ktoré by predstavoval lacnejšiu náhradu navrhovaných senzorov. Z časových dôvodov bolo ale upustené od tohto návrhu a pre realizáciu snímania boli zvolené senzory ohybu od spoločnosti Spectra Symbol. Vytvorenie vlastných senzorov ohybu môže byť ale témou budúcej práce.

Pre zvolené senzory ohybu, boli v rámci bakalárskej práce navrhnuté merania, kvôli zisteniu, či je možné pomocou týchto senzorov dosiahnuť požadované výsledky. Tomuto sa v rámci práce venoval podstatný čas pretože bolo nutné určiť potrebné charakteristiky a taktiež navrhnuť jednotlivé merania, ktoré boli následne uskutočnené. V tejto časti bola premeraná prechodová charakteristika senzorov, ktorá ukázala ich lineárny charakter a určila chybu merania, ktorej najvyššia hodnota bola 8° . Toto stále splňuje požiadavku presnosti snímania ohybu na 10° . Ďalej bola zmeraná teplotná závislosť. Táto závislosť bola dôležitá pre možný návrh kompenzácie ak by na senzory mala vplyv teplota ľudskej pokožky. Teplotná závislosť sa na výstupe senzorov prejavila ani nie rozdielom $1K\Omega$, okrem jedného z troch senzorov, ktorého hodnota odporu sa zmenila o $1.46K\Omega$, čo je pri použití senzorov s hodnotou v rádoch desiatok $K\Omega$. Ďalej bola zmeraná závislosť rýchlosti ohybu a opakovateľnosť výstupu pri rovnakých uhloch. Rýchlosť ohybu nemala vplyv na hodnotu senzorov. Pri meraní opakovateľnosti bola maximálna odchylka o $4.16K\Omega$, čo na prepočet predstavuje približne 5° . To stále vyhovuje požiadavke na presnosť. Počas následujúceho priebehu sa ukázalo, ako veľmi podstatným bodom, práce bolo zmeranie prechodovej charakteristiky. Hodnoty z tohto merania boli podstatné napríklad pri realizácii deliču napätia, alebo výpočtu hodnôt prevodníku na uhly.

Po určení komponentov systému sa prešlo na realizáciu systému. Kvôli nedostatku času sa do práce nepodarilo zakomponovať snímanie uhlovej rýchlosti pomocou gyroskopu IMU senzoru lsm6ds3. Taktiež výsledný systém nie je bezdrôtovým zariadením a je napájaný pomocou USB. Tieto nedostatky, ale budú súčasťou budúcej práce. Pre systém bol navrhnutý a realizovaný exoskeleton. V rámci práce bolo navrhnuté snímanie palca, ukazováku a prostredníku. Počas vytvárania exoskeletonu bolo ale nutné zmeniť prostredník na prsteník. Toto bolo spôsobené šírkou exoprstov a s ná-

vrhom, aký bol použitý v tejto práci, by si dva vedľajšie prsty prekážali v pohybe, čo by malo za následok nepresnosť merania. Kvôli komplikovanosti kinematiky palca bol pre realizovaný exoskeleton prebratý už existujúci model. V rámci práce boli realizované dva modely exorukavice. Jeden používal na spojenie ukazováku a prste níku dvojklb, druhý šnúru. Pre výsledný systém bol použitý model so šnúrkou. V kapitole návrhu exoskeletonu je bližšie rozobraný dôvod.

Po úspešnom realizovaní exoskeletonu boli zakomponované aj zvyšné časti systému. Veľkú časť tejto bakalárskej práce tvorí firmware systému, ktorý beží na mikrokontroléry msp430f5529. V rámci firmwaru boli implementované štyri rôzne knižnice potrebné pre funkčnosť tohto systému. Systém bol najskôr realizovaný ako testovacia rukavica. Po prvom meraní, kedy systém do určitého ohybu prsteníka a ukazováku, predstavoval požadovanú presnosť, sa ale ukázal nedostatok rukavice. Sensory sa počas merania väčších ohybov, okolo 80° , mohli vyvlieknúť z článkov prsta a spôsobiť chybu merania. Vo výslednom modeli je ale tento nedostatok odstránený. Riešenie spočívalo v nalepení jemne elastickej látky z vnútornej strany článkov. Takto senzory ostali zapúzdrené. Výsledkom práce je teda systém snímania polohy prstov s požadovanou presnosťou snímania na 10° , v rozsahu 0° - 90° . Systém taktiež dokáže posielat zmerané uhly a zrýchlenie ruky, zmerané akcelerometrom, po zbernici USB do PC. Na záver bola implementovaná aplikácia, ktorá prijíma dáta z rukavice a vypisuje ich na príkazový riadok. Táto aplikácia vytvorila priestor pre možnosť implementácie ďalších grafických aplikácií, napríklad pre preklad znakovkej reči.

Literatúra

- [1] EVERETT, H.R. *Sensors for Mobile Robots theory and application*. 1. New York: CRC Press, 1995. ISBN 1568810482.
- [2] VIRIUS, Miroslav. *Jazyky C a C++: kompletní průvodce*. 2., aktualiz. vyd. Praha: Grada, 2011. Knihovna programátora (Grada). ISBN 978-802-4739-175.
- [3] DESAI, Smit a Apurva DESAI. Human Computer Interaction Through Hand Gestures for Home Automation Using Microsoft Kinect. *Proceedings of International Conference on Communication and Network*. 2017. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-10-2750-5_3
- [4] ZULPUKHARKYZY, Zholshiyeva, Lazzat ZHUKABAYEVA, Tamara SHERZOD, Turaev SHERZOD, Berdiyeva AIMAMBETOVNA, Meruyert JAMBULOVA, Tokhtasynovna JAMBULOVA a Dina. Hand Gesture Recognition Methods and Applications: A Literature Survey. *The 7th International Conference on Engineering*. MIS, 2021, (11), 1-8. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1145/3492547.3492578
- [5] PICHETA, Rob. *This new high-tech glove translates sign language into speech in real time* [online]. In: . CNN [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://edition.cnn.com/2020/06/30/health/sign-language-glove-ucla-scen-scli-intl/index.html
- [6] XIAOSHI, Chen. A Wearable Hand Rehabilitation System With Soft Gloves. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021, 943-952.
- [7] Physiostore Robotic Hand Syrebo Hand rehabilitation Glove C11 ROBOTIC GLOVE-ADULT (Medium, Left). In: *Amazon.in* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.amazon.in/Physiostore-Robotic-rehabilitation-ROBOTIC-GLOVE-ADULT/dp/B0B69LL1MK
- [8] *Interfacing Flex Sensor with Arduino* [online]. LastMinuteEngineers [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://lastminuteengineers.com/flex-sensor-arduino-tutorial/
- [9] Hsiao, P., Yang, S., Lin, B., Lee, I. & Chou, W. Data glove embedded with 9-axis IMU and force sensing sensors for evaluation of hand function. *2015 37th Annual International Conference Of The IEEE Engineering In Medicine And Biology Society (EMBC)*. pp. 4631-4634 (2015)

- [10] PATEL, C a P MCCLUSKEY. Modeling and simulation of the MEMS vibratory gyroscope. *13th InterSociety Conference On Thermal And Thermomechanical Phenomena In Electronic Systems*. pp. 928-933 (2012). 2012, 928-933.
- [11] REN, Zhou, Jungjing MENG a Yuan JUNGSON. *Depth camera based hand gesture recognition and its applications in Human-Computer-Interaction*. 2011.
- [12] ZHU, Yanmin, Yan ZHU, Zhibo BO a Yuan BO. Vision based hand gesture recognition. *2013 International Conference on Service Sciences (ICSS)*. IEEE, 2013, 260-265.
- [13] LUGARESI, TANG, NASH II. a MCCLANAHAN. *MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines* [online]. arXiv [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.48550/arxiv.1906.08172>
- [14] Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C., Yong, M., Lee, J., Chang, W., Hua, W., Georg, M. & Grundmann, M. MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines. (arXiv,2019), <https://arxiv.org/abs/1906.08172>
- [15] ZHANG, BAZAREVSKY, VAKUNOV, TKACHENKA, SUNG, CHANG a GRUNDMANN. *MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking*. arXiv, 2020. Dostupné z: doi:10.48550/ARXIV.2006.10214
- [16] WATANABE, IWAI, YAGI a YACHIDA. Gesture recognition by using colored gloves. *1996 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Information Intelligence and Systems (Cat. No.96CH35929)*. 76-81. Dostupné z: doi:10.1109/ICSMC.1996.569743
- [17] LOGIE, Jamie. Why Was the Nintendo Power Glove a Failure?. *Back in Time* [online]. 2020, **2020**, 1 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://medium.com/everything-80s/why-was-the-nintendo-power-glove-a-failure-fe477dcc6593>
- [18] Han, J., Shao, L., Xu, D. & Shotton, J. Enhanced Computer Vision With Microsoft Kinect Sensor: A Review. *IEEE Transactions On Cybernetics*. **43**, 1318-1334 (2013)
- [19] *MANUS Prime X Haptic VR* [online]. In: . Bestware [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://bestware.com/en/manus-prime-x-haptic-vr.html>
- [20] Flex Sensor - Senses Bending and Displacement. *NewbieHack.com*. PHD Robotics, LLC. dba, 2020.

- [21] *Flex Sensor 2.2"* [online]. In: . Sparkfun [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/10264>
- [22] *Akcelerometr a senzor gyroskopu OKY3259-5* [online]. In: . [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.ropere.com/cs/p/akcelerometr-a-senzor-gyroskopu-oky3259-5>
- [23] MSP-EXP430F5529LP. In: *Farnell.com* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://cz.farnell.com/texas-instruments/msp-exp430f5529lp/usb-launchpad-evaluation-kit/dp/3126119?gclid=CjwKCAjw36GjBhAkEiwAKwIWYXKsm_AvTvRnJZ4cb7v_0eX4F9890193361835|&CMP=KNC-GCZ-GEN-SHOPPING-PLA&gross_price=true&gad=1
- [24] *Exo-Suit (Part 3: Gauntlets)* [online]. Illinois, USA, 2016 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z URL: <https://www.thingiverse.com/thing:1982745>.
- [25] *Knižnica hidapi* [online]. Dostupné z URL: <https://github.com/signal11/hidapi/find/master>.

Zoznam symbolov a skratiek

CV	Počítačové videnie – Computer Vision
HCI	Interakcia človek a počítač – Human Computer Interaction
IMU	Inerciálna meracia jednotka – Inertial Measurement Unit
VR	Virtuálna realita – Virtual reality
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanické Systémy – Micro-Electro-Mechanical Systems
ML	Machine Learning – Strojové učenie
SPI	Serial Peripheral Interface – Sériové periférne rozhranie
I2C	Inter-Integrated Circuit
RISC	Reduced instruction set computer – procesor s redukovanou inštrukčnou sadou
ISR	Interrupt Service Routine – Obsluha prerušenia
UML	Unified Modeling Language
MCU	Microcontroller Unit – Mikrokontrolér
USCI	Universal Serial Communication Interface – Univerzálne sériové komunikačné rozhranie
CS	Chip Select – Výber čipu
PC	Personal Computer – Osobný počítač
USB	Universal Serial Bus – Univerzálna sériová zbernica

Zoznam príloh

A Meranie senzorov ohybu	71
B Schéma zapojenia systému	76
C Realizácia hardwaru systému	77
D Meranie ohybu dátovou rukavicou	79
E Dátová rukavica	86
F Obsah elektronickej prílohy	87

A Meranie senzorov ohybu

meranie	1			2		
	Senzor 1	Senzor 2	Senzor 3	Senzor 1	Senzor 2	Senzor 3
Uhol [°]	R [KΩ]			R [KΩ]		
0	32.276	30.808	25.647	32.738	30.632	25.611
45	57.44	66.247	39.405	58.702	65.013	39.266
90	88.732	113.09	60.407	88.926	113.53	60.251
meranie	3			4		
	Senzor 1	Senzor 2	Senzor 3	Senzor 1	Senzor 2	Senzor 3
Uhol [°]	R [KΩ]			R [KΩ]		
0	32.374	29.823	25.604	32.724	29.852	25.505
45	58.239	62.086	38.761	58.223	63.182	38.257
90	88.827	112.11	60.144	88.736	111.89	59.654

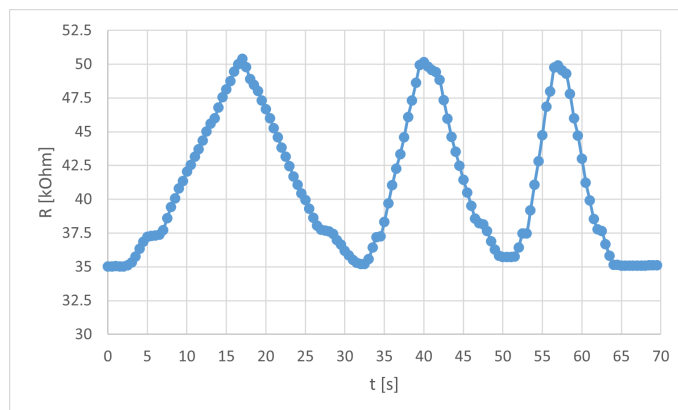
Tab. A.1: Hodnoty meraní 1 až 4 opakovateľnosti senzorov ohybu

meranie	5		
	Senzor 1	Senzor 2	Senzor 3
Uhol [°]	R [KΩ]		
0	32.356	29.651	25.514
45	58.579	63.708	38.078
90	88.369	112.37	60.072

Tab. A.2: Hodnoty merania 5 opakovateľnosti senzorov ohybu

Uhol [°]	R [kΩ]		
	Senzor 1	Senzor 2	Senzor 3
0	34.528	31.413	25.69
5	36.683	33.546	26.89
10	39.349	36.587	28.02
15	41.982	39.833	29.34
20	44.916	43.455	30.63
25	47.906	47.264	32.09
30	50.471	51.137	33.49
35	53.938	55.636	35.21
40	56.711	61.102	36.99
45	58.692	66.457	38.99
50	62.407	71.122	41.01
55	65.191	75.659	43.02
60	68.437	81.086	45.04
65	71.933	86.733	47.42
70	74.655	91.915	49.66
75	77.869	97.691	52.10
80	81.231	102.437	54.10
85	84.949	107.657	56.13
90	87.87	111.332	57.90

Tab. A.3: Tabuľka uhlovej závislosti senzorov ohybu



Obr. A.1: Závislosť senzoru 1 na rýchlosti ohybu

	Senzor 1	Senzor 2	Senzor 3
Uhol [°]	ϕ_{chyba} [°]		
0	0	0	0
5	-1.36	-2.60	-1.64
10	-1.866	-4.17	-3.51
15	-2.42	-5.52	-4.82
20	-2.47	-6.44	-6.20
25	-2.42	-7.15	-7.11
30	-3.10	-7.79	-8.22
35	-2.25	-7.72	-8.40
40	-2.57	-6.57	-8.42
45	-4.23	-5.54	-7.83
50	-2.96	-5.28	-7.20
55	-3.26	-5.17	-6.57
60	-2.79	-4.06	-5.95
65	-1.89	-2.70	-4.29
70	-2.30	-1.87	-3.04
75	-1.87	-0.362	-1.20
80	-1.20	-0.0170	-0.625
85	0.0716	0.861	0.0324
90	0	0	0

Tab. A.4: Vypočítaná chyba senzorov ohybu od Spectra Symbol

Uhol[°]	0	45	90
$R_{max}[K\Omega]$	32.74	58.7	88.9
$R_{min}[K\Omega]$	32.28	57.4	88.37
$\Delta R[K\Omega]$	0.462	1.26	0.557

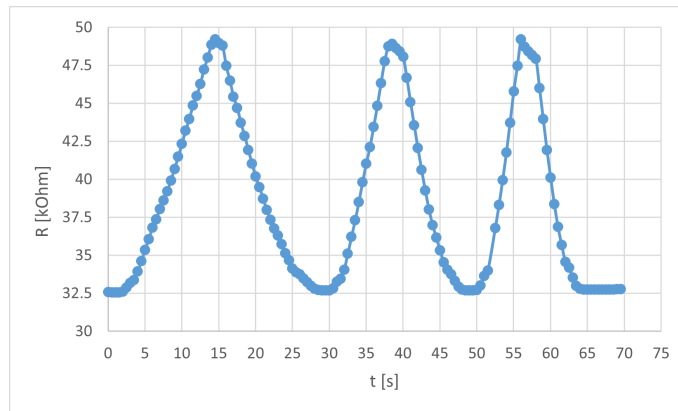
Tab. A.5: Opakovateľnosť senzoru 1

Uhol [°]	0	45	90
$R_{max}[K\Omega]$	30.8	66.2	113.5
$R_{min}[K\Omega]$	29.7	62.1	112.0
$\Delta R[K\Omega]$	1.16	4.16	1.64

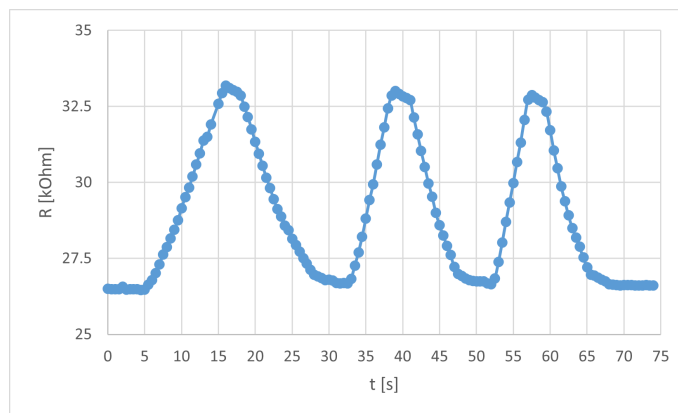
Tab. A.6: Opakovateľnosť senzoru 2

Uhol [°]	0	45	90
$R_{max}[K\Omega]$	25.6	39.4	60.4
$R_{min}[K\Omega]$	25.5	38.1	59.7
$\Delta R[K\Omega]$	0.142	1.33	0.753

Tab. A.7: Opakovateľnosť senzoru 3



Obr. A.2: Závislosť senzoru 2 na rýchlosti ohybu

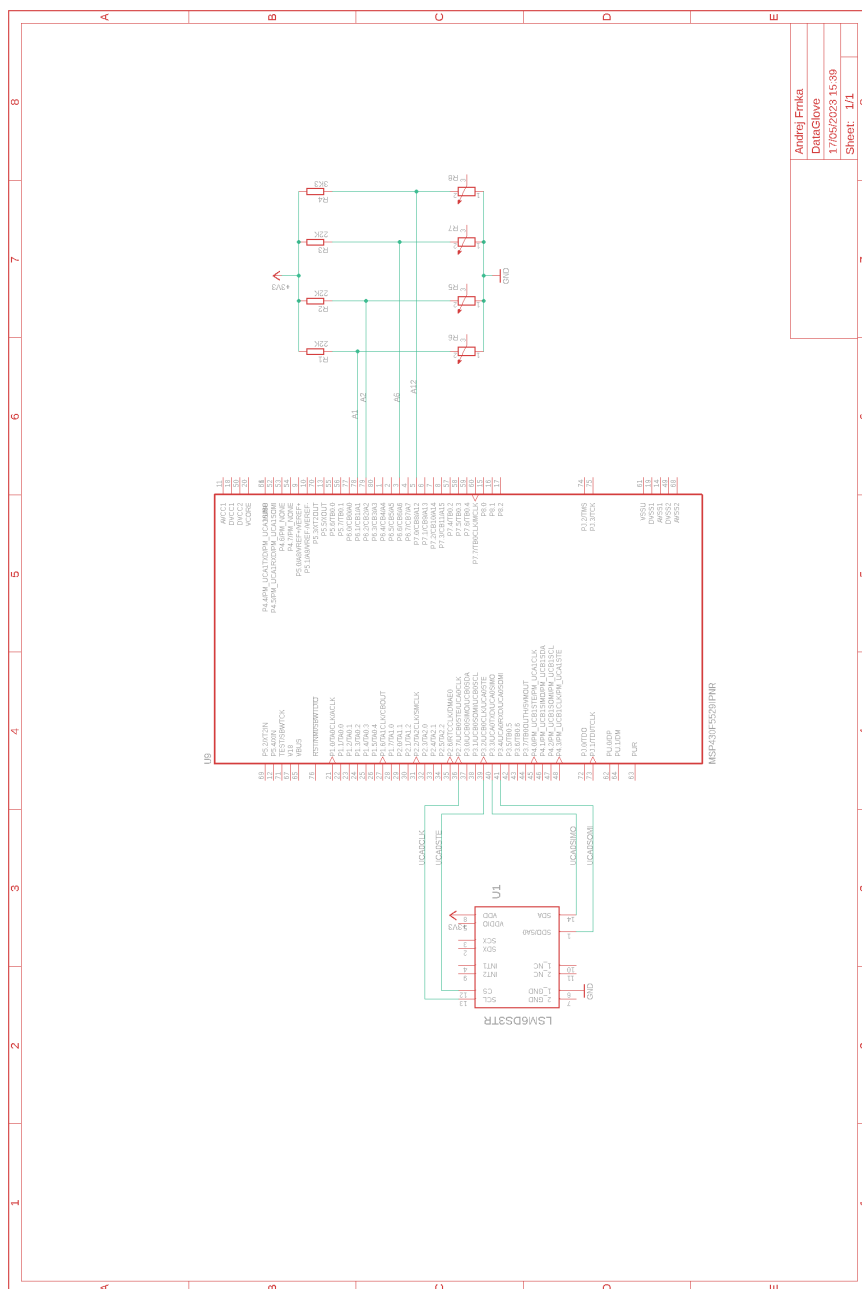


Obr. A.3: Závislosť senzoru 3 na rýchlosti ohybu

	Senzor1	Senzor2	Senzor3
t [°C]	R [KΩ]		
20	33.6	32.5	25.5
25	33.6	32.6	25.5
30	33.6	33.0	25.5
35	33.7	33.6	25.5
40	33.9	34.4	25.4
45	34.0	35.4	25.4
50	33.9	36.2	25.4
45	33.7	35.8	25.3
40	33.7	35.2	25.3
35	33.8	34.6	25.4
30	33.8	34.2	25.4
25	33.8	33.7	25.4
20	33.8	33.4	25.4
15	33.7	33.1	25.4
10	33.7	32.8	25.4
5	33.6	32.6	25.5
0	33.4	32.4	25.5
-5	32.7	32.0	25.5
-10	32.7	32.1	25.5
-15	32.7	32.1	25.5
-20	32.8	32.2	25.5
-15	32.8	32.2	25.5
-10	32.7	32.1	25.5
-5	32.7	32.1	25.5
0	32.6	32.0	25.5
5	32.4	31.8	25.4
10	32.1	31.7	25.4
15	31.9	31.7	25.3
20	31.8	31.6	25.2

Tab. A.8: Teplotná závislosť senzorov ohybu

B Schéma zapojenia systému



Obr. B.1: Schéma zapojenia systému snímania polohy prstov ľudskej ruky

C Realizácia hardwaru systému

	Senzor 1	Senzor 2	Senzor 3
Uhol [°]	U_{senzor} [V]		
0	2.02	1.94	1.78
5	2.06	1.99	1.82
10	2.12	2.06	1.85
15	2.17	2.13	1.89
20	2.22	2.19	1.92
25	2.26	2.25	1.96
30	2.30	2.31	1.99
35	2.34	2.36	2.03
40	2.38	2.43	2.07
45	2.40	2.48	2.11
50	2.44	2.52	2.15
55	2.47	2.56	2.18
60	2.50	2.60	2.22
65	2.53	2.63	2.25
70	2.55	2.66	2.29
75	2.57	2.69	2.32
80	2.60	2.72	2.35
85	2.62	2.74	2.37
90	2.64	2.76	2.39

Tab. C.1: Uhlová závislosť napätového deliča

	Senzor 1	Senzor 2	Senzor 3
U _{hol} [°]	ΔU [V]		
0-5	0.0472	0.0522	0.0375
5-10	0.0538	0.0678	0.0333
10-15	0.0487	0.0651	0.0373
15-20	0.0498	0.0650	0.0348
20-25	0.0464	0.0610	0.0373
25-30	0.0368	0.0556	0.0337
30-35	0.0457	0.0575	0.0395
35-40	0.0337	0.0615	0.0384
40-45	0.0226	0.0529	0.0403
45-50	0.0396	0.0411	0.0381
50-55	0.0275	0.0362	0.0357
55-60	0.0299	0.0391	0.0335
60-65	0.0299	0.0366	0.0372
65-70	0.0218	0.0304	0.0326
70-75	0.0242	0.0308	0.0334
75-80	0.0237	0.0231	0.0257
80-85	0.0245	0.0235	0.0247
85-90	0.0181	0.0154	0.0207

Tab. C.2: Závislosť ΔU senzorov ohybu od $\Delta\phi$

D Meranie ohybu dátovou rukavicou

Uhol [°]	$\phi_{Ukazovak}$ [°]	$\phi_{Prstenicek}$ [°]	ϕ_{Palec} [°] [°]
0	2	4	2
10	10	13	10
20	18	21	24
30	27	31	33
40	37	44	46
50	44	52	55
60	56	65	63
70	65	69	71
80	67	67	75
90	72	83	84

Tab. D.1: Prvé meranie ohybu prstov ľudskej ruky

Uhol [°]	$\phi_{Ukazovak}$ [°]	$\phi_{Prstenicek}$ [°]	ϕ_{Palec} [°]
0	2	4	2
10	10	13	10
20	18	21	24
30	27	31	33
40	37	44	46
50	44	52	55
60	56	65	63
70	65	69	71
80	67	67	75
90	72	83	84

Tab. D.2: Rozdiel výsledku systému od skutočného uhlu prvého merania

meranie	1		2		3	
	$\phi_{Ukazovak} [^{\circ}]$	$\phi_{Prstenicek} [^{\circ}]$	$\phi_{Ukazovak} [^{\circ}]$	$\phi_{Prstenicek} [^{\circ}]$	$\phi_{Ukazovak} [^{\circ}]$	$\phi_{Prstenicek} [^{\circ}]$
0	3	1	1	0	4	3
10	16	14	10	12	14	14
20	21	20	17	19	20	22
30	36	32	28	25	34	29
40	43	36	35	37	34	37
50	46	47	49	46	53	48
60	59	57	57	58	59	61
70	64	68	65	64	72	71
80	85	81	72	75	79	86
90	91	88	84	85	93	91

Tab. D.3: Meranie 1-3 ohybu ukazováku a prsteníku druhym modelom rukavice

meranie	4	5	6
Úhol [°]	$\phi_{Ukazovak}$ [°]	$\phi_{Prstenicek}$ [°]	$\phi_{Ukazovak}$ [°]
0	2	4	0
10	16	12	14
20	26	19	21
30	33	29	29
40	41	42	41
50	55	55	55
60	64	62	64
70	75	74	75
80	84	80	84
90	91	94	91
		$\phi_{Prstenicek}$ [°]	$\phi_{Prstenicek}$ [°]
		1	2
		10	15
		17	21
		36	32
		45	43
		55	46
		62	59
		74	64
		80	85
		94	91
			$\phi_{Prstenicek}$ [°]
			4
			14
			26
			36
			36
			47
			57
			68
			81
			88

Tab. D.4: Meranie 4-6 ohybu ukazováku a prsteníku druhym modelom rukavice

meranie	1		2		3	
	$\Delta\phi_{Ukazovak}$ [°]	$\Delta\phi_{Prstenicek}$ [°]	$\Delta\phi_{Ukazovak}$ [°]	$\Delta\phi_{Prstenicek}$ [°]	$\Delta\phi_{Ukazovak}$ [°]	$\Delta\phi_{Prstenicek}$ [°]
0	-3	-1	-1	0	-4	-3
10	-6	-4	0	-2	-4	-4
20	-1	0	3	1	0	-2
30	-6	-2	2	5	-4	1
40	-3	4	5	3	6	3
50	4	3	1	4	-3	2
60	1	3	3	2	1	-1
70	6	2	5	6	-2	-1
80	-5	-1	6	5	1	-6
90	-1	2	6	5	-3	-1

Tab. D.5: Chyba meraní 1-3 ukazováku a prsteníku

meranie	4		5		6	
	$\Delta\phi_{Ukazovak}$ [°]	$\Delta\phi_{Prstenicek}$ [°]	$\Delta\phi_{Ukazovak}$ [°]	$\Delta\phi_{Prstenicek}$ [°]	$\Delta\phi_{Ukazovak}$ [°]	$\Delta\phi_{Prstenicek}$ [°]
0	-2	-4	0	-1	-2	-4
10	-6	-2	-4	0	-5	-4
20	-6	1	-1	3	-1	-6
30	-3	1	1	-6	-2	-6
40	-1	-2	-1	-5	-3	4
50	-5	-5	-5	-5	4	3
60	-4	-2	-4	-2	1	3
70	-5	-4	-5	-4	6	2
80	-4	0	-4	0	-5	-1
90	-1	-4	-1	-4	-1	2

Tab. D.6: Chyba meraní 4-6 ukazováku a prsteníku

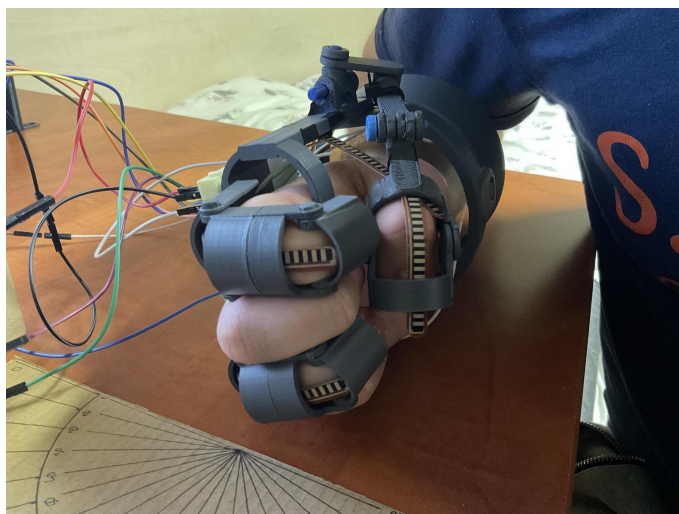
meranie	1	2	3	4	5	6
Uhol [°]	ϕ_{Palec} [°]					
0	0	2	1	3	3	1
10	8	12	10	14	7	11
20	19	21	24	15	23	26
30	27	29	34	33	27	35
40	42	38	41	47	35	42
50	57	46	53	50	47	53
60	66	59	62	59	55	64
70	73	70	72	68	71	74
80	82	83	86	77	84	86
90	91	94	92	91	95	93

Tab. D.7: Meranie 1-6 ohybu palca druhym modelom rukavice

meranie	1	2	3	4	5	6
Uhol [°]	$\Delta\phi_{Palec}$ [°]					
0	0	-2	-1	-3	-3	-1
10	2	-2	0	-4	3	-1
20	1	-1	-4	5	-3	-6
30	3	1	-4	-3	3	-5
40	-2	2	-1	-7	5	-2
50	-7	4	-3	0	3	-3
60	-6	1	-2	1	5	-4
70	-3	0	-2	2	-1	-4
80	-2	-3	-6	3	-4	-6
90	-1	-4	-2	-1	-5	-3

Tab. D.8: Chyba meraní 1-6 palca

E Dátová rukavica



Obr. E.1: Vyvlieknutie senzorov pri meraní ohybu



Obr. E.2: Výpis dát pomocou aplikácie DataGloveAppCmd

F Obsah elektronickej prílohy

- 1 Namerané dáta ... Výpis dát z prvého merania s dátovou rukavicou
- 2 Program ... Firmware a software (DataGloveAppCmd)
- 3 Prezentačné video ... Demo ukážka