



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**KOLABORACE ČLOVĚK-STROJ – VYUŽITÍ
HAPTICKÉHO ZAŘÍZENÍ**

HUMAN-MACHINE COLLABORATION – USING HAPTIC DEVICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Kotrba

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Juříček

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Tomáš Kotrba**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **Ing. Martin Juříček**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Kolaborace člověk–stroj – využití haptického zařízení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Teoretická část práce bude zahrnovat rešerši o kolaborativních robotech ze stáje Universal Robots a analýzu využití haptických zařízení v robotice. Hlavní náplní práce bude implementace ovládacího programu pro haptické zařízení a následné využití pro řízení kolaborativního robota UR3. Práce taktéž bude zahrnovat ověření řešení jak v simulaci, tak v laboratoři. Práce předpokládá aktivní přístup. Využít lze programovací jazyk Python nebo Matlab.

Cíle bakalářské práce:

- Provedte rešerši kolaborativních robotů společnosti Universal Robots a blíže popište zvoleného kolaborativního robota UR3
- Provedte rešerši o haptických zařízení využívaných v robotice
- Implementujte ovládací program haptického zařízení pro řízení UR3
- Ověřte funkčnost vytvořeného řešení pomocí simulace a v laboratoři

Seznam doporučené literatury:

SICILIANO, Bruno a KHATIB, Oussama, ed. Springer handbook of robotics. 2nd edition. Berlin: Springer, [2016]. ISBN 978-3-319-32550-7.

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5

Universal Robots: Collaborative Robotics. <https://www.universal-robots.com/>

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

V Brně, dne

L. S.

ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zaměřuje na integraci haptického zařízení SpaceMouse Module s kolaborativním robotickým ramenem UR3 CB3 prostřednictvím vývoje softwarové aplikace v jazyce Python. Cílem je vytvořit software, který umožní plynulou komunikaci mezi těmito zařízeními a implementuje metody pro zpracování a filtraci signálů získaných ze SpaceMouse. Teoretická část zahrnuje základy kolaborativní robotiky a haptických technologií, vysvětluje jejich principy a popisuje současný stav. Praktická část detailně popisuje proces integrace kobotu UR3 a haptického zařízení SpaceMouse. Prezentuje výsledky experimentů při výběru vhodného filtru pro filtraci dat ze SpaceMouse.

ABSTRACT

The bachelor's thesis focuses on the integration of the SpaceMouse Module haptic device with the collaborative robotic arm UR3 CB3 through the development of a software application in Python. The aim is to create software that enables smooth communication between these devices and implements methods for processing and filtering signals obtained from the SpaceMouse. The theoretical part includes the basics of collaborative robotics and haptic technologies, explaining their principles and describing the current state. The practical part details the process of integrating the UR3 cobot and the SpaceMouse haptic device. It presents the results of experiments in selecting a suitable filter for data filtering from the SpaceMouse.

KLÍČOVÁ SLOVA

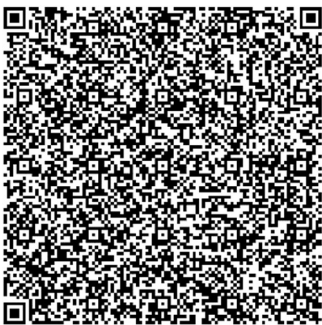
Kolaborativní robotika, kobot, Universal Robots, haptická zařízení, SpaceMouse Module, 3Dconnexions, Python, ovládání robotu, filtrace dat, klouzavý průměr, exponenciální klouzavý průměr, konečná impulsní odezva

KEYWORDS

Collaborative robotics, cobot, Universal Robots, haptic devices, SpaceMouse Module, 3dconnexion, python, robot control, data filtering, moving average, exponential moving average, finite impulse response



ÚSTAV AUTOMATIZACE
A INFORMATIKY



2024

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOTRBA, Tomáš. *Kolaborace člověk-stroj – využití haptického zařízení*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157233>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Martin Juříček.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Martinu Juříčkovi za odbornou pomoc s vypracováním této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která mě během studia podporuje.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 20. 5. 2024

.....

Student Učený

OBSAH

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ÚVOD..... | 15 |
| 2 | KOLABORATIVNÍ ROBOTIKA..... | 17 |
| 2.1 | Definice kolaborativní robotiky a její význam..... | 17 |
| 2.2 | Přehled historického vývoje a současných trendů..... | 18 |
| 2.3 | Přehled úspěšných aplikací kolaborativních robotů..... | 21 |
| 2.4 | Programování kolaborativních robotů..... | 25 |
| 2.5 | Universal Robots..... | 27 |
| 2.5.1 | UR3 CB3..... | 29 |
| 3 | HAPTICKÁ ZAŘÍZENÍ..... | 31 |
| 3.1 | Haptická zařízení – interakce člověk-počítač..... | 31 |
| 3.2 | Příklady využití haptických zařízení..... | 33 |
| 3.3 | Využití 3D myši a SpaceMouse..... | 35 |
| 4 | VÝVOJ PROGRAMU OVLÁDÁNÍ UR3 POMOCÍ SPACEMOUSE | 37 |
| 4.1 | Popis problému a cílů vývoje programu..... | 37 |
| 4.2 | Technologie a knihovny použité pro vývoj..... | 37 |
| 4.3 | Detailní přehled architektury a funkcionality programu..... | 39 |
| 4.4 | Výběr vhodného filtru..... | 42 |
| 4.4.1 | Pásmo necitlivosti..... | 44 |
| 4.4.2 | Filtrace šumu..... | 48 |
| 4.5 | Testování programu..... | 61 |
| 4.6 | Popis procesu sběru dat z UR3 CB3..... | 62 |
| 5 | DISKUZE | 63 |
| 6 | ZÁVĚR | 65 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 67 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 73 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 75 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 77 |

1 ÚVOD

V rámci technologického pokroku a narůstající digitalizace průmyslových odvětví dochází k posunu vztahů mezi člověkem a strojem. Tento posun se projevuje zejména ve vzrůstající interakci člověka s pokročilými robotickými systémy, které zvyšují produktivitu, a vytváří flexibilnější a bezpečnější pracovní prostředí.

Cílem bakalářské práce je integrace haptického zařízení SpaceMouse Module s kolaborativním robotickým ramenem UR3 CB3 prostřednictvím vývoje softwarové aplikace v jazyce Python. Tato práce se soustředí na vývoj softwaru, který zajistí plynulou komunikaci mezi uvedenými zařízeními, a také implementuje metody pro zpracování a filtraci signálů získaných ze SpaceMouse. Následně se práce zabývá sběrem dat z robotického ramene pro účely strojového učení.

Práce je rozdělena do několika klíčových částí. První část se zabývá teoretickým základem kolaborativní robotiky a haptických technologií, vysvětluje jejich principy a popisuje současný stav. Následující část se věnuje praktické implementaci, kde je podrobně popsán proces integrace kobotu UR3 a haptického zařízení SpaceMouse. Jsou zde prezentovány výsledky experimentů, které demonstrují schopnost programu reagovat na uživatelské vstupy.

2 KOLABORATIVNÍ ROBOTIKA

2.1 Definice kolaborativní robotiky a její význam

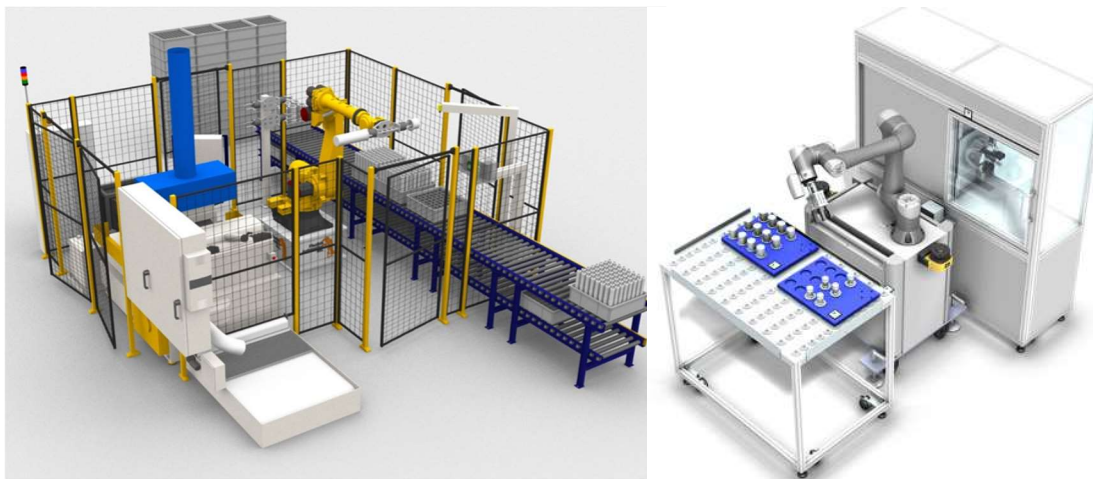
Konvenční industriální roboty, jsou programovatelné samořídící jednotky jejímž úkolem je splnit sérii komplexních úkonů. Tyto roboty jsou do továren instalovány za účelem vykonávání prací, které jsou pro člověka nemožné, nebezpečné nebo tyto práce vykonává robot rychleji (zvedání těžkých břemen, svařování, montáž). Pracovní prostor industriálních robotů musí být z bezpečnostních důvodů oddělen od prostoru, kde pracují lidé. Toho je docíleno buď fyzickým oplocením prostoru, ve kterém robot operuje, nebo instalací senzorických bariér. V případě porušení bariéry dojde k okamžitému zastavení robotické jednotky.

Kolaborativní robot, zkráceně kobot, je robot navržen tak, aby mohl interagovat a spolupracovat s člověkem ve sdíleném pracovním prostoru. Na obr. 1 lze vidět rozdíl mezi pracovištěm průmyslového robotu a kobotu. Člověk s robotem komunikuje a spolupracuje na pracovním úkonu, který by byl pro samotného pracovníka fyzicky namáhavý nebo dokonce nebezpečný. Přestože kobot může provádět určité úkoly samostatně, spolupráce s člověkem mu umožňuje vykonávat složitější a náročnější operace. Pracovník může s kobotem komunikovat pomocí grafického uživatelského rozhraní, programovacích jazyků a prostředí, hlasových příkazů, a teach pendantu¹ dodávaným výrobcem. Na rozdíl od konvenčních industriálních robotů nemusí být oddělení fyzickými nebo senzorickými zábranami [1]. Proto jsou koboty vybaveny různými senzory, které chrání člověka v případě, že by došlo ke kontaktu mezi člověkem a robotem. Koboty využívají tenzometry a akcelerometry a pro detekci neočekávaného odporu nebo zrychlení, v takové situaci se robot zastaví. Dalším způsobem zajištění bezpečnosti je využití kamer a 3D senzorů. Data z těchto zařízení se zpracovávají v reálném čase a počítač přepočítává trasu tak, aby se vyhnul člověku nebo jiným objektům [2]. Výrobci zajišťují i pasivní bezpečnost pomocí oblých tvarů ramen kobotů, oplastování nebo polstrování. S bezpečností souvisí i nižší maximální pracovní rychlost a nosnost kobotů než u konvenčních industriálních robotů. Nižší rychlost a hmota znamená, že v případě neočekávaného kontaktu s člověkem je riziko zranění výrazně sníženo. Přestože tyto charakteristiky mohou být vnímané jako negativní, jsou to nutná omezení pro bezpečnou spolupráci.

Zaváděním kolaborativních robotů se otevírá nová éra v průmyslové výrobě a automatizaci. Tato technologie přináší změny ve způsobu, jakým jsou výrobní procesy organizovány a prováděny, a také jak spolu interagují člověk a stroj. Koboty se vyznačují vysokou úrovní flexibility, která umožňuje jejich rychlou adaptaci na různé úkoly

¹ Teach pendant je ovládací zařízení používané pro programování a ovládání průmyslových robotů. Umožňuje uživateli zadávat příkazy a učit robota specifické úlohy tím, že interaktivně nastavují jeho polohu a pohyby. Teach pendanty jsou obvykle vybaveny displejem, klávesnicí nebo dotykovým panelem a různými bezpečnostními funkcemi pro ochranu uživatele i stroje.

bez potřeby složitého a časově náročného nastavování, jak je typické pro tradiční automatizované výrobní systémy. Flexibilita a nižší pořizovací cena kolaborativních robotů je výhodná pro malé a střední podniky. Koboty nabízejí podnikům možnost snížit provozní náklady a zvýšit výrobní kapacitu bez značných investic do tradičních průmyslových robotických systémů. Jejich využití může vést k rychlé návratnosti investic a větší konkurenceschopnosti na trhu. Přispívají ke zlepšení pracovních podmínek tím, že přebírají nebezpečné, monotónní nebo fyzicky náročné úlohy, čímž redukuje riziko pracovních úrazů [3]



Obr. 1: Srovnání pracoviště konvenčního robotu (vlevo) a kolaborativní pracoviště [44; 45]

2.2 Přehled historického vývoje a současných trendů

První kolaborativní robot byl vyvinut Edwardem J. Colgatem a Michaelem Peshkinem v roce 1996 na žádost amerického automobilového výrobce General Motors. Cílem bylo vytvořit asistenčního robota, který by zlepšil pracovní podmínky zaměstnanců a zvýšil efektivitu jejich práce. Výsledkem byl manipulátor, který nesl váhu komponentu, ale sám nemohl s dílem pohybovat. K pohybu potřeboval aktivační hybnou sílu od pracovníka. Tím položili základy pro kolaborativní robotiku, kde bezpečnost a spolupráce mezi lidmi a stroji stojí v popředí. Tento koncept posunul hranice tradiční robotiky tím, že představil myšlenku strojů, které mohou pracovat bok po boku s lidmi bez nutnosti fyzických bariér [4].

Důležitým milníkem v historii kobotů bylo představení LBR3 (obr. 2) společností KUKA v roce 2004. Jeden z prvních kobotů zaměřených na průmyslové využití. LBR3 byl výsledek spolupráce s Německým institutem pro letectví a kosmonautiku. KUKA dále pokračovala s vývojem a následně vydala nástupce – KUKA LBR 4 v roce 2008 a LBR iiwa (obr. 2) v roce 2013 [5].



Obr. 2: KUKA LBR 3 (vlevo) a KUKA LBR iiwa [46; 47]

V roce 2008 byl na trh uveden první kobot dánské společnosti Universal Robots, který mohl bezpečně pracovat společně s člověkem – UR5. Tento kobot odstartoval dobu uživatelsky přívětivých, flexibilních a cenově dostupných zařízení. To přineslo pro malé a střední podniky možnost automatizovat svoji výrobu. UR5 se stal komerčně úspěšným a oblíbeným hlavně díky jeho snadnému programování [6].

Dalším významným krokem je začlenění pokročilých technologií, jako jsou umělá inteligence, strojové učení a senzorické systémy, které umožňují kobotům lépe rozumět svému okolí a bezpečněji s ním interagovat. Tyto inovace znamenají posun k větší flexibilitě a adaptabilitě, která umožňuje kobotům zvládat složitější úkoly a pracovat v dynamických prostředích [7].

Tradiční výrobci průmyslových robotů rozpoznali rostoucí potenciál kolaborativní robotiky a nyní nabízejí vlastní řady kolaborativních robotů. Tyto produkty se vyznačují klíčovými parametry, jako je užitečné zatížení, dosah a přesnost. Užitečné zatížení se může pohybovat od 0,5 kg u modelu ABB YuMi až po 50 kg u modelu FANUC CR-35iB. Dosah se liší podle velikosti kobotu; menší koboty mají dosah okolo 500 mm, jako například ABB YuMi, zatímco větší modely mohou dosáhnout až 1900 mm, což je případ Yaskawa Motoman HC20DTP. Přesnost a opakovatelnost těchto robotů je důležitým faktorem. Tyto parametry, včetně užitečného zatížení a dosahu, se liší v závislosti na výrobci a konkrétním typu kobotu. Výrobci neustále inovují a optimalizují své produkty, aby byly co nejvíce přizpůsobeny potřebám různých průmyslových odvětví a zákazníkům.

Někteří výrobci nabízejí řešení pro specifické aplikace. Příkladem je již zmiňovaný *ABB YuMi* (obr. 3), dvouramenný kobot speciálně navržený pro manipulaci s malými komponenty a spolupráci v těsné blízkosti člověka [8]. Tento kobot je součástí vybavení robotické laboratoře Ústavu automatizace a informatiky.



Obr. 3: ABB YuMi [48]

KUKA KMR iiwa (obr. 4) je kombinace mobilní platformy a kolaborativního robota, která poskytuje unikátní flexibilitu a autonomii pro různé průmyslové aplikace. Pomocí mobilní platformy může robot autonomně navigovat výrobním prostorem, zatímco kolaborativní robot *iiwa* plní úkoly jako jsou montáž, testování kvality a manipulace s materiálem. Vyznačuje se jednoduchou integrací do existujících výrobních procesů [9].



Obr. 4: KUKA KMR iiwa [49]

Dalším příkladem inovace v oblasti kolaborativních robotů je *Techman Robot* (obr. 5), který nabízí koboty s integrovaným strojovým viděním. Díky technologii *AI Vision* jsou tyto roboty schopné rozlišovat dění v jejich okolí. Výhodou je, že není nutné dokupovat externí kamery a software pro strojové vidění třetích stran. Integrované kamery umožňují skenování čárových a QR kódů, měření rozměrů a provádění vizuálních inspekcí [10].



Obr. 5: Techman Robot TM12 [50]

Očekává se, že oblast kolaborativní robotiky se bude nadále rapidně rozvíjet. Její aplikace se budou rozšiřovat nejen do malých a středních podniků, ale také mimo tradiční oblasti výrobního průmyslu. Kolaborativní roboty nyní nalézají uplatnění v logistice, zdravotní péči a zemědělství, kde jejich význam stále narůstá. Dalším impulsem pro rozvoj v této oblasti bude implementace pokročilých systémů umělé inteligence, strojového učení a internetu věcí [11].

2.3 Přehled úspěšných aplikací kolaborativních robotů

KUKA LBR Med je příkladem technologického pokroku v oblasti kolaborativní robotiky, speciálně navržen pro aplikace ve zdravotnickém sektoru. S jeho vysoce přesným a flexibilním systémem, schopným provádět složité úkoly a opakovatelností, je LBR Med užitečným nástrojem pro moderní medicínu. Své využití našel jako asistent ve zdravotnickém sektoru, například při chirurgických zákrocích na páteři. Robot je vybaven řadou bezpečnostních funkcí, které umožňují jeho bezproblémovou integraci do pracovního prostředí nemocnic. Dále disponuje certifikací IECCE – CB, která je mezinárodně uznávaná a celosvětově urychluje schvalovací postupy pro lékařské výrobky [12].

Na platformě *KUKA LBR Med* je postaven kobot s názvem *ROBERT*. V oblasti rehabilitace nabízí společnost *Life Science Robotics* se svým rehabilitačním kobotem nové možnosti pro pacienty i terapeutů (obr. 6). Jeho aplikace v rehabilitační medicíně umožňuje upravit proces rehabilitace na míru každého pacienta. Terapeutům a zdravotním sestřám to umožňuje pohodlněji pracovat s pacienty a urychlit jejich zotavení. Robot může pomáhat v obnově motorických funkcí pacientů po mozkových příhodách, úrazech hlavy nebo po chirurgických zákrocích. Zdravotnický personál spojí robotickou paži, s částí těla pacienta. Po aktivaci stisknutím tlačítka „Start“, robot zvedne danou končetinu. Poté zdravotník manuálně provede požadované pohyby, které si robot *ROBERT* zaznamená. Uložené pohyby dokáže opakovat s vysokou přesností dle zadání, a to opakovaně a autonomně. V případě, že dojde k náhlému pohybu nebo k aplikaci nečekané síly, robot se z bezpečnostních důvodů okamžitě zastaví [13].



Obr. 6: Rehabilitace pomocí kobotu ROBERT [51]

Jednou z vlastností *KUKA LBR Med* je jeho schopnost být ovládán na dálku pomocí teleoperačních systémů. Tato funkce umožňuje lékařským odborníkům manipulovat s robotem z bezpečné vzdálenosti. Zvláště užitečná je tato vlastnost v prostředích, kde je přímý kontakt mezi pacientem a terapeutem nežádoucí nebo nepraktický [14]. KUKA na ovládání teleoperačního systému využívá haptické zařízení *sigma.7* od společnosti *Force Dimension*, které je popsáno blíže v kapitole 3.1. Pomocí tohoto zařízení dokáže obsluha plnohodnotně ovládat všechny osy robotického ramene a umožňuje ji ovládat i nástroj, kterým je robot vybaven např. uchopovací zařízení [15].

Spoluprací výrobců robotů *FANUC*, pečících trub *WIESHEU* a maloobchodního specialisty *Wanzl* vznikl automatizovaný systém nazvaný *Bakisto* (obr. 7). Tento systém byl navržen speciálně pro použití v supermarketech a pekárnách. *Bakisto* je schopen automaticky umístit dávku zmrazených polotovarů pečiva na pečící plech, vložit plech do trouby, včas ho vyjmout a následně roztřídit upečené pečivo do správných schránek, ze kterých si zákazníci mohou zakoupit čerstvé pečivo. Systém zároveň monitoruje spotřebu pečiva a využívá modely umělé inteligence k předpovědi budoucí poptávky na základě historických dat. Tento přístup umožňuje optimalizaci výroby a snižuje množství potravinového odpadu [16].



Obr. 7: Systém *Bakisto* [52]

Robotwin je český startup zaměřený na automatizaci průmyslových procesů prostřednictvím technologie, která umožňuje snadné programování robotů bez potřeby psaní počítačových kódů. Společnost vyvinula nástroj *RoboTeach*, který umožňuje uživatelům ukázat robotu požadovaný pohyb, který je snímán pomocí sensorů na nástroji, jako je například lakovací pistole nebo bruska (obr. 8). Trajektorie nástroje je zaznamenána a automaticky převedena do programu pro robota, který pak tyto pohyby reprodukuje. Tento přístup je zvláště užitečný pro malé podniky, které chtějí automatizovat své procesy, ale nemají zdroje na najímání specialistů na programování robotů. Tato technologie byla úspěšně implementována v lakovacích firmách *GALATEK* a *Dikrt*. Startup získal několik ocenění, včetně prvního místa v kategorii *SwitchOn* na soutěži *BoostUp! East 2022* [17].



Obr. 8: Učení robota lakování pomocí napodobování pohybu [53]

2.4 Programování kolaborativních robotů

V minulosti se při vývoji průmyslových robotů nevytvořil žádný obecně uznávaný standard pro jejich programování. I když vznikaly projekty, které měly za cíl normalizovat programování robotů, žádný z nich se neuchytil do takové míry, aby byl považován za univerzální normu.

Z důvodu absence standardu si k výrobci vyvinuli své vlastní programovací jazyky, ve kterých lze jejich roboty programovat (KUKA – KRL, ABB – RAPID, Universal Robots – URScript). Tyto jazyky jsou navrženy pro snadné a efektivní programování robotických systémů. Jazyky jsou udělány tak, aby byly snadno pochopitelné a přívětivé i pro uživatele bez hlubokých znalostí v programování. Spolu s programovacími jazyky si někteří výrobci vytvořili i vlastní vývojové prostředí pro ještě snazší vývoj aplikací. (ABB – RobotStudio, FANUC – RoboGuide, Universal Robots – Polyscope). Vývojové prostředí uživatelům umožňuje lehkou integraci hardwaru a softwaru. Součástí bývají i simulace ve 3D. Nevýhodou používání software přímo od výrobců může být pořizovací cena licence.

Zásadní změnu přinesl nástup *Robot Operating System* (ROS). ROS je komplexní open-source nástroj pro vývoj a provoz softwaru pro roboty, který poskytuje nástroje a knihovny usnadňující vytváření, simulaci a spouštění chování robotů různých typů. Některé předchozí projekty, které se pokoušely sjednotit programování robotů, se staly inspirací pro ROS, jiné se staly součástí ekosystému ROS (např. Gazebo – preferovaný simulátor pro testování algoritmů robotů, senzorické integrace a simulace interakcí robotů ve 3D). Pro využití ROS na konkrétním robotu je potřeba, aby výrobce robota vytvořil a poskytl specifický software, nazývaný „package“ (balíček), který obsahuje všechny potřebné soubory a konfigurace pro daný robot. Tento balíček obsahuje ovladače, knihovny a další potřebné komponenty, které umožňují ROS komunikovat s hardwarem robota.

Díky knihovnám, které ROS poskytuje je možné programovat roboty v populárních programovacích jazycích jako je Python nebo C++. Tyto knihovny jsou navrženy tak, aby umožňovaly snadnou integraci s ROS ekosystémem a poskytovaly standardizované rozhraní pro různé úkoly pro roboty. Programování robotů v Pythonu s využitím ROS vyžaduje použití knihovny `rospy`, pro C++ se využívá knihovna `roscpp`. Obě tyto knihovny poskytují sadu nástrojů a funkcí pro efektivní vývoj robotických aplikací, včetně komunikace mezi procesy, rozhraní mezi softwarem a různými typy hardwaru, řízení nízko úrovněových zařízení a vysokou úroveň modularity. Dostupností široké škály knihoven a aplikačních programovacích rozhraní² se programování robotů stalo přístupnější širšímu spektru vývojářů [18].

² Aplikační programovací rozhraní (API) je soubor definic a protokolů umožňující komunikaci mezi různými softwarovými aplikacemi. API specifikuje dostupné funkce, jejich volání a formáty dat při komunikaci. Vývojářům to umožňuje využívat předem vytvořené funkce a služby bez nutnosti znát jejich interní implementaci, zjednodušuje a urychluje vývoj aplikací.

Přístup k programování robotů zahrnuje také využití teach pendantu (obr. 9). Teach pendant je ruční ovládací zařízení, které umožňuje uživatelům přímo interagovat s robotem nebo kobotem bez potřeby předchozích znalostí programovacích jazyků. Uživatelé mohou prostřednictvím tohoto zařízení přímo manipulovat s robotem, umisťovat jej do požadovaných poloh a provádět specifické akce. Ovládací panel zaznamenává tyto polohy a akce a ukládá je do paměti, aby je robot mohl následně opakovat. Operátor má navíc možnost specifikovat další parametry, jako je například rychlost, zrychlení, přítláčná síla a časování jednotlivých akcí. Ovládacím panelem je vybavena drtivá většina kobotů na trhu. Teach pendant umožňuje rychlé a intuitivní nastavení, avšak jeho funkce a možnosti jsou omezeny [19].



Obr. 9: Teach pendant společnosti FANUC [54]

Další pokročilou metodou programování je programování vedením (hand guide programování), která umožňuje operátorovi přímo vést robot pomocí rukou. Po aktivaci režimu vedení pomocí teach pendantu může operátor uchopit část ramene kolaborativního robotu. V některých případech může být kobot vybaven speciálním přípravkem nebo joystickem umístěným blízko efektoru kobotu. Režim vedení se zapne automaticky, když obsluha začne s přípravkem nebo joystickem manipulovat. Operátor pak může kobot umístit do požadované polohy, kterou si uloží do paměti. Při zapsání několika takových bodů v prostoru a akcí, jako je ovládání gripperu³, může být kobot rychle naprogramován například na paletizaci zboží. Alternativní metoda využívá zaznamenávání celé trajektorie pohybu. To může být využito při broušení a leštění komplexních tvarů. Programování vedením umožňuje velmi intuitivní programování

³ Gripper je zařízení na konci ramena robota, které slouží k uchopení, držení a manipulaci s objekty.

pro jednoduché aplikace a je zvláště užitečné v prostředích, kde je potřeba rychle měnit úkoly robotů [20].

Všechny tyto metody významně rozšiřují možnosti programování robotů a umožňují vývojářům i operátorům přizpůsobit roboty široké škále úkolů, od jednoduchého manipulování až po složité interakce s okolím. ROS poskytuje robustní open-source platformu, která umožňuje snadnou a efektivní tvorbu, simulaci a spouštění robotických aplikací. Využití teach pendantů usnadňuje přímou interakci s roboty a umožňuje rychlé a intuitivní nastavení. Programování vedením umožňuje operátorům fyzicky vést robota do požadovaných pozic. Obsluha tak může rychle programovat jednoduché úkoly a přizpůsobit robot měnícím se požadavkům.

2.5 Universal Robots

Na počátku 21. století byla robotická automatizace doménou převážně velkých podniků. Tuto situaci se rozhodli změnit spolužáci z University of Southern Denmark – Esben Østergaard, Kasper Støy a Kristian Kassow. Přišli s vidinou poskytnout cenově dostupná robotická ramena malým a středním podnikům. Tak byla roku 2005 založena dánská společnost *Universal Robots*. V roce 2008 se začal prodávat jejich první kolaborativní robot *UR5* na dánském a německém trhu. Během let představili další modely a firma získávala různá ocenění v oblasti robotiky. V roce 2016 byla spuštěna *UR Akademie*, která poskytuje moduly pro učení programování *UR* kobotů zdarma. Roku 2020 dosáhla společnost milníku ve formě 50 000 celosvětově prodaných kusů kobotů. Roku 2022 společnost oznámila zahájení výstavby nového sídla v Odense, které má být největším centrem pro kolaborativní a autonomní mobilní roboty na světě.

V aktuálním portfoliu *Universal Robots* je 6 kobotů (*UR3e*, *UR5e*, *UR10e*, *UR16e*, *UR20*, *UR30*), přičemž každý model je šestiosé robotické rameno. Modely se od sebe liší hlavně maximální nosností a dosahem. Koboty z nové řady *e-series* se dočkaly několika klíčových vylepšení. *E-series* přichází s novým uživatelským rozhraním, které usnadňuje programování robotů. Zároveň byly roboty vybaveny vyšší přesností pro lepší opakovatelnost úkonů. Vylepšení se dočkal i teach pendant zvýšením odolnosti proti prachu a vodě. Nově má certifikaci *IP54* stejně jako robotické rameno. Dále umožňuje snadnější integraci s ekosystémem *UR+*.

Rozsáhlý ekosystém UR+ zahrnuje certifikované produkty od partnerů. Komponenty jsou navrženy tak, aby bezproblémově komunikovaly s UR koboty. Tím se snižuje složitost inženýrských rozhodnutí pro běžné aplikace. To vede k redukci komplexnosti a urychluje implementace. Ekosystém UR+ se dynamicky rozvíjí a aktuálně zahrnuje široké spektrum komponent od různých typů gripperů, přísavek, ochranných krytů a softwaru až po kompletní řešení pro montážní aplikace (obr. 10) nebo svařovací stanice.

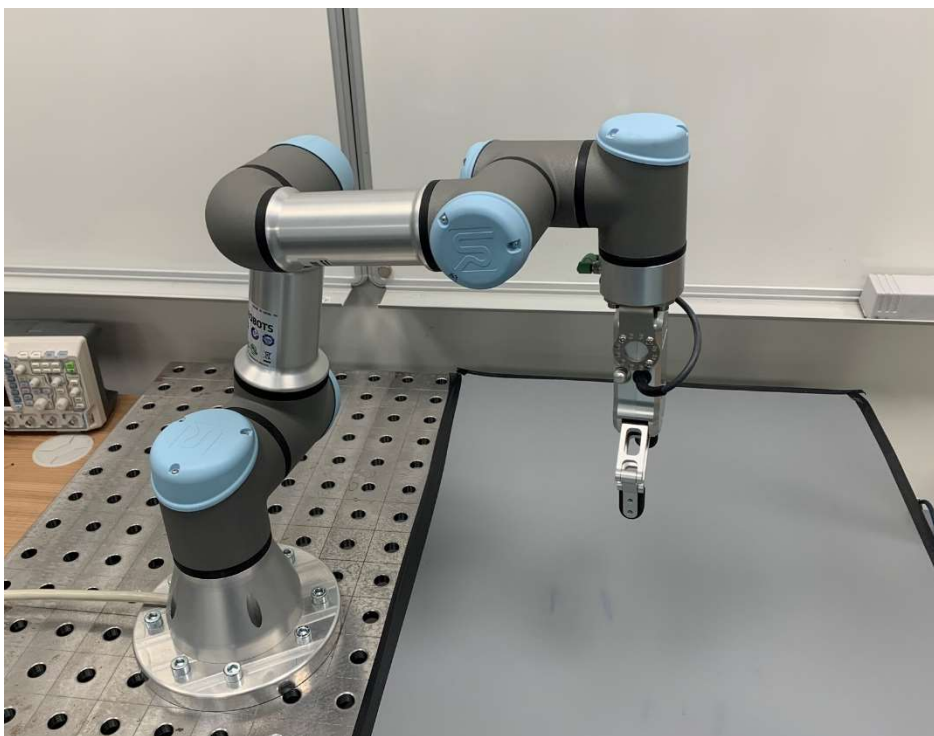


Obr. 10: UR+ Automatický šroubovací systém SPATZ [55]

Universal Robots je považován za hlavního hráče na poli kolaborativní robotiky díky jednoduché integraci doplňků a schopnosti kobotů efektivně spolupracovat s lidmi. Společnost klade velký důraz na snadnou programovatelnost a flexibilitu svých robotů. To umožňuje rychlou adaptaci na různé výrobní procesy [21].

2.5.1 UR3 CB3

V této práci je použit kobot UR3 CB3 (obr. 11), proto je blíže popsán. UR3 je kompaktní všestranný kobot navržený pro lehké montážní úkoly představený v roce 2008. Tento model dosahuje přesnosti $\pm 0,1$ mm, což umožňuje dostatečně spolehlivou opakovatelnost operací. S nosností 3 kg a dosahem 500 mm je ideální na práci v malých prostorách a je možné ho přimontovat přímo na pracovní stůl. Montáž je možná ve vertikální i horizontální poloze. Jeho hlavní části jsou vyrobeny z hliníku a polypropylenu. S výslednou hmotností 11 kg se jedná o velmi lehký kobot. Obsluha ho může programovat pomocí teach pendantu, kterým je vybaven. Výrobce deklaruje očekávanou životnost stroje na 35 000 pracovních hodin, to odráží jeho odolnost a dlouhodobou spolehlivost. Nachází uplatnění v široké škále aplikací, od montáže a manipulace s materiálem po přesné polohování [22].



Obr. 11: Kolaborativní robot UR3 CB3 v robotické laboratoři

3 HAPTICKÁ ZAŘÍZENÍ

3.1 Haptická zařízení – interakce člověk-počítač

Haptika se zabývá interakcí s prostředím a vnímáním informací pomocí hmatu. Haptická zařízení působí na hmatové receptory člověka aplikací síly, vibracemi nebo pohybem a tím předává uživateli informace o stavu vzdálených nebo virtuálních objektů. Toto působení vnějších elementů na hmatové receptory nazýváme haptická odezva. Pomocí odezvy získává uživatel přesnou představu o dění ve virtuálním nebo vzdáleném místě. To mu umožňuje lépe se orientovat v dané situaci. Interakce s haptickými zařízeními mohou být různě složité, od jednoduchého kliknutí počítačové myši až po simulaci chirurgických operací [23].

Pomocí haptické odezvy dokážeme intuitivně ovládat výpočetní techniku. Kliknutí počítačové myši nám dává jasně najevo, že byla akce úspěšně provedena. Tato jednoduchá zpětná vazba přispívá k plynulosti využívání digitálních zařízení. Dnes jsou interakce s haptickými zařízeními složitější a už dávno se nejedná o pouhé kliknutí. Haptická zařízení jsou složité přístroje vybaveny řadou mechanických a elektrických komponent. Tyto komponenty poskytují sofistikovanou zpětnou vazbu jako jsou variabilní vibrace, dynamické odporové síly nebo simulace textury. Díky těmto vjemům může uživatel interagovat s virtuálními předměty, a přitom cítit jejich povrch a váhu. Využití si sofistikovaná haptická zařízení našla hlavně v simulačních systémech v leteckém, automobilovém a lékařském sektoru, stejně jako ve virtuální realitě (VR) a v oblasti zábavního průmyslu. V konečném důsledku zvyšují imerzi, která vede ke zlepšení kvality výcviku v simulačních systémech [24]. Při použití v zábavním sektoru vede k hlubšímu ponoření do virtuálního světa a lepšímu celkovému zážitku.

Ovládání haptického zařízení probíhá následujícím způsobem. Mozek vydá impuls, který spustí pohyb svalů a tím i pohyb haptického zařízení. Tento pohyb je detekován senzory integrovanými v haptickém zařízení. Signály z těchto senzorů jsou přeneseny do počítače, kde jsou zpracovány. Po zpracování počítač odesílá signály zpět do haptického zařízení, které prostřednictvím akčních členů, jako jsou motory, reaguje na původní pohyby uživatele. Tyto akční prvky generují odezvu, která simuluje fyzické působení v reálném, virtuálním nebo vzdáleném prostředí. Haptické zařízení přenáší tyto informace zpět uživateli, který je vnímá skrze hmatové receptory. Tyto vjemy jsou poté přeneseny do mozku, kde dochází k jejich finální interpretaci.

Haptické zařízení *sigma.7* (obr. 12), které již bylo zmíněno v kapitole 2.3, disponuje 7 stupni volnosti (6os a možnost uchopení) a velmi přesnou silovou zpětnou vazbou (force-feedback). S kompenzací gravitačních sil se hodí pro složité aplikace, zejména ve vyspělých leteckých, medicínských a průmyslových oblastech. Systém podporuje konfiguraci pro bimanuální ovládání. Je to jediné komerčně prodávané zařízení tohoto typu s certifikací pro použití ve vesmíru, kde je testováno na Mezinárodní vesmírné stanici pro použití na ovládání vesmírných vozidel [15; 25].



Obr. 12: Haptické zařízení sigma.7 [56]

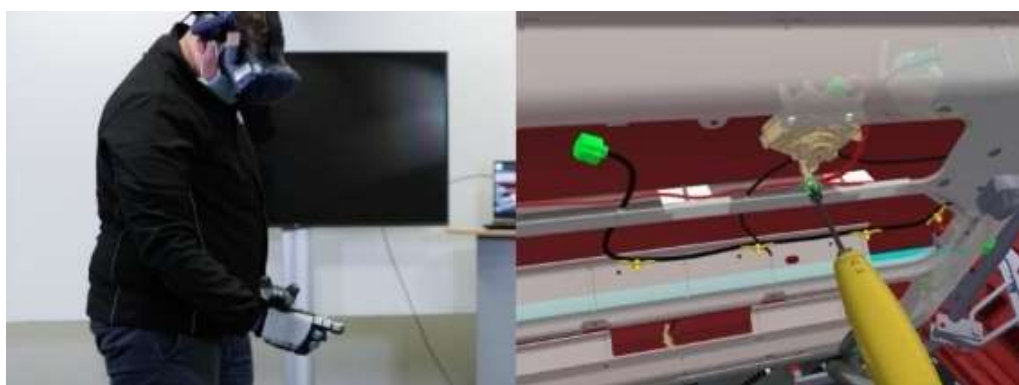
Zařízení *Touch* (obr. 13) je haptické rozhraní určené pro profesionální použití v oblastech jako je výzkum a tvorba 3D modelů. Jeho klíčovou vlastností je motorizovaná implementace zpětné vazby síly, která uživatelům umožňuje hmatově vnímat a manipulovat s virtuálními objekty ve 3D prostoru. Zařízení *Touch* lze využít v široké škále aplikací, včetně simulací, tréninků, hodnocení dovedností, virtuální montáže, řízení robotů, návrhu rozhraní strojů a rehabilitace. Vývojářský software *OpenHaptics* umožňuje vývoj a nasazení haptických programů pro *Touch*. Vývojářům tento software otevírá prostor pro experimentování s novými nápady a tvorbu produktů s haptickou podporou. S šestistupňovým polohovým snímáním a trojstupňovou silovou zpětnou vazbou *Touch* poskytuje realistickou interakci s virtuálním prostředím [26].



Obr. 13: Haptické zařízení Touch 3D Systems [57]

3.2 Příklady využití haptických zařízení

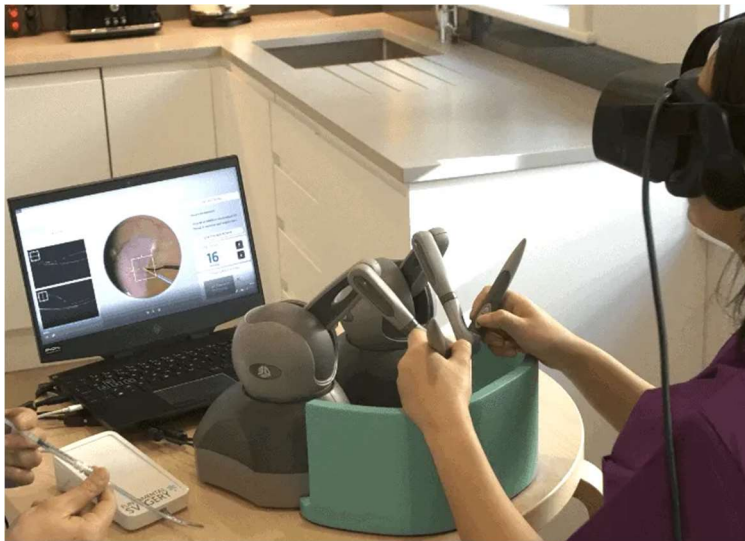
Ve školicím středisku Volkswagen Commercial Vehicles byly integrovány VR a haptické technologie do předvýrobního tréninkového programu s cílem zvýšit efektivitu a umožnit zaměstnancům trénovat z libovolného místa. Použitím haptických rukavic *SenseGlove Nova* ve spojení s VR (obr. 14) se podařilo zlepšit realismus tréninku a přirozenost interakce s virtuálním prostředím. To přináší významné výhody oproti tradičnímu VR tréninku s ovladači. Chrání drahé vybavení před poškozením, ale také poskytuje uživatelům možnost fyzicky cítit a manipulovat s virtuálními objekty. Uživatelé považují práci s haptickými rukavicemi za realističtější ve srovnání s tradičními ovladači [27].



Obr. 14: Účastník tréninkového programu a jeho pohled [58]

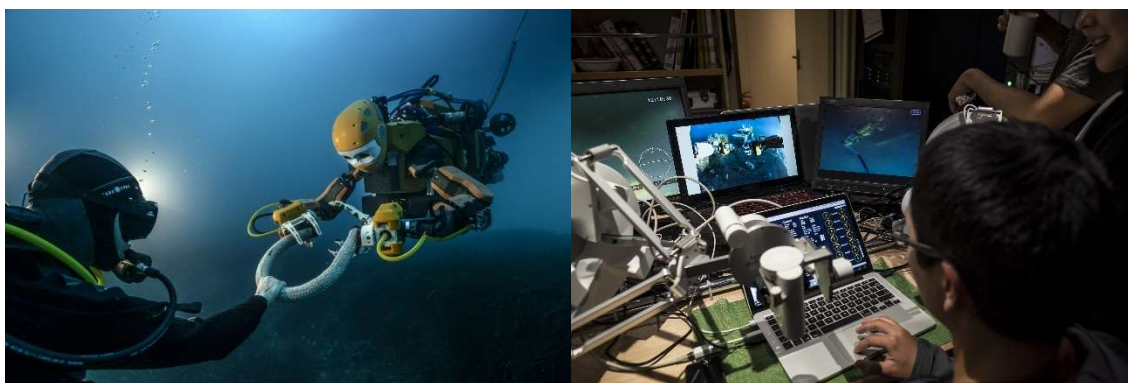
Haptická zařízení představují klíčový prvek v rámci simulačních systémů využívaných pro vzdělávací účely v medicíně. Chirurgický simulátor *HapticVR* (obr. 14), který využívá haptický interface *Touch*, jenž byl popsán v předcházející části této práce,

umožňuje efektivní simulaci silové zpětné vazby. Tento simulátor kombinuje virtuální realitu s hmatovou odezvou. Začleněním hmatového smyslu se studenti a doktoři mohou naučit, jak chirurgické nástroje interagují s lidskou tkání. Tímto způsobem se studenti mohou získat praktické zkušenosti v kontrolovaném prostředí [28].



Obr. 15: Chirurgický simulátor HapticVR [59]

OceanOne (obr. 16), vyvinutý ve Stanford Robotics Laboratory, je bimanuální robot určený pro podvodní průzkum, který svou první misi absolvoval při prozkoumávání vraku La Lune ve Středozemním moři v roce 2016. S použitím zařízení *sigma.7* v jeho haptickém rozhraní robot umožňuje pilotům ovládat manipulátory s vysokou přesností a citlivostí. Zařízení přináší nové možnosti pro bezpečný a efektivní podvodní výzkum a sběr vzorků. *OceanOne* přispívá k rozšíření našich možností pro exploraci a ochranu podvodního světa [29].



Obr. 16: OceanOne a jeho ovládání [60]

3.3 Využití 3D myši a SpaceMouse

3D myš je sofistikované vstupní zařízení, které umožňuje uživateli manipulaci a navigaci v trojrozměrném prostoru, ať už reálném či digitálním. Toto zařízení dovoluje interagovat s objekty a prostředími v přesně definovaných osách – X, Y, Z, RX, RY, RZ. Šest stupňů volnosti dovoluje myši nejen pohyb v prostoru, ale i rotaci kolem os. Toto zařízení si získalo širokou popularitu mezi uživateli softwaru pro 3D modelování. Konstrukteři a designéři využívají tuto myš pro zjednodušení manipulace s objekty a prostředím. Nalezla aplikaci rovněž v ovládní manipulátorů a robotických ramen. Mnoho výrobců robotů vybavuje teach pendanty právě 3D myšmi nebo joysticky pro ovládní pohybu robotů. Tento prvek se stal oblíbeným nástrojem v průmyslu pro intuitivnost ovládní a zrychlení práce.

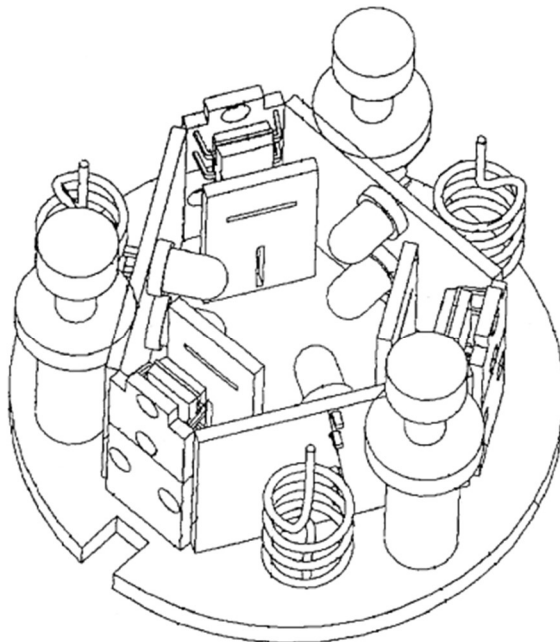


Obr. 17: Spacemouse Module [61]

V rámci této bakalářské práce byla pro ovládní kolaborativního robota UR3 CB3 zvolena a využita 3D myš *SpaceMouse Module* (obr. 17). Tento výběr byl motivován renomovanou pozicí výrobce, společnosti 3Dconnexions, která je vedoucím subjektem v tomto odvětví.

Základem fungování je dvanáct optoelektronických prvků, rozdělených do dvou rovin. Každá rovina obsahuje tři infračervené světlo vyzařující diody (ILED) a tři pozičně citlivé detektory (PSD) ve formě fotosensitivních diod. Tyto prvky jsou rozmístěny tak, aby každá ILED cílila přímo na odpovídající PSD v rámci stejné roviny, čímž tvoří šest nezávislých měřicích buněk. Mezi ILED a PSD je umístěna šterbinová clona, která slouží k regulaci množství světla dosahujícího PSD. Clony jsou orientovány kolmo k osám detektorů, což maximalizuje přesnost měření změn intenzity světla způsobených pohybem mezi dvěma objekty. ILED emituje světlo, které prochází šterbinovou clonou a je detekováno PSD. Detekce změn v intenzitě světla umožňuje určit relativní pohyb a polohu mezi světelným zdrojem a detektorem. Zařízení je schopné detekovat a kvantifikovat šest stupňů volnosti pohybu, translace ve třech lineárně nezávislých směrech a rotace kolem tří os.

Vracení do neutrální polohy je zajištěno pružinami, které zároveň dávají uživateli informaci o tom, jak moc je SpaceMouse vychýlena z neutrální polohy. Čím větší je vychýlení, tím větší sílu musí uživatel vyvinout na překonání pružin [30]. Na obr. 18 je vidět rozmístění jednotlivých komponent uvnitř zařízení.



Obr. 18: Rozložení komponent Spacemouse dle patentové dokumentace (upraveno autorem) [30]

SpaceMouse Module představuje průmyslovou variantu SpaceMouse zařízení, která jsou široce využívána konstruktéry, architekty a umělci pro práci s 3D softwarem. Průmyslové řešení disponuje zvýšeným stupněm ochrany proti prachu a vodě IP54. Výrobce tohoto zařízení nabízí tři komunikační rozhraní: UART⁴, USB⁵ a CANopen⁶. Širší výběr komunikačních rozhraní umožňuje jeho aplikaci v různých technologických prostředích. Pro naši aplikaci je ideální varianta SpaceMouse s USB protokolem, neboť počítač použitý pro práci se SpaceMouse Module je vybaven USB konektorem, Zvolením USB komunikačního rozhraní se eliminuje potřeba pořizování dalších adaptérů. Toto zařízení je kompatibilní s USB standardy 1.1 a 2.0. Tyto standardy zajišťují rychlosti přenosu dat 12 Mb/s a 480 Mb/s. Obě verze poskytují napájecí proud až do 500 mA při 5 V. USB kabel tohoto zařízení je vybaven třemi základními vodiči pro přenos dat a napájení. Navíc je vybaven stínícím vodičem, který slouží k ochraně proti elektromagnetickému rušení. Stínící vodič zvyšuje spolehlivost a kvalitu připojení [31].

⁴ UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) je hardware pro asynchronní sériovou komunikaci, který umožňuje přenos dat bez potřeby hodinového signálu. Používá se pro propojení mikrokontrolérů s dalšími zařízeními.

⁵ USB (Universal Serial Bus) je standardní sériová sběrnice pro připojení, komunikaci a napájení elektronických zařízení s počítači, umožňuje přenosy od 12 Mbps (USB 1.1) až po 40 Gbps (USB 4).

⁶ CANopen je komunikační protokol založený na Controller Area Network (CAN), používaný v automobilovém a průmyslovém sektoru pro spolehlivý přenos dat v reálné čase. Usnadňuje komunikaci a integraci v automatizačních systémech.

4 VÝVOJ PROGRAMU OVLÁDÁNÍ UR3 POMOCÍ SPACEMOUSE

4.1 Popis problému a cílů vývoje programu

V rámci této práce byl vyvinut program umožňující ovládání robota UR3 pomocí haptického zařízení SpaceMouse v reálném čase. SpaceMouse poskytuje vstupní data pro program, které reprezentují vychýlení myši oproti neutrálnímu stavu. Toto zařízení je připojeno k počítači pomocí USB konektoru typu A. Přenos dat probíhá prostřednictvím USB protokolu s rychlostí až 480 Mb/s, avšak SpaceMouse využívá pro svůj přenos pouze 5,6 kb/s vzhledem k vzorkovací frekvenci 100 Hz, dle specifikací oficiálního distributora, a velikosti datového balíčku 56 bitů [31]. Nicméně testování ukázalo, že SpaceMouse je schopné poskytovat data s frekvencí 125 Hz. Pro získání kompletních dat je nutné data vyžádat dvakrát (jednou pro data translace a podruhé pro data rotace), efektivní frekvence datového toku je 63 Hz. Tato frekvence se ukázala být dostačující pro plynulé ovládání robota. Při návrhu programu byla tato specifika zohledněna.

Protože formát výstupních dat ze SpaceMouse nesplňuje požadavky formátu dat pro ovládání robota UR3, bylo nezbytné data transformovat do kompatibilního formátu. Komunikace mezi SpaceMouse a robotem UR3 je realizována v reálném čase, aby uživatelské interakce se SpaceMouse byly ihned reflektovány na pohybu robota. Tím vznikl nárok na rychlé zpracování a přenos dat.

Cílem vývoje bylo vytvoření programu, který splní následující kritéria.

- Umožní komunikaci mezi SpaceMouse připojeným k počítači přes USB a robotem UR3.
- Zpracuje a transformuje vícerozměrné vstupy ze SpaceMouse do kompatibilního formátu pro robotické API UR3.
- Zajistí dostatečnou rychlost zpracování dat a reakce programu a to nejlépe do 75ms (viz. kapitola 4.4), aby bylo možné dosáhnout plynulého ovládání robota v reálném čase.
- Zajistí plynulou, intuitivní a bezpečnou interakci mezi uživatelem a robotem.

4.2 Technologie a knihovny použité pro vývoj

Python

Python je interpretovaný, objektově orientovaný, vysokoúrovňový programovací jazyk. Dnes je jedním z nejoblíbenějších programovacích jazyků na světě díky svým vlastnostem, které ho dělá ideálním pro široké spektrum programovacích úkolů. Syntaxe Pythonu je jednoduchá a intuitivní. Tato charakteristika činí Python velmi přístupným jazykem, ideálním pro začínající programátory. Klade velký důraz na čitelnost

a srozumitelnost kódu a udržitelnost aplikací. Disponuje rozsáhlou podporou knihoven a frameworků. Vývojáři mohou používat pokročilé nástroje bez potřeby vyvíjet vše od začátku. Python je navíc multiplatformní jazyk. Aplikace napsané v Pythonu lze bez úprav spustit na různých operačních systémech, jako jsou Windows, macOS a Linux. Tato vlastnost usnadňuje distribuci softwaru a snižuje náklady na jeho vývoj a údržbu [32].

PyUSB

PyUSB je knihovna pro programovací jazyk Python, která umožňuje snadný přístup k systému Universal Serial Bus (USB) počítače. Lze pomocí ní snadno zajistit komunikaci mezi počítačem a zařízením používající USB protokol. Původně sloužila jako jednoduchý obal pro knihovnu libusb, ale od verze 1.0 došlo k významným změnám. PyUSB se transformovala na bohaté API, které je snadné používat. Tato knihovna je vyvíjena a testována primárně na Linuxu a Windows, ale měla by fungovat bez problémů na jakékoli platformě, která podporuje Python ve verzi 3.7 a vyšší. Instalace PyUSB se obvykle provádí pomocí správce balíčků pip [33]. Tato knihovna byla nezbytná pro zajištění komunikace mezi SpaceMouse a počítačem.

UR_RTDE

UR_RTDE (Real Time Data Exchange) je protokol pro synchronizaci externích aplikací s řídicím systémem robotů Universal Robots. Tento protokol umožňuje komunikaci prostřednictvím standardního TCP/IP spojení, aniž by docházelo k narušení reálného času provozu kontroléru. UR_RTDE je dostupná pro jazyky Python a C++. Tato knihovna byla použita pro ovládání a monitorování robotického ramene UR3 Python programem [34]. Instalace knihovny UR_RTDE je podrobně popsána v návodu dostupném na stránkách GitLabu [35].

VMware Workstation

VMware Workstation je software, který umožňuje uživatelům spouštět více operačních systémů jako virtuální stroje na jednom fyzickém počítači. Tento produkt je určený pro software vývojáře, kteří potřebují testovat aplikace běžící na různých platformách a konfiguracích v izolovaném prostředí. Umožňuje současné spuštění více virtuálních strojů s různými operačními systémy [36]. Tento program je nutný pro spuštění simulátoru URSim, jelikož simulace běží na linuxové platformě.

URSim

URSim je off-line simulátor navržený pro testování programů pro robotická zařízení vyráběná společností Universal Robots. Tento simulátor poskytuje uživatelům virtuální prostředí, kde mohou bezpečně vyvíjet, testovat a optimalizovat robotické aplikace před jejich skutečným nasazením v reálném prostředí. Webové stránky, z nichž lze simulátor stáhnout, zahrnují také podrobný návod na jeho spuštění prostřednictvím VMware Workstation [37]. Využití této simulace bylo zásadní pro vývoj programu na ovládání robota UR3 pomocí SpaceMouse.

4.3 Detailní přehled architektury a funkcionality programu

Tento program, zaměřený na ovládání robotického ramene pomocí haptického zařízení SpaceMouse, je navržen v modulární struktuře, která umožňuje snadné rozšiřování funkcionalit. Program je strukturován do 5 modulů, které zařizují inicializaci a komunikaci se SpaceMouse skrze USB protokol, zpracování dat a ovládání a monitorování robotického ramene.

Inicializace USB

Využívá funkce knihovny PyUSB, která je popsána v přechchozí části práce. USB zařízení je vyhledáno pomocí konkrétních Vendor ID a Produkt ID. Tyto ID umožňují jednoznačně identifikovat zařízení, které má být připojeno. Zařízení nastaví do konkrétní konfigurace. SpaceMouse má pouze jednu konfiguraci, a to přenos dat do hostitele.

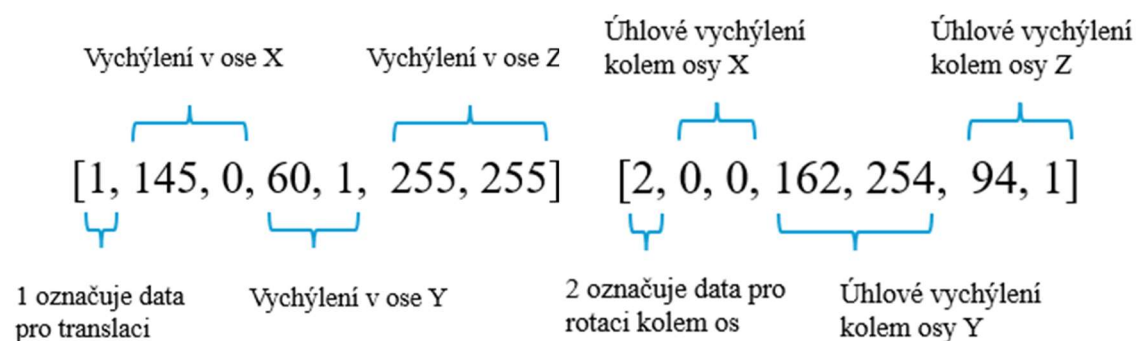
Inicializace UR3

Program inicializuje dvě rozhraní pomocí knihoven `rtde_control` a `rtde_receive`. `RTDEControllInterface` slouží k odesílání příkazů do řídicího systému robota, zatímco `RTDEReceiveInterface` umožňuje příjem dat z robota.

Ovládání UR3

Tento modul obsahuje logiku fungování celého modulárního systému. program je založen na nekonečné smyčce typu *while*, která pokračuje v provozu až do momentu, kdy je ukončena uživatelem. Nejprve jsou čteny data ze SpaceMouse. V rámci jedné iterace smyčky je nutné provést dvojité čtení, aby byla získána kompletní sada dat.

SpaceMouse požadavky na příjem dat zpracovává tak, že odpovídá jedním polem dat, které buď obsahuje informace o translační pozici, nebo o rotační pozici 3D myši (obr. 19). Každé pole dat se skládá ze sedmi hodnot. První hodnota určuje, zda se jedná o translaci (hodnota 1) nebo rotaci (hodnota 2). Následujících šest hodnot poskytuje buď souřadnice polohy nebo údaje o natočení.



Obr. 19: Příklad neupravených dat odeslaných ze SpaceMouse

Data jsou reprezentována ve formátu 16bitových celých čísel, kde každá hodnota je zakódována ve dvou bytech. Pro každou hodnotu je nižší byte uložen jako první a vyšší byte jako druhý. V každém přeneseném datovém bloku ze SpaceMouse jsou obsaženy tři takovéto dvojice, které společně popisují buď pozici nebo natočení zařízení.

V rámci zpracování dat získaných ze SpaceMouse jsou tato data transformována do formátů, které jsou intuitivnější pro programátora. Konkrétně je každá dvojice bytů převedena na celočíselné hodnoty v rozmezí od -350 do 350 (obr. 20). Tato transformace umožňuje efektivnější manipulaci a další zpracování, které je podrobněji popsáno v následující kapitole 4.4 zabývající se filtrací dat.

[145, 316, -255] [0, -350, 350]

Obr. 20: Upravená data do celočíselných hodnot

Po filtraci jsou data opět přeformátována pro potřeby specifické funkce *jogStart* z knihovny UR_RTDE. Tato funkce ovládá směr a rychlost robotického ramene. V této fázi jsou data pro translaci převedena na hodnoty mezi -1 a 1, zatímco data pro rotaci jsou transformována do rozmezí od $-\pi$ do π (obr. 21). Tyto hodnoty odpovídají maximálním rychlostním limitům kobotu. Rychlosti translace jsou udávány v metrech za sekundu (m/s) a rychlosti rotace v radiánech za sekundu (rad/s).

[0.414..., 0.903..., -0.708..., 0, -3.14..., 3.14...]

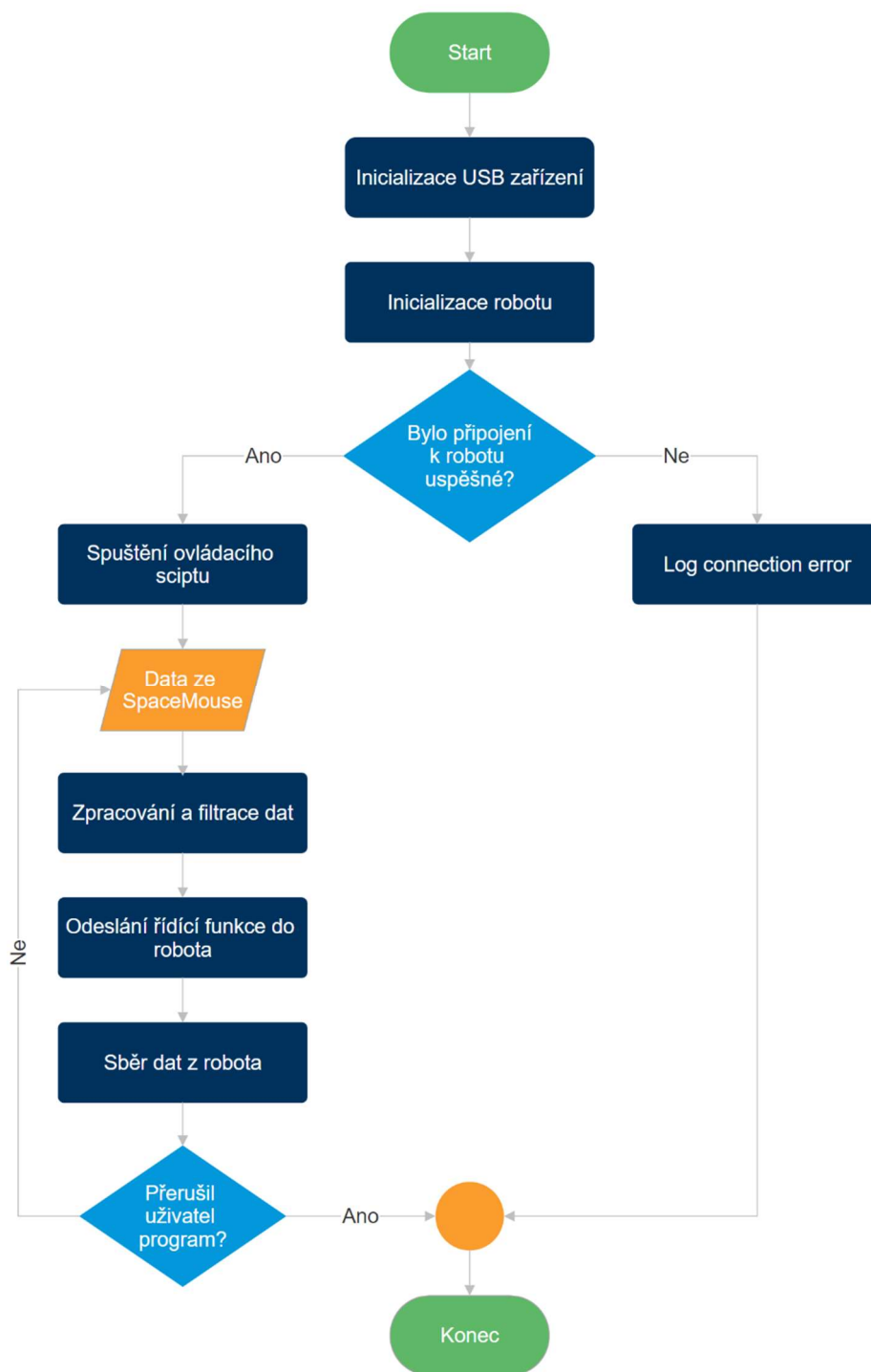
Obr. 21: Data vhodná pro funkci *jogStart*

Data získaná ze SpaceMouse jsou reprezentována ve formě vektoru $[x, y, z, rx, ry, rz]$, kde hodnoty x, y a z představují souřadnice vektoru rychlosti translačního pohybu a hodnoty rx, ry, rz reprezentují souřadnice vektoru rychlosti rotačního pohybu. Program obsahuje softwarová omezení, která definují maximální možné rychlosti, aby se zabránilo případnému poškození robota a bylo dosaženo přívětivějšímu ovládání. Avšak, tato omezení vedla k tomu, že nebyl plně využit celý rozsah pohybových možností, které SpaceMouse nabízí. Aby bylo možné efektivně využít celý rozsah zařízení byl implementován koeficient rychlosti.

Data ve správném formátu $[x, y, z, rx, ry, rz]$ jsou předána funkci pro pohyb robota *jogStart*. Každou iterací while cyklu funkce získává nový vektor rychlostí. Funkce rovněž umožňuje nastavit zrychlení robota a referenční souřadný systém, podle kterého se má robot pohybovat. Na výběr jsou souřadné systémy efektoru, základny, nebo si lze definovat vlastní souřadný systém. V tomto programu byl zvolen pohyb vzhledem k souřadnému systému základny. Vývojový diagram programu je na obr. 22.

Konfigurace

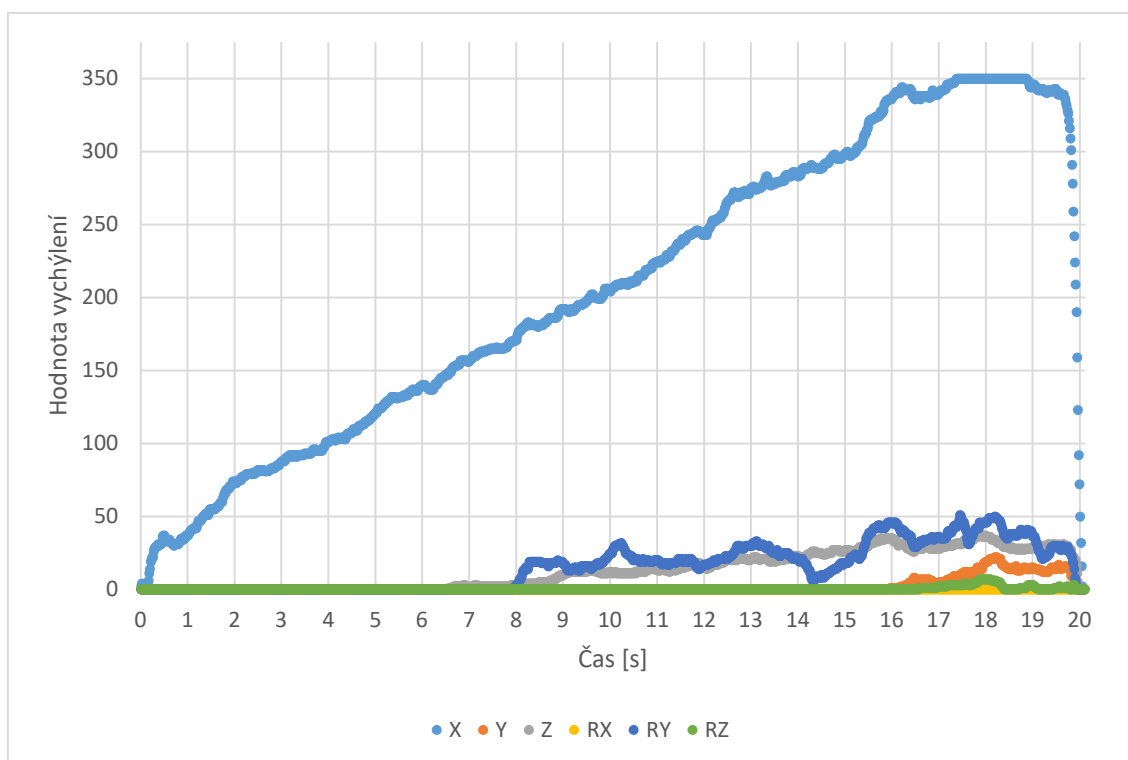
Hlavní funkcí modulu „config“ je centralizace a správa konfiguračních nastavení systému. Modul umožňuje snadné nastavení parametrů pro iniciaci komunikace s USB zařízeními a řídicím systémem robota. V modulu lze definovat provozní charakteristiky robota, konfigurovat parametry pro filtry, které jsou podrobně popsány v následující kapitole.



Obr. 22: Vývojový diagram

4.4 Výběr vhodného filtru

Jedním z významných problémů, který se vyskytl během testování, byla obtížnost provádění pouze translační nebo pouze rotační pohyb bez nežádoucího pohybu nebo natočení efektoru (obr. 23). Pro řešení této problematiky bylo zavedeno pásmo necitlivosti okolo nulové hodnoty, ta odpovídá neutrální poloze SpaceMouse. Toto pásmo umožňuje uživateli provádět čistě translační pohyb bez nechtěného natočení efektoru a naopak. Kromě řešení uvedeného problému, pásmo necitlivosti minimalizuje vliv otřesů stolu, na kterém je SpaceMouse umístěn, neboť tyto otřesy, pokud zůstávají v rámci pásma necitlivosti, nejsou převáděny na pohyb robota.

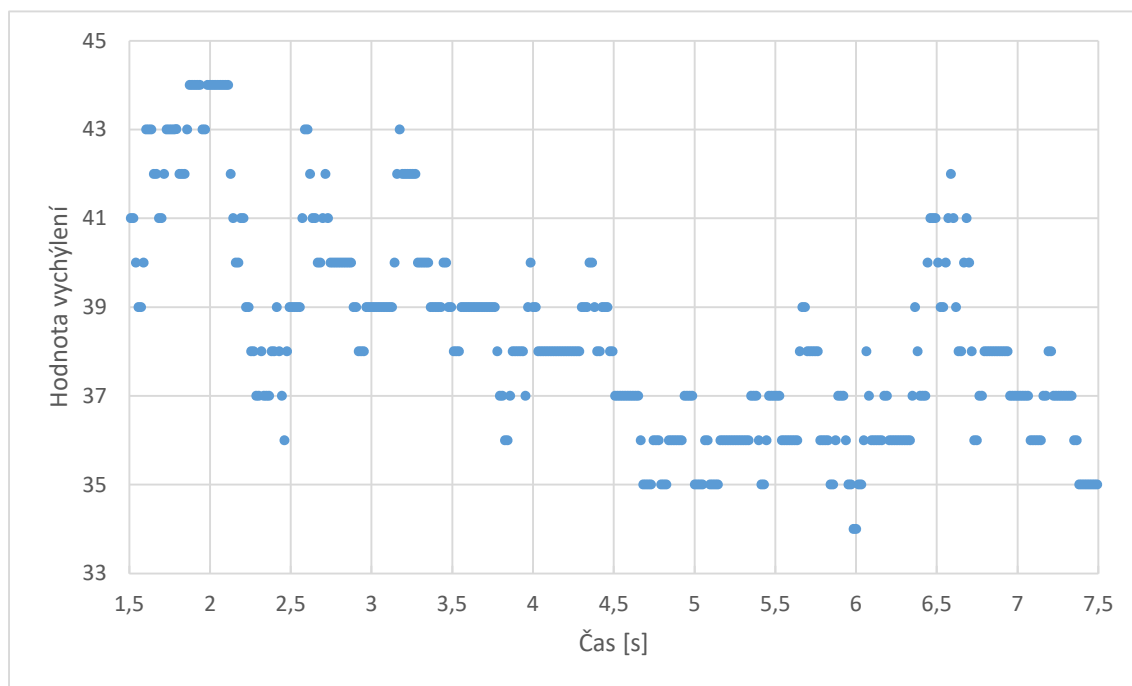


Obr. 23: Nežádoucí vychýlení os při translačním pohybu v ose X

Z grafu (obr. 23) je zřejmé, že při pokusu o realizaci translačního pohybu výhradně v ose X je možné tento pohyb udržet až do vychýlení SpaceMouse do přibližně poloviny rozsahu. Nízký zpětný odpor pružin v této oblasti, umožňuje uživateli vyvinout jen mírnou sílu k překonání tohoto odporu. Uživatel je schopen ve spodní oblasti rozsahu citlivě manipulovat se zařízením. V horní části rozsahu je však odpor pružin vyšší, a uživatel již není schopen udržet vychýlení výhradně v jedné ose. Důvodem je, že vyvíjení větší síly k překonání odporu pružin vede ke snížení uživatelské schopnosti citlivého ovládní.

Druhým problémem, který byl identifikován, je šum (obr. 24) způsobený lidskou interakcí. Lidská ruka jako ovládací nástroj není zcela stabilní a do signálu vnáší šum. Tento šum může mít za následek nepřesnosti ve výstupních signálech. Šum negativně

ovlivňuje přesnost a plynulost ovládání robota. Pro řešení tohoto problému bylo nutné implementovat filtry šumu. Tyto filtry jsou navrženy tak, aby potlačily šum vnesený uživatelem a zároveň zachovaly užitečný signál potřebný pro hladké ovládání robota.



Obr. 24: Šum signálu

V návrhu řídicího systému pro ovládání robota je implementován výsledný filtr, jenž se skládá z pásma necitlivosti a filtru šumu. Cílem pro pásmo necitlivosti je umožnit uživatelům provádět izolované pohyby, buď pouze v translaci, nebo pouze v rotaci, a to bez nechtěného pohybu v ostatních osách. Pro filtr šumu je požadavek, aby reagoval na uživatelské vstupy v co nejkratším čase. Reakce systému začíná být člověkem pozorovatelná kolem 75-100 ms od uživatelského vstupu [38]. Latence celého systému by tedy neměla překročit tuto hodnotu. Tato rychlá odezva je důležitá pro udržení pocitu okamžité reaktivity, který je nezbytný pro intuitivní interakci s robotem. Kromě rychlosti reakce filtr musí efektivně redukovat šum, který může vzniknout v důsledku lidského vstupu. Tento šum může zahrnovat drobné, neúmyslné pohyby nebo třes ruky uživatele.

4.4.1 Pásmo necitlivosti

Filtr s pásmem necitlivosti se používá k ignorování malých změn nebo oscilací v signálu, které jsou považovány za nevýznamné nebo za šum. Tento zpracování je zvláště užitečný v aplikacích, kde je důležité reagovat pouze na významné změny v datech, čímž se snižuje zbytečná reaktivita systému a šetří se výpočetní zdroje.

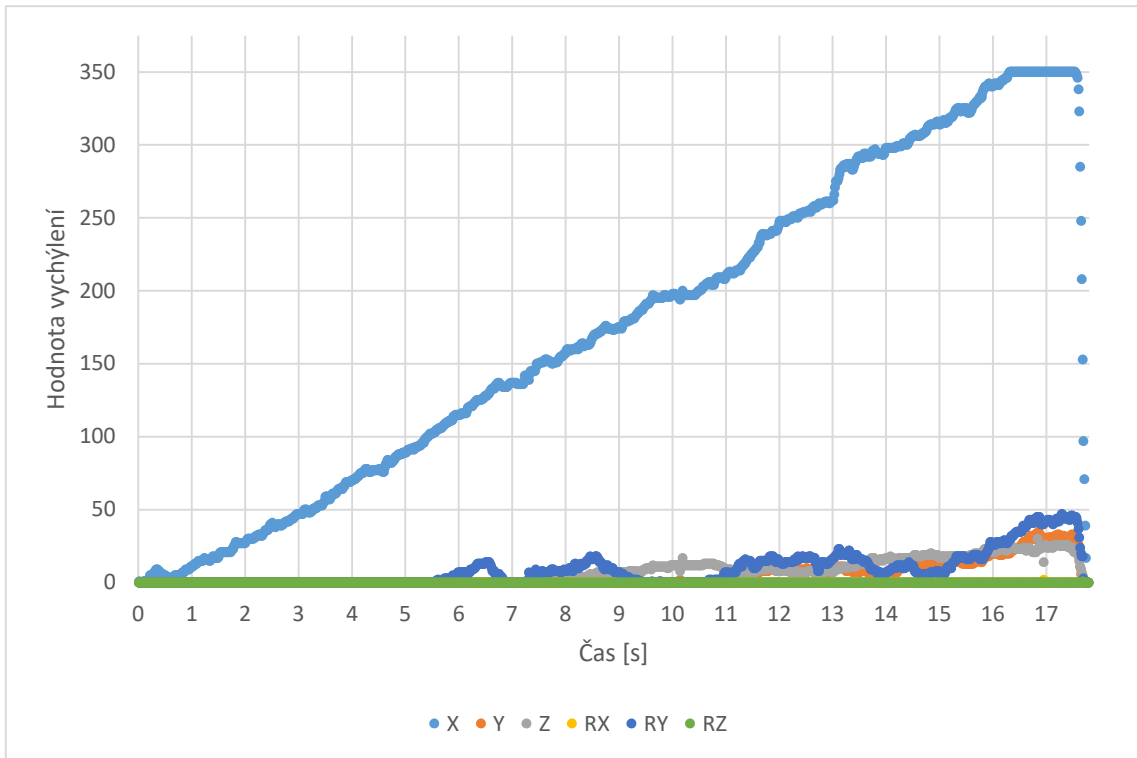
Pracuje tak, že nastaví určitý práh, který určuje minimální změnu v signálu, jež musí být detekována, aby byla považována za významnou. Pokud změna signálu zůstane v rámci tohoto prahu, je ignorována a neprovádí se žádná akce. Pokud změna překročí tento práh, filtr reaguje aktualizací výstupu. V tomto případě využijeme pásmo necitlivosti kolem 0. Všechny hodnoty, které se budou nacházet ve vyznačené oblasti jsou převedeny na 0, hodnoty mimo rozsah zůstávají beze změny. Toto chování je matematicky popsáno rovnicí (1).

$$y[n] = \begin{cases} 0 & \text{pokud } |x[n]| \leq \delta \\ x[n] & \text{pokud } |x[n]| > \delta \end{cases} \quad (1)$$

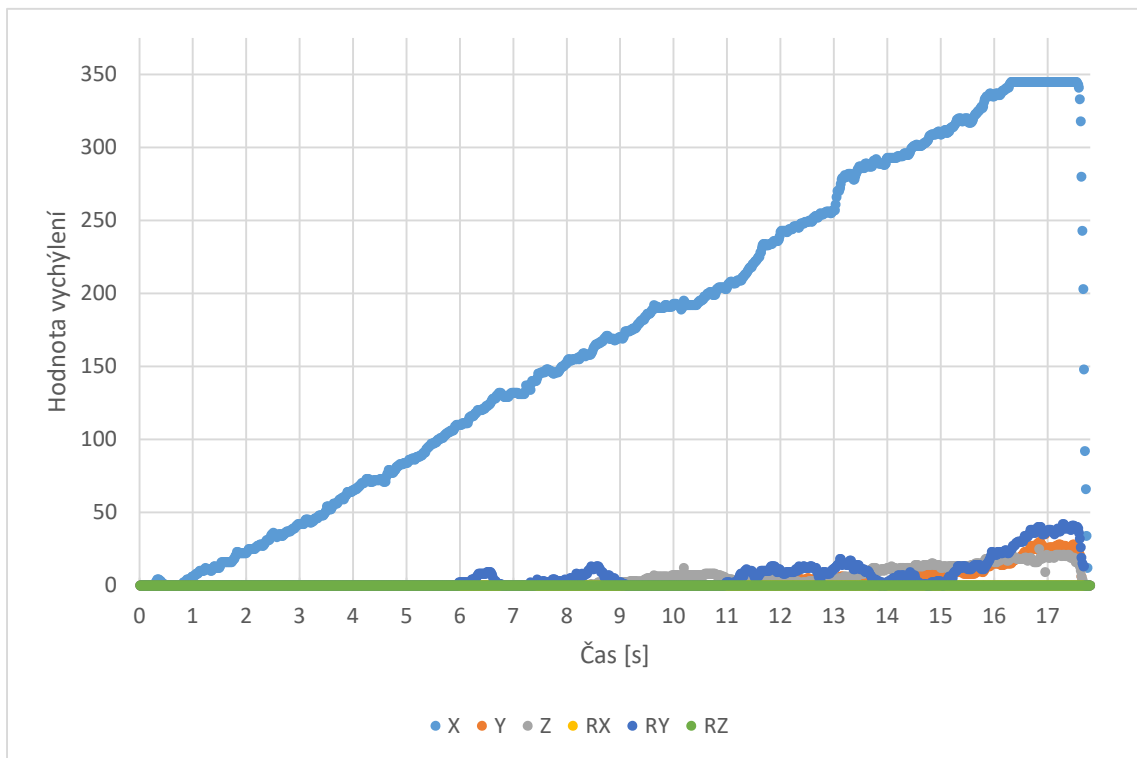
kde $y[n]$ je výstupní hodnota filtru v čase n
 δ je práh pásma necitlivosti
 $x[n]$ je vstupní signál v čase $[n]$

Porovnání různých velikostí pásma necitlivosti

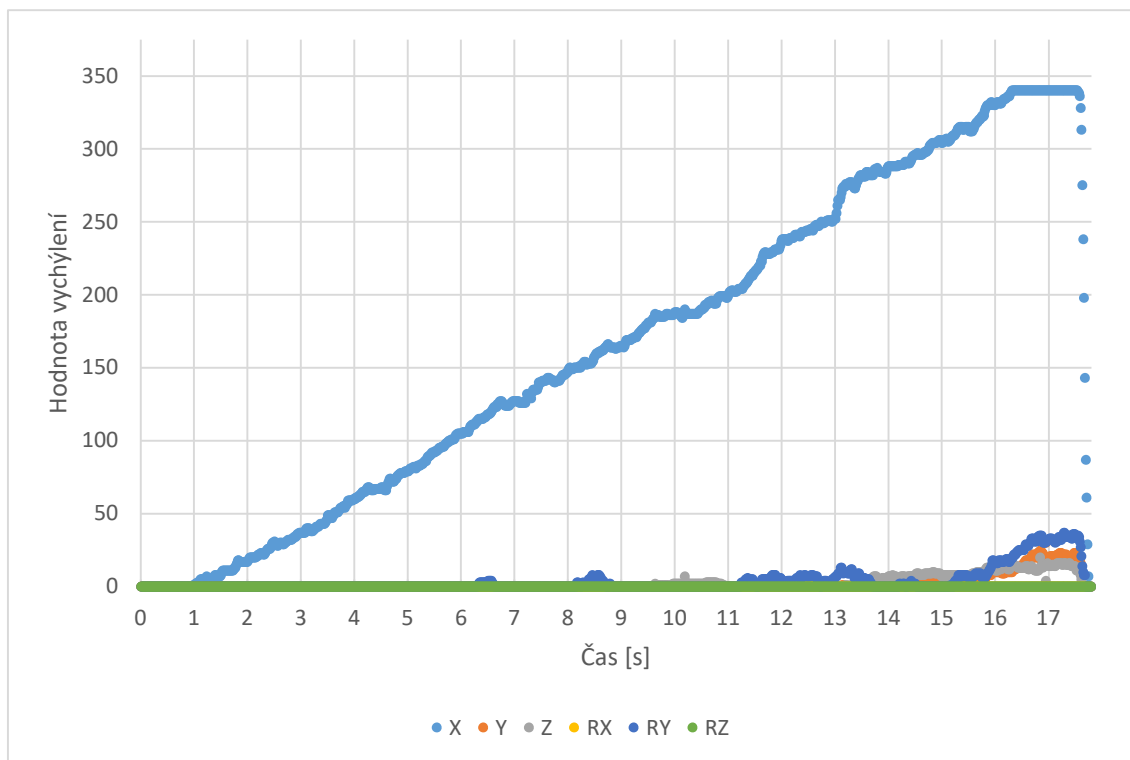
Pro srovnání účinnosti různých velikostí pásma necitlivosti byl využit experiment s použitím zařízení SpaceMouse. Během testování bylo zařízení vychylováno z neutrální pozice do maximálního vychýlení, přičemž se kladl důraz na to, aby se vychýlení omezovalo pouze na osu X. Na data získaná tímto způsobem byly následně aplikovány filtry pásma necitlivosti o velikostech 5, 10, 20, 30 a 40 (obr. 25-29).



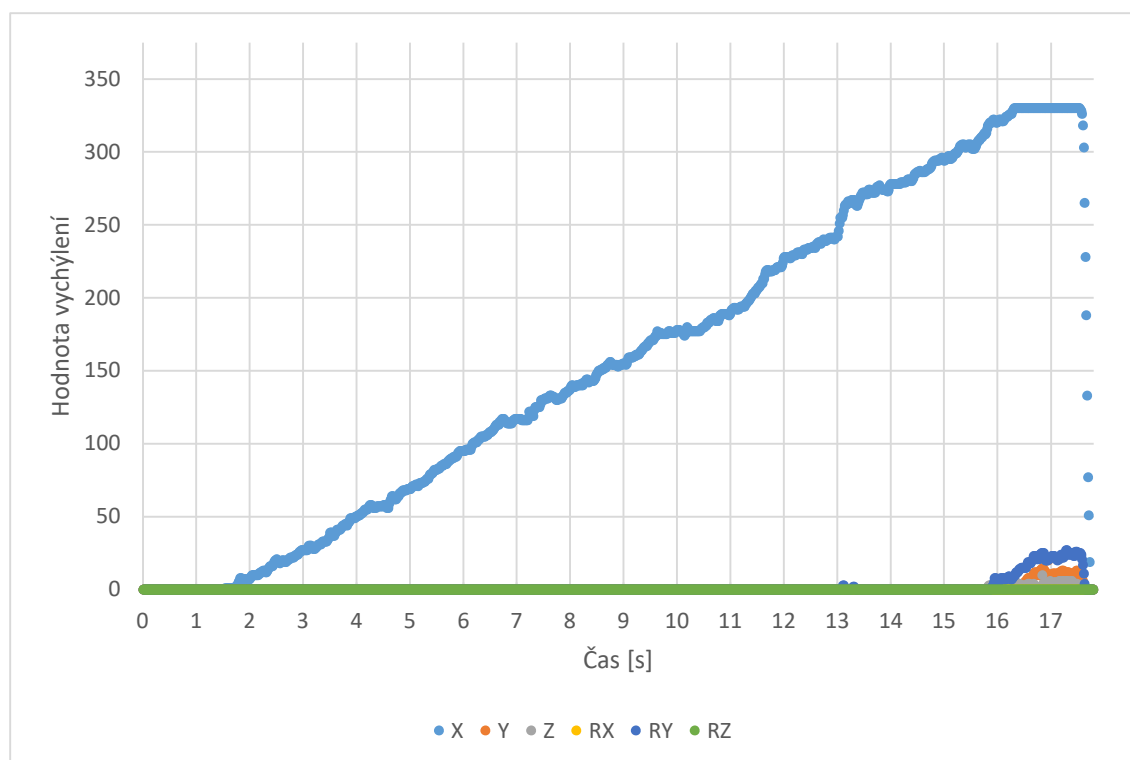
Obr. 25: Pohyb v ose x, velikost pásma necitlivosti 0



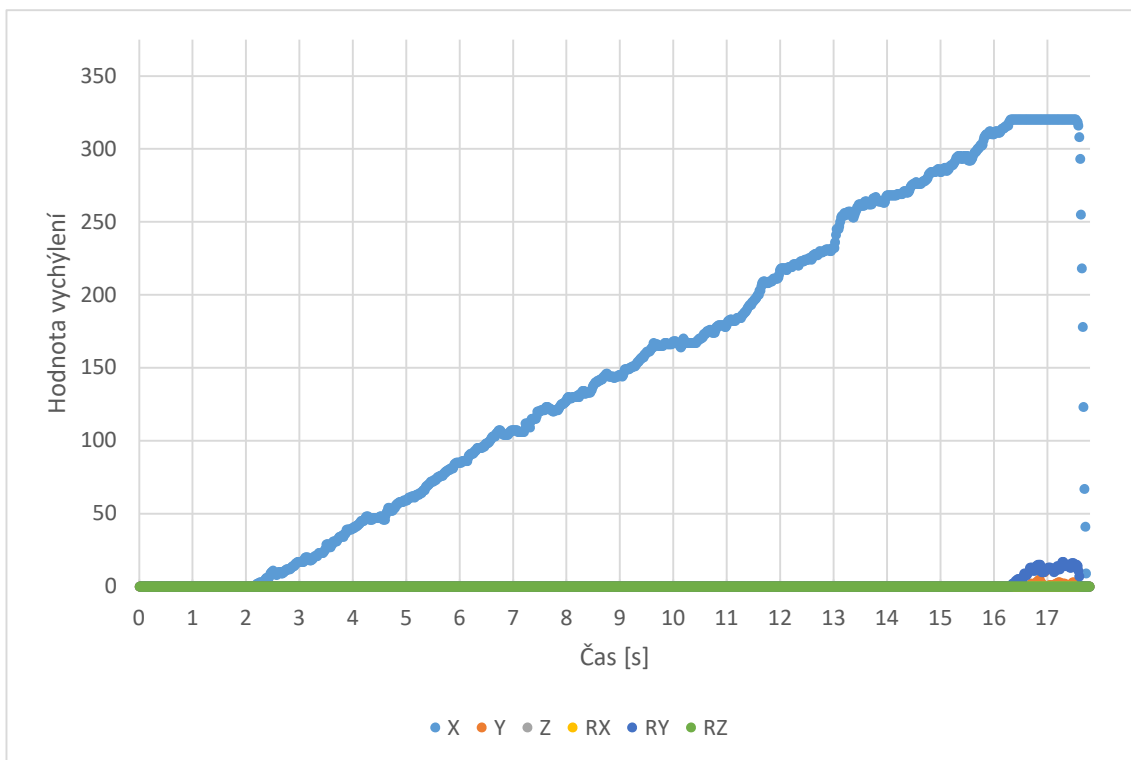
Obr. 26: Pohyb v ose X, velikost pásma necitlivost 5



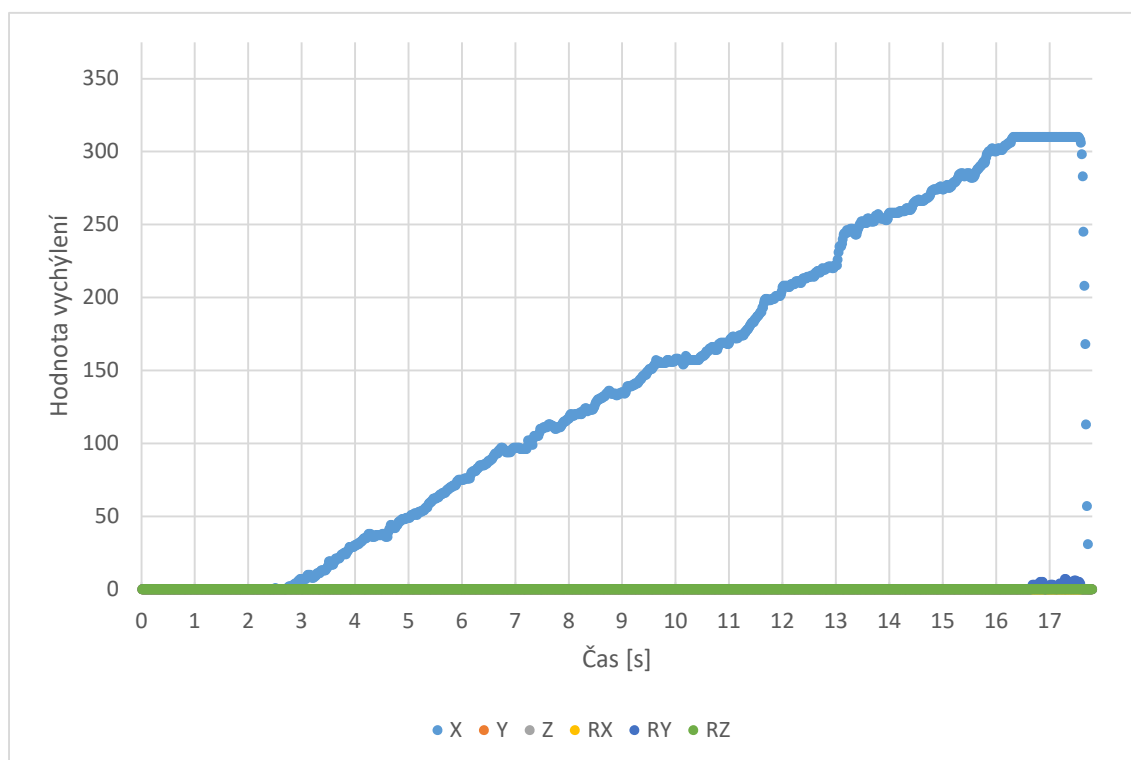
Obr. 27: Pohyb v ose X, velikost pásma necitlivosti 10



Obr. 28: Pohyb v ose X, velikost pásma necitlivosti 20



Obr. 30: Pohyb v ose X, velikost pásma necitlivosti 30



Obr. 29: Pohyb v ose X, velikost pásma necitlivosti 40

Tento filtr vyřešil problém s nechtěnými pohyby v natočení nebo jiných osách při translačním pohybu. Z grafů můžeme vyčíst, že čím větší je pásmo necitlivosti, tím lépe můžeme provádět izolovaný pohyb. Nicméně, větší pásmo necitlivosti také přináší významnou nevýhodu, a to redukci efektivního rozsahu reakce SpaceMouse. S rostoucí velikostí pásma necitlivosti je nutné zařízení vychýlit více z neutrální polohy, aby bylo možné detekovat jakékoli vychýlení. Jak bylo popsáno výše, s větším vychýlením se ztrácí přesnost pohybu, jelikož uživatel musí překonat sílu pružin, které vrací SpaceMouse do neutrální polohy. Získané data naznačují, že optimální kompromis mezi izolací pohybu a citlivostí zařízení představuje pásmo necitlivosti velikosti 20. Stejný experiment proběhl i pro izolovaný pohyb v jiných osách včetně izolované rotace s velmi podobnými výsledky.

4.4.2 Filtrace šumu

Šum v uživatelských vstupech není výrazný, proto bylo rozhodnuto zahrnout jednoduché filtrační techniky, jako je klouzavý průměr, exponenciální klouzavý průměr a filtr s konečnou impulsní odezvou.

Filtr klouzavého průměru

Filtr pomocí klouzavého průměru je jednoduchý typ lineárního filtru používaný k vyhlazení časových řad dat tím, že redukuje náhodný šum a krátkodobé fluktuace, zatímco zachovává dlouhodobé trendy. Tento nástroj je populární v signálovém zpracování, ekonomii, a finanční analýze.

Klouzavý průměr pracuje tak, že vypočítá aritmetický průměr určitého počtu posledních vzorků dat. Vzorky jsou „klouzavé“, což znamená, že s každým novým bodem dat, který přijde, je nejstarší bod dat vyřazen a nový bod je zahrnut do průměru. Klouzavý průměr popisuje rovnice (2).

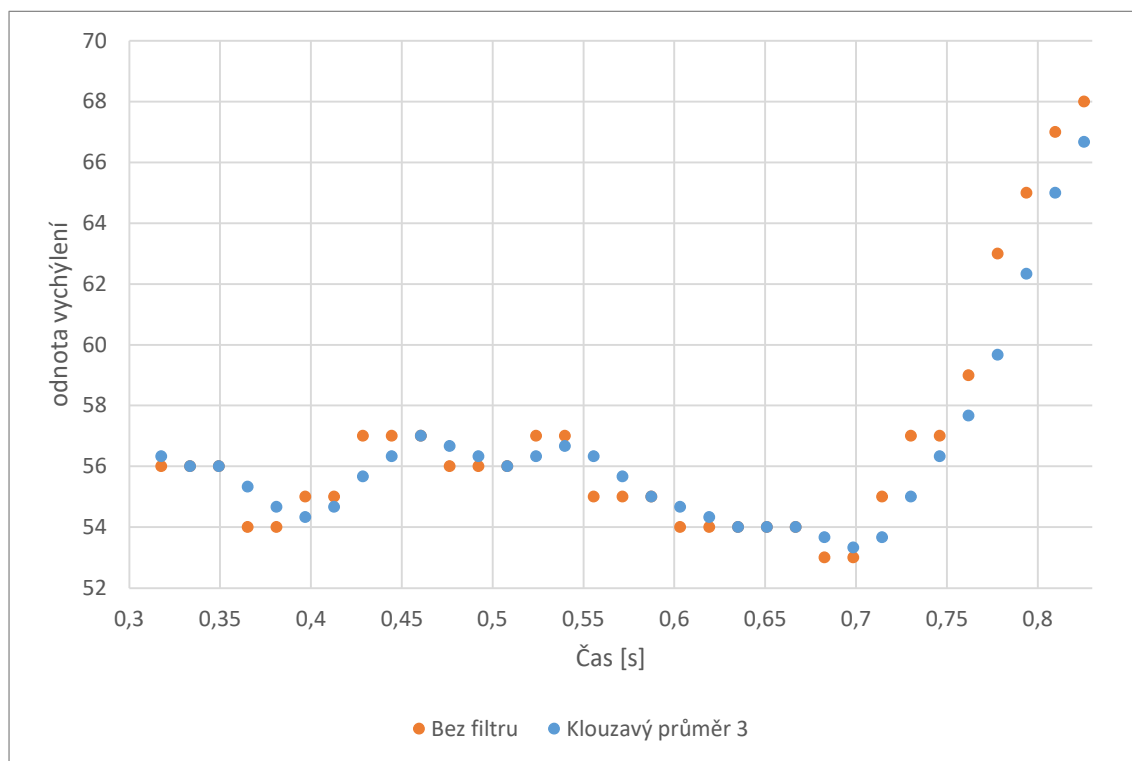
Filtr je snadno pochopitelný a implementovatelný. Je účinný v odstraňování vysokofrekvenčního šumu. Zavádí zpoždění do signálu, které je přímo úměrné velikosti okna M . Větší okno poskytuje hladší výstup, ale způsobuje větší zpoždění. Nedokáže dobře zpracovat signály s ostrými přechody, protože může dojít k jejich zploštění. Není vhodný pro aplikace, kde je důležité zachovat přesné časování nebo rychlé změny v signálu [39].

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k] \quad (2)$$

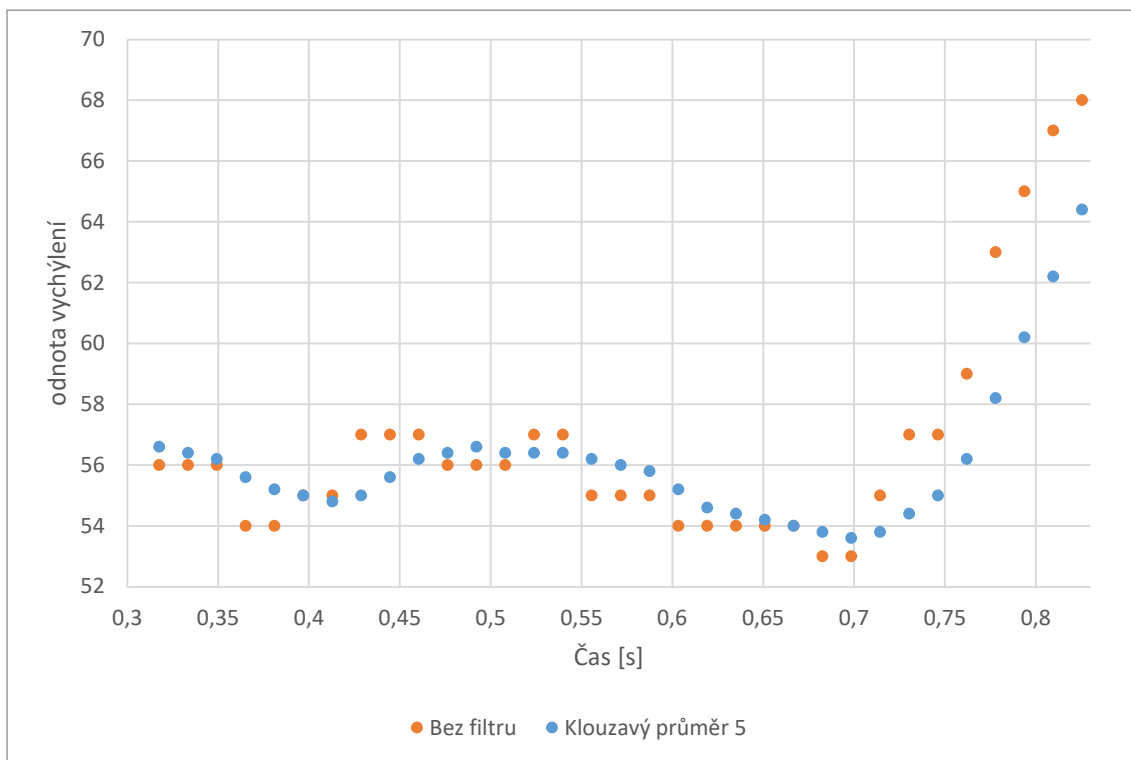
kde $y[n]$ je výstup filtru v čase n
 M je počet vzorků v klouzavém průměru
 $x[n-k]$ je vstupní signál v čase $[n-k]$

Výběr počtu vzorků M

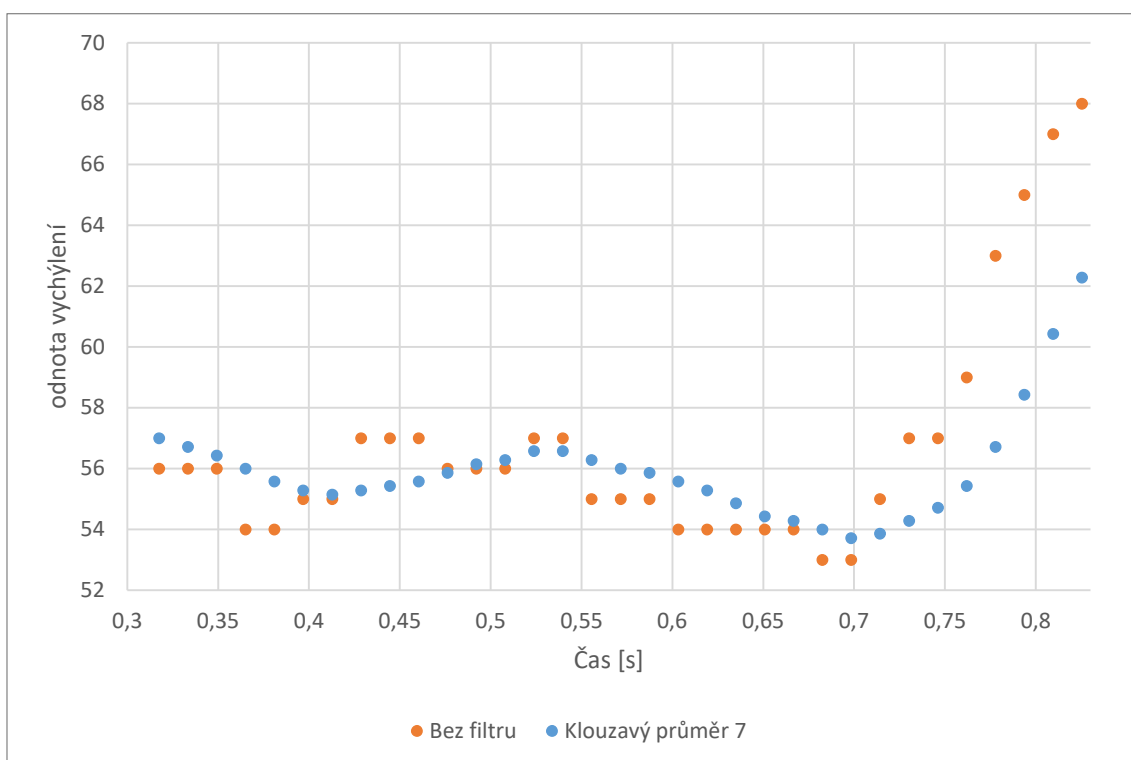
Proces výběru optimální počtu vzorků pro klouzavý průměre byl založen na experimentálním přístupu, při kterém byla analyzována data obsahující části se šumem a části vyžadující rychlou reakci filtru na změny signálu. Konkrétně byly testovány velikosti oken 3, 5, 7 a 10 vzorků (obr. 31-34). Všechny velikosti oken byly testovány v řídicím programu v simulaci i v laboratoři na UR3. Hlavním cílem bylo posoudit, jak efektivně jednotlivé délky oken redukuje šum, a zároveň jak rychle jsou schopny reagovat na změny v signálu, tak aby uživatel nepozoroval zpoždění při změně signálu.



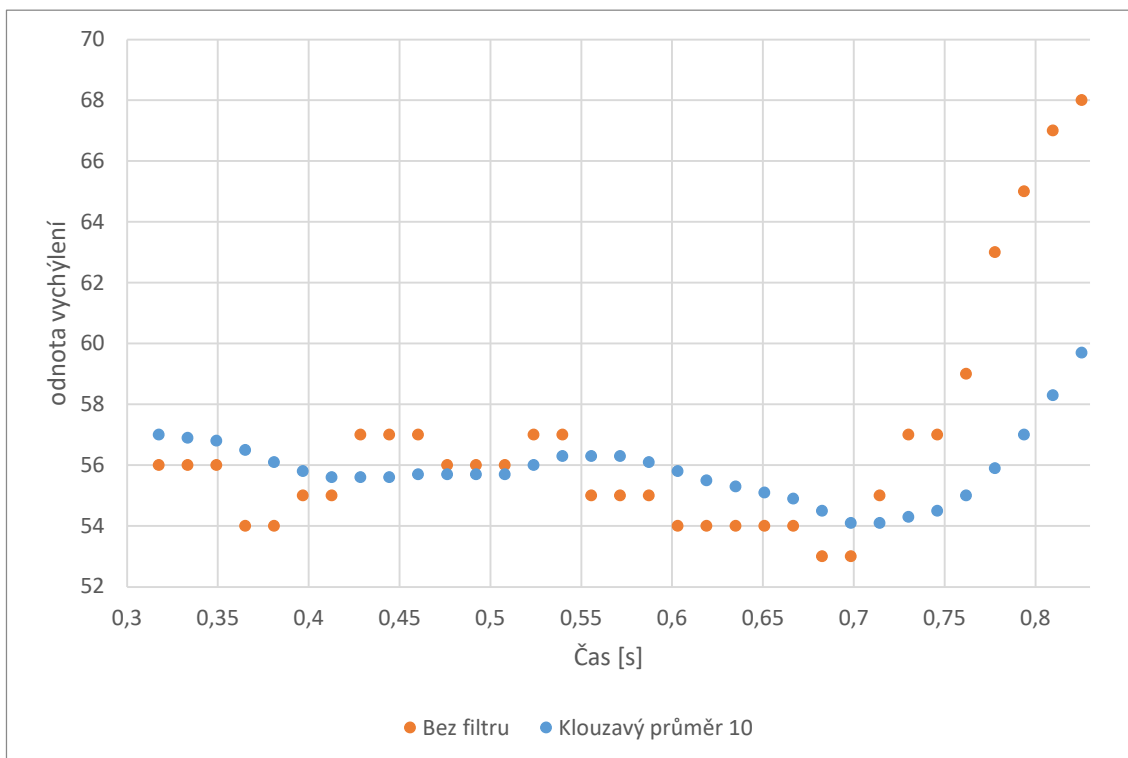
Obr. 31: Porovnání nefiltrovaného signálu s filtrem klouzavého průměru interval 3



Obr. 32: Porovnání nefiltrovaného signálu s filtrem klouzavého průměru interval 5



Obr. 33: Porovnání nefiltrovaného signálu s filtrem klouzavého průměru interval 7



Obr. 34: Porovnání nefiltrovaného signálu s filtrem klouzavého průměru interval 10

Z výsledků je patrné, že delší okno lépe redukuje šum, zatímco kratší okno zaručuje rychlejší odezvu na změnu signálu. Bylo nezbytné najít kompromis mezi těmito vlastnostmi filtru. Hlavním požadavkem bylo zachovat pocit uživatele, že ovládání robota probíhá v reálném čase, což vyžaduje minimalizaci zpoždění. Testy provedené v simulaci a laboratoři ukázaly, že při použití okna o velikosti 10 došlo k patrnému zpoždění. Latence lze odhadnout dle vzorce (3).

$$\tau = \frac{M - 1}{2f} \quad (3)$$

kde τ je latence [s]
 M je počet vzorků
 f je vzorkovací frekvence [Hz]

Při počtu 10 prvků v okně bylo zpoždění zhruba 71 ms, což bylo téměř u limitu maximální doporučené odezvy pro aplikace běžící v reálném čase stanovené na 75-100 ms. Navíc je třeba zohlednit, že uvedené tato hodnota představuje pouze latenci samotného filtru a je nutné k němu připočítat další zpoždění, jako např. přenos signálu z počítače do řídicí jednotky a následné zpracování v řídicí jednotce.

Na základě těchto zjištění bylo rozhodnuto použít filtr s délkou okna 7. Zpoždění tohoto okna je přibližně 48 ms. Toto zpoždění poskytuje dostatečnou rezervu pro zpracování dalších procesů a zároveň efektivně snižuje šum.

Filtr exponenciálního klouzavého průměru (EMA)

Exponenciální klouzavý průměr je typ lineárního u, který se používá k vyhlazování datových řad. Redukuje vliv starších datových bodů exponenciálně a je tedy více reaktivní na nedávné změny v datech než jednoduchý klouzavý průměr.

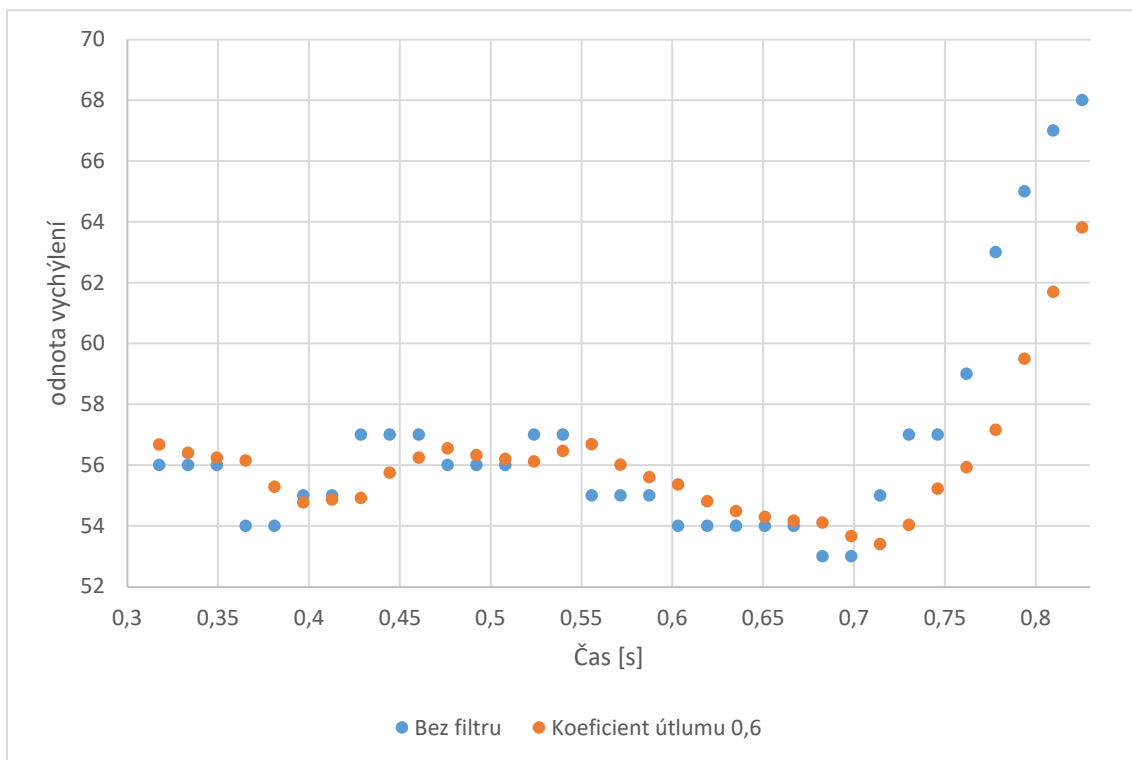
Exponenciální klouzavý průměr, popsáný vztahem (4), upřednostňuje novější data s použitím hladicího faktoru α , který postupně snižuje váhu starších vzorků. Tím umožňuje filtru reagovat rychleji na aktuální změny v datech oproti jednoduchému klouzavému průměru. Vyšší hodnoty parametru α mohou vést ke zvýšenému zpoždění. Důležité je zvolit hodnotu hladicího faktoru α , aby nedošlo k nadměrné reaktivitě nebo zbytečnému zpoždění ve výsledném filtru [40].

$$y[n] = \alpha x[n] + (1 - \alpha) \cdot y[n - 1] \quad (4)$$

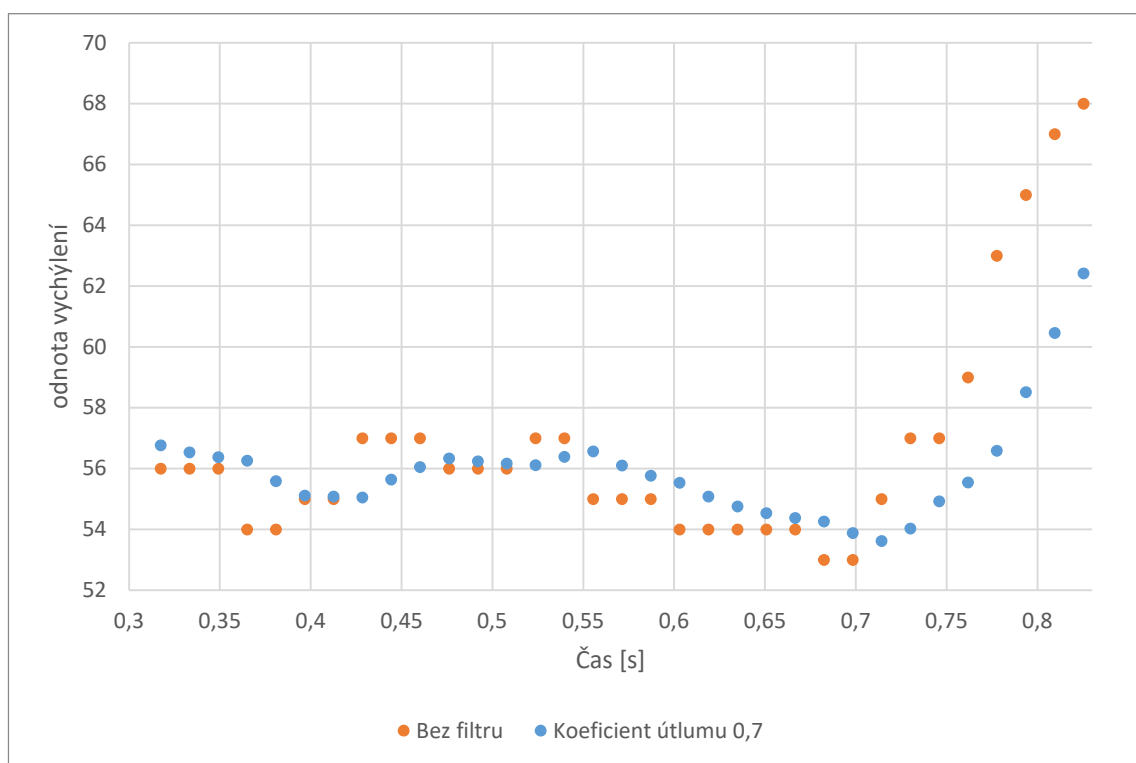
kde $y[n]$ je výstup filtru v čase n
 $x[n]$ je vstupní signál v čase n
 α je koeficient útlumu, typicky v rozmezí $0 < \alpha \leq 1$.

Výběr koeficientu útlumu

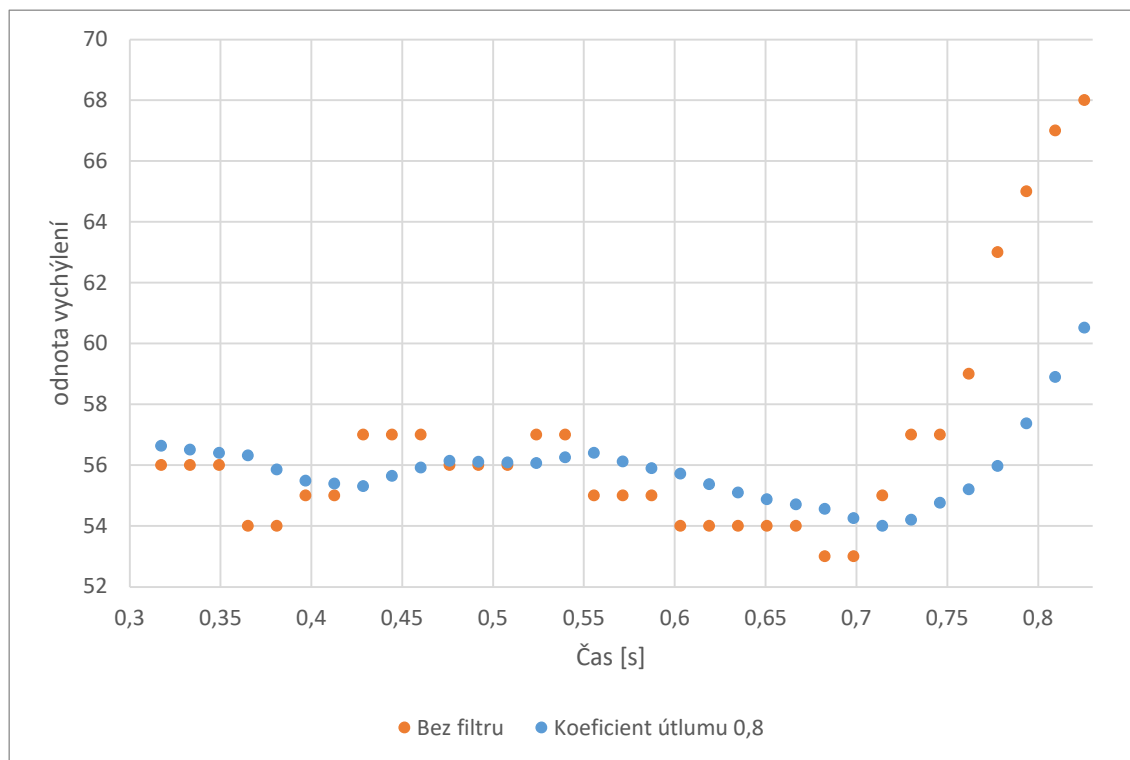
Výběr koeficientu útlumu pro filtr exponenciálního klouzavého průměru proběhl experimentálním přístupem. V rámci tohoto procesu byla využita identická sada dat, která byla použita při výběru délky okna klouzavého průměru. Analyzovaly se různé hodnoty koeficientu v rozmezí od 0 do 1, s krokem 0,1, za účelem identifikace optimálního nastavení. V simulaci a laboratorních testech byly testovány koeficienty z užšího výběru, 0,6; 0,7; 0,8 a 0,9. Ostatní hodnoty byly vyřazeny, protože nedostatečně filtrovaly šum. Stejně jako u předchozího výběru se sledovala redukce šumu a rychlost reakce na změnu signálu (obr. 35-38), aby nedocházelo k zaznamenanému zpoždění ve zpracování signálu.



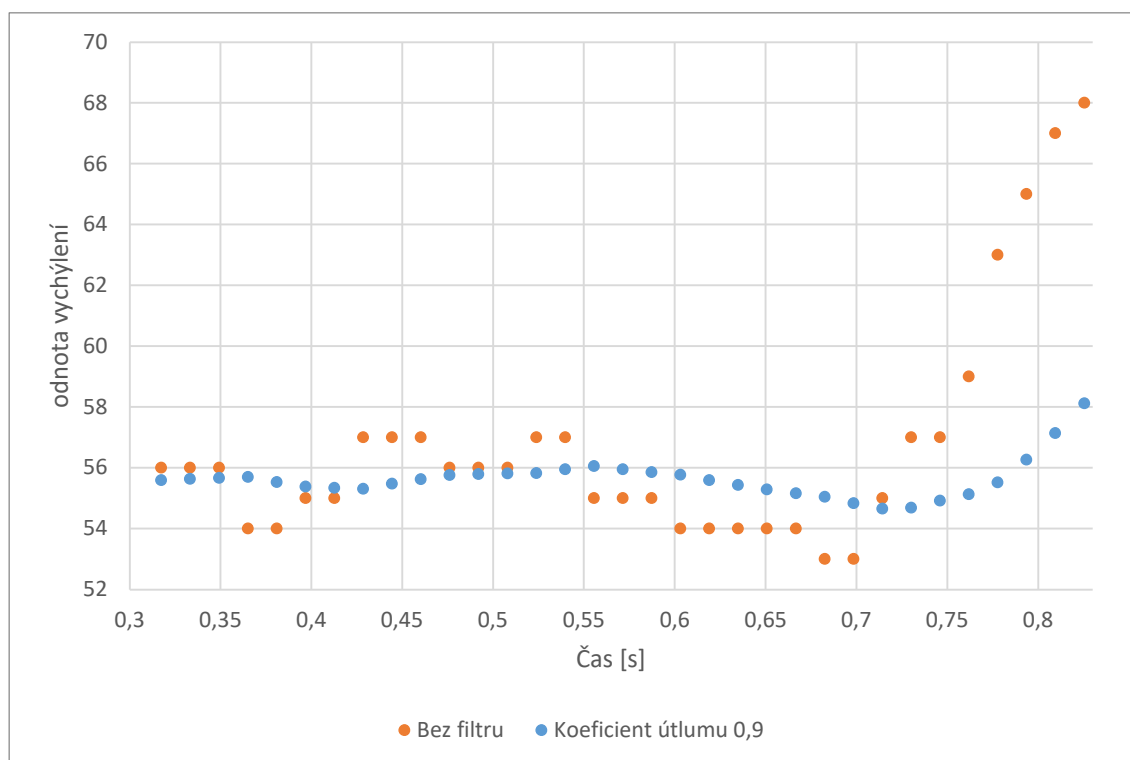
Obr. 35: Porovnání nefiltrovaného signálu s EMA filtrem – koeficient útlumu 0,6



Obr. 36: Porovnání nefiltrovaného signálu s EMA filtrem – koeficient útlumu 0,7



Obr. 37: Porovnání nefiltrovaného signálu s EMA filtrem – koeficient útlumu 0,8



Obr. 38: Porovnání nefiltrovaného signálu s EMA filtrem – koeficient útlumu 0,9

Během testování filtrů exponenciálních klouzavých průměrů bylo zřejmé, že vyšší hodnoty koeficientu útlumu efektivně redukuje šum, avšak zároveň se projevuje jejich omezená schopnost rychle reagovat na náhlé změny signálu. Naopak nižší hodnoty koeficientu zajišťují výraznou reaktivitu filtru, avšak nedostatečně zabraňují šumovým artefaktům. Zpoždění tohoto filtru lze odhadnout vztahem (5).

$$\tau = \frac{1}{(1 - \alpha) \cdot f} \quad (5)$$

kde τ je latence [s]
 α je koeficient útlumu
 f je vzorkovací frekvence [Hz]

Tab. 1: Časy zpoždění podle koeficientů útlumu EMA filtru

| Koeficient útlumu | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| Zpoždění [s] | 0,040 | 0,053 | 0,079 | 0,159 |

Z tabulky 1 je patrné, že z výběru musíme vyloučit hodnoty 0,8 a 0,9. Koeficient 0,9 nesplňuje požadavek na limit minimálního času odezvy 75-100 ms a zpoždění koeficientu 0,8 je v rozsahu, kdy latence může být pozorovatelná. To potvrdily i testy v simulaci a v robotické laboratoři, kdy při zkoušce těchto 2 koeficientů bylo zpoždění rozpoznatelné uživatelem.

Na základě těchto zjištění byl vybrán koeficient útlumu 0,7 pro filtr s exponenciálním klouzavým průměrem. Filtr s tímto koeficientem nabízí kompromis mezi vyfiltrováním šumu a dostatečně rychlé odezvě na změnu signálu.

Filtr s konečnou impulsní odezvou (FIR)

Je typ digitálního filtru, který se vyznačuje tím, že jeho impulzní odpověď je konečná, což znamená, že se po určitém čase vrátí na nulu a zůstane nulová. FIR filtry jsou vždy stabilní, protože impulzní odpověď se po konečném čase ztratí. Byla použita lineární varianta filtru popsána rovnicí (6).

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} b[k] \cdot x[n-k] \quad (6)$$

kde $y[n]$ je výstup filtru v čase $[n]$
 $x[n-k]$ je vstupní vzorek v čase $[n-k]$
 N je počet koeficientů filtru
 $b[k]$ jsou koeficienty filtru, které určují jeho charakteristiku

Pro správnou implementaci filtru bylo zváženo několik faktorů. Jedním z nich je počet koeficientů. Na základě orientačního výpočtu zpoždění, pomocí vztahu (3), pro počet koeficientů v rozmezí 3 až 10, se jako optimální možnost ukázal počet 8 koeficientů (tab. 2). Zpoždění pro 8 koeficientů činí 56 ms, což nám poskytuje dostatečnou rezervu pro zpoždění, které mohou způsobit další procesy [41].

Tab. 2: Časy zpoždění podle počtu koeficientů FIR filtru

| N | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Zpoždění [s] | 0,0317 | 0,0397 | 0,0476 | 0,0556 | 0,0635 | 0,0714 |

Dalším důležitým faktorem byla hodnota koeficientů. Součet hodnot koeficientů musí být roven jedné, aby nedocházelo k zesilování nebo zeslabování signálu. Hodnoty koeficientů byly určeny pomocí Hammingova, Hanningova, Blackmanova, Kaiserova a trojúhelníkového okna (tab. 3). Tyto hodnoty byly vypočteny pomocí Python scriptu a knihovny Scipy. Tímto způsobem byly zjištěny optimální konfigurace filtrů pro počet koeficientů $N = 8$. Jednotlivé grafy pro typy oken lze nalézt na obr. 39-43.

Okenní funkce jsou matematické funkce, které se aplikují na signál při výpočtu koeficientů filtru. Hlavním účelem okenních funkcí je zmírnit spektrální únik⁷. Tyto funkce upravují amplitudu signálu tak, aby hladce klesala na nulu na okrajích okna, čímž se minimalizuje únik signálu do nežádoucích frekvencí.

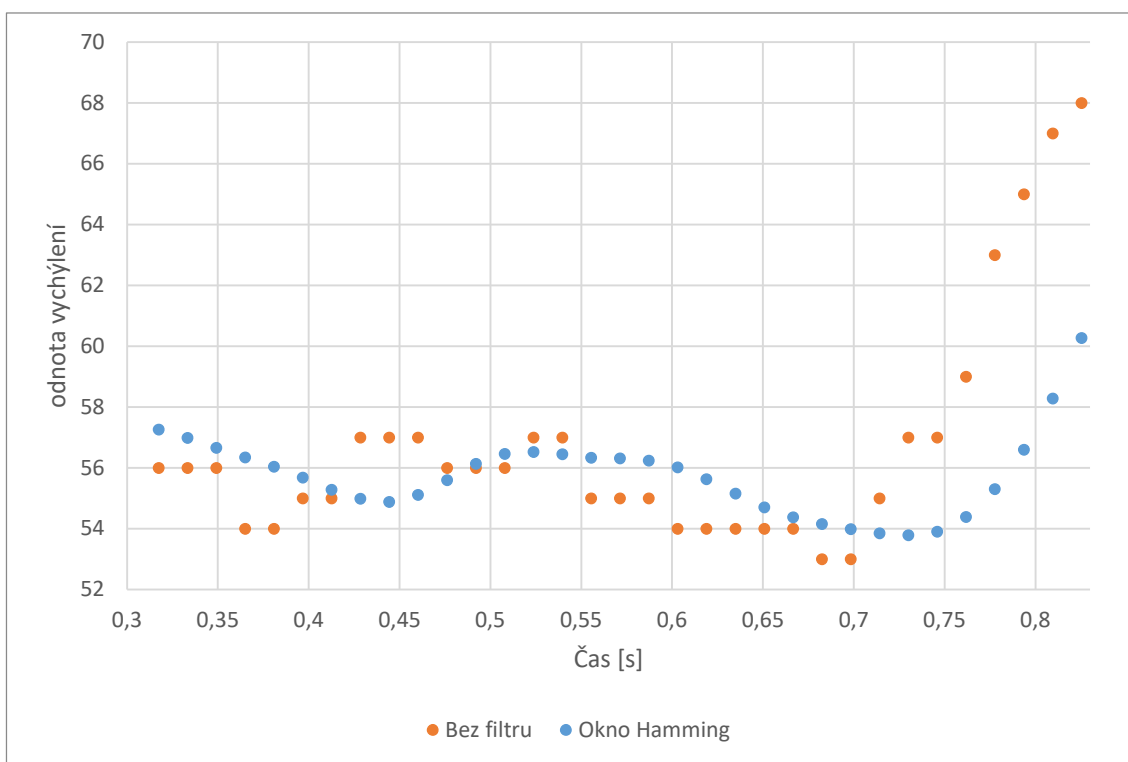
- Hammingovo okno je navrženo tak, aby poskytovalo dobré potlačení nežádoucích frekvenčních složek, přičemž zachovává ostré rozlišení hlavních frekvencí. Je ideální pro aplikace, kde je důležitý kompromis mezi přesným rozlišením frekvencí a minimalizací interferencí z jiných frekvencí.
- Hanningovo okno poskytuje hladší přechod na okrajích ve srovnání s Hammingovým oknem, což dále snižuje amplitudu nežádoucích frekvenčních složek.
- Blackmanovo okno je velmi účinně potlačuje nežádoucí frekvenční složky, což ho činí vhodným pro aplikace vyžadující vysokou čistotu signálu. Nevýhodou je širší hlavní frekvenční oblast, což může snížit schopnost rozlišovat mezi blízkými frekvencemi.
- Kaiserovo okno je parametrické okno, které umožňuje nastavit kompromis mezi šířkou hlavní frekvenční oblasti a úrovní nežádoucích frekvenčních složek

⁷ Spektrální únik je jev, který nastává při analýze signálu. Když signál není nulový na okrajích okna, jeho spektrum se rozšíří do dalších frekvencí, což způsobuje zkreslení frekvenční analýzy.

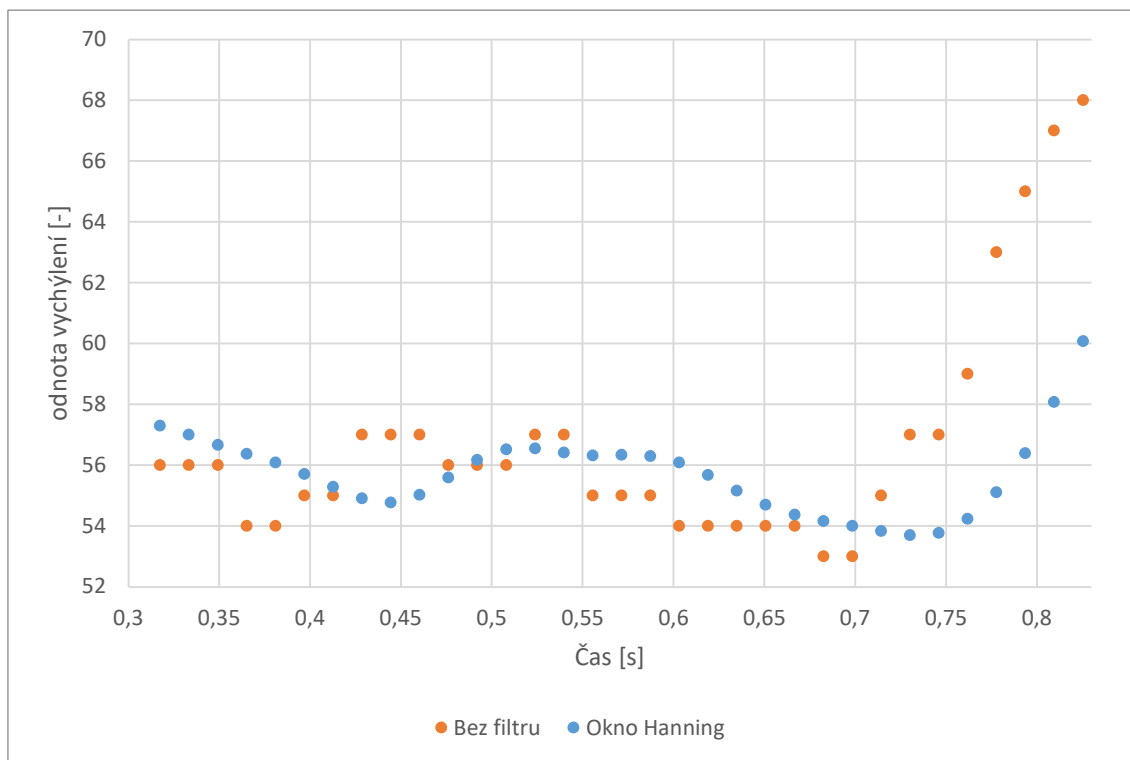
- Trojúhelníkové okno, známé také jako Bartlettovo okno, má lineární průběh, který klesá na nulu na obou koncích. Je jednodušší na implementaci, ale méně účinné v potlačování nežádoucích frekvenčních složek ve srovnání s ostatními okny [42].

Tab. 3: Koeficienty různých typů oken

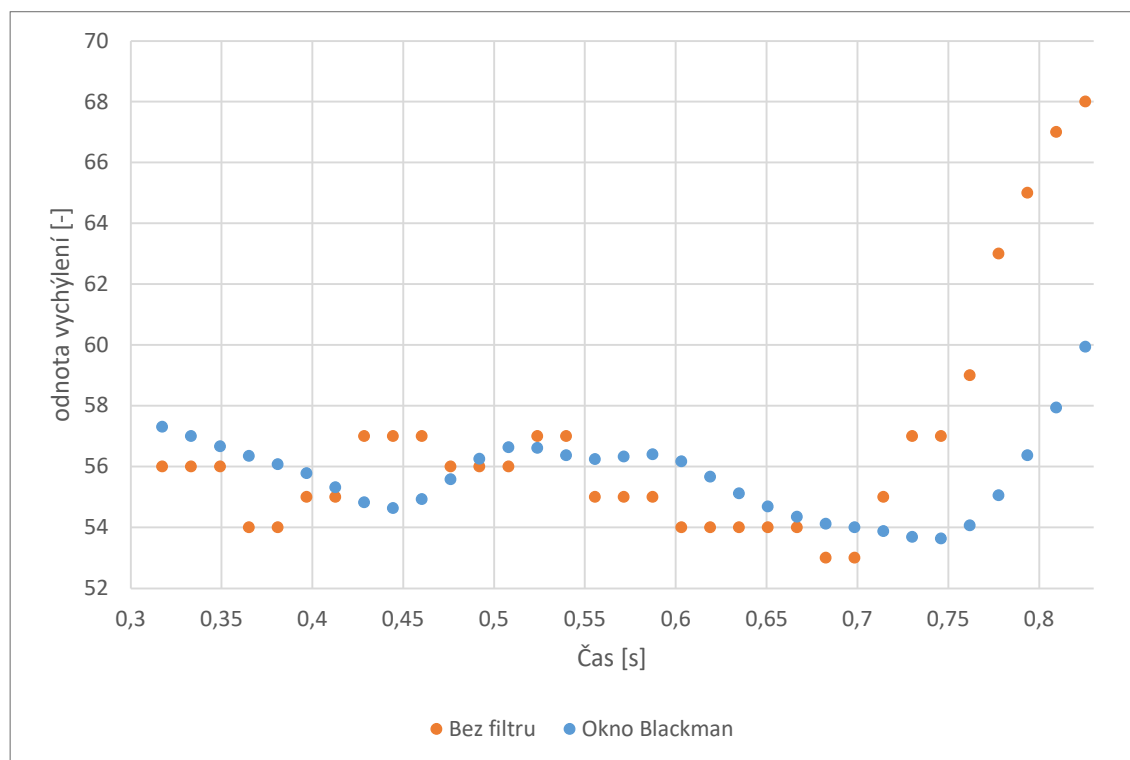
| Koeficient | Hamming | Hanning | Blackman | Kaiser | Trojúhelník |
|------------|---------|---------|----------|---------|-------------|
| 1 | 0,01852 | 0 | 4,13E-18 | 0,03770 | 0,04167 |
| 2 | 0,04971 | 0,03661 | 0,01978 | 0,08500 | 0,08333 |
| 3 | 0,12500 | 0,12500 | 0,10119 | 0,13375 | 0,12500 |
| 4 | 0,20029 | 0,21339 | 0,23022 | 0,17039 | 0,16667 |
| 5 | 0,23148 | 0,25000 | 0,29762 | 0,18400 | 0,20833 |
| 6 | 0,20029 | 0,21339 | 0,23022 | 0,17039 | 0,16667 |
| 7 | 0,12500 | 0,12500 | 0,10119 | 0,13375 | 0,12500 |
| 8 | 0,04971 | 0,03661 | 0,01978 | 0,08500 | 0,08333 |



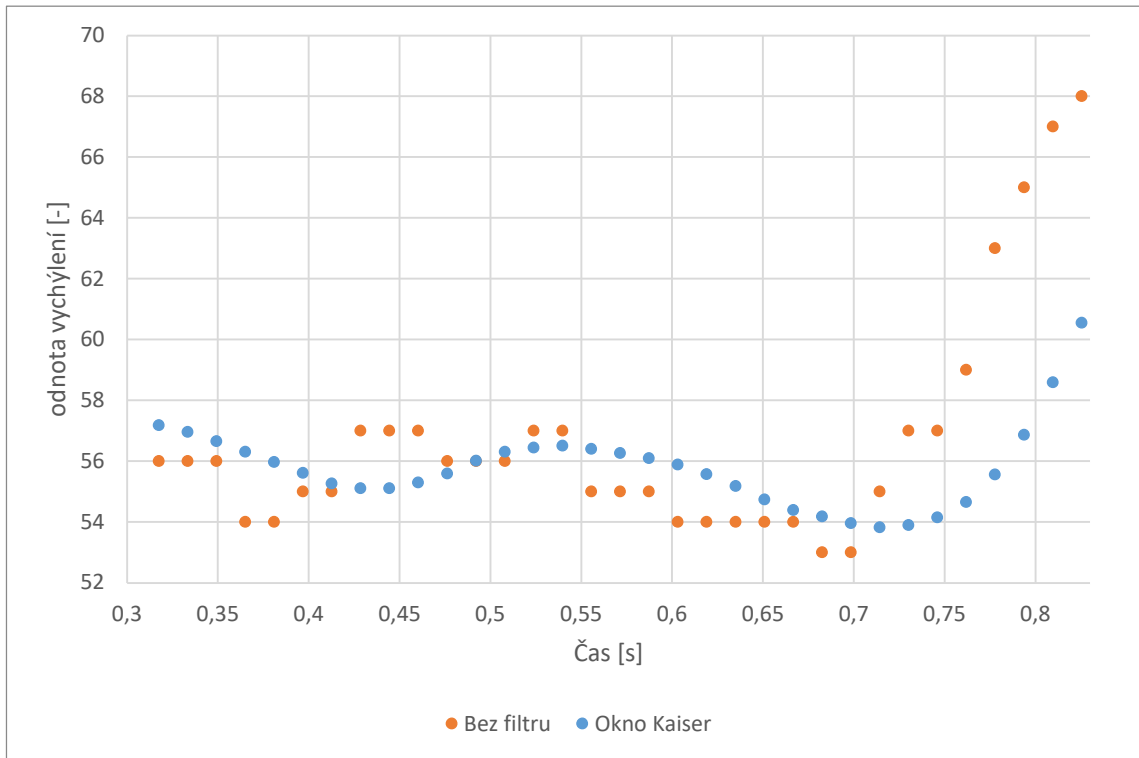
Obr. 39: Porovnání nefiltrovaného signálu s FIR filtrem – okno Hamming



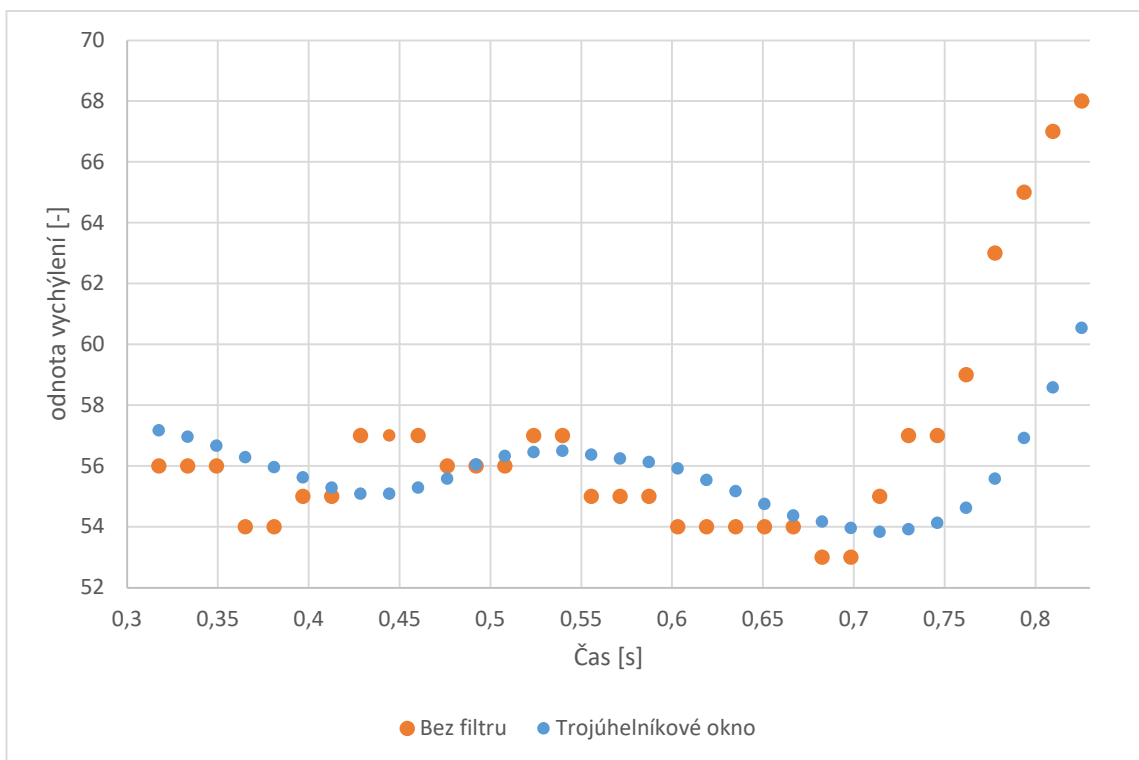
Obr. 40: Porovnání nefiltrovaného signálu s FIR filtrem – okno Hanning



Obr. 41: Porovnání nefiltrovaného signálu s FIR filtrem – okno Blackman



Obr. 42: Porovnání nefiltrovaného signálu s FIR filtrem – okno Kaiser

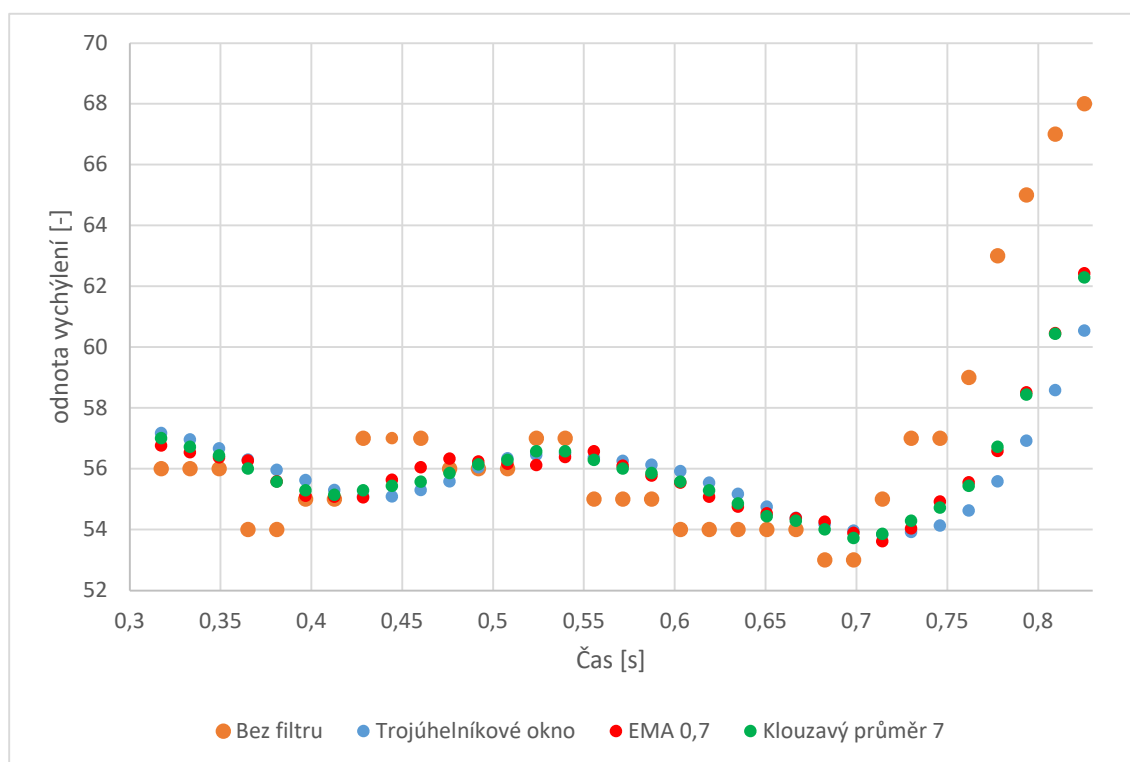


Obr. 43: Porovnání nefiltrovaného signálu s FIR filtrem – trojúhelníkové okno

FIR filtry s koeficienty zvolenými pomocí různých typů oken se chovají při aplikaci na signál velmi podobně. Po bližší inspekci však koeficienty zvoleny pomocí trojúhelníkového okna filtrují šum o trochu lépe než ostatní a zároveň má i rychlejší odezvu na změnu signálu.

Výběr filtru pro implementaci

Byl vybrán nejvhodnější způsob filtrace pro aplikaci ovládání kolaborativního robota UR3 pomocí SpaceMouse. Výběr probíhal mezi filtrem klouzavého průměru s počtem vzorků 7, filtrem exponenciálního průměru s koeficientem útlumu 0,7 a FIR filtrem s koeficienty vypočítanými pomocí trojúhelníkového okna (obr. 44).



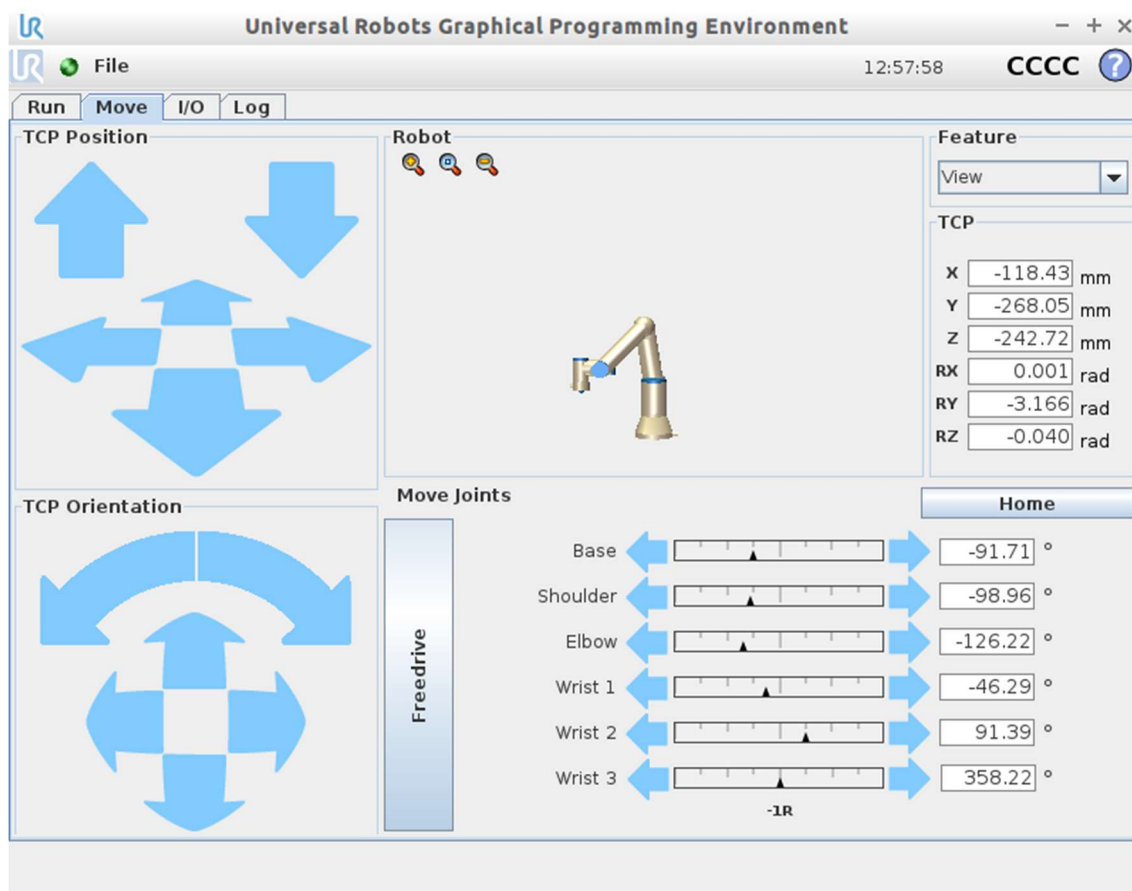
Obr. 44: Porovnání nefiltrovaného signálu s filtrem klouzavého průměru, exponenciálním filtrem klouzavého průměru a FIR filtrem

Všechny typy filtrů vykazovaly velmi podobné chování, nicméně mezi nimi existovaly malé rozdíly. Filtr klouzavého průměru a EMA filtr měly přibližně o 12 ms rychlejší odezvu na změnu signálu než FIR filtr. Vzhledem k tomu, že rychlost odezvy je pro aplikaci ovládání robotického ramene v reálném čase velmi důležitá, byl FIR filtr z výběru vyřazen.

Filtr klouzavého průměru navíc lépe filtruje šum ve srovnání s EMA filtrem. Tento filtr je zároveň jednoduchý na implementaci a není náročný na výpočetní výkon. Na základě těchto důvodů byl filtr klouzavého průměru vybrán jako nejvhodnější a byl implementován do ovládacího programu pro ovládání robotického ramene, spolu s filtrem mrtvé zóny o velikosti 20.

4.5 Testování programu

Program byl testován pomocí off-line simulátoru URSim 3.15.8 (obr. 45), který je blíže popsán v kapitole 4.2. Během simulace bylo odhaleno několik logických chyb. Původní metoda ovládání robota založená na přičítání souřadnic získaných ze SpaceMouse k aktuální poloze efektoru, vykazovala neefektivitu s nepříjemnou odezvou. V důsledku toho byl zvolen jiný přístup, který ovládá rychlost a směr koncového bodu efektoru. Při testování v simulátoru bylo sledováno, zda se robot pohybuje v souladu s vychýlením SpaceMouse při obecném pohybu.



Obr. 45: Simulační prostředí v URSim – Polyscope

Pro testování v robotické laboratoři přímo na UR3 CB3 byl pro SpaceMouse vytisknut držák pomocí 3D tisku, který byl následně přimontován na stůl, kde je robot instalován. V průběhu testování v laboratoři (obr. 46) byly odhaleny problémy, které se v simulačním prostředí neprojeví. Jedním z nich byl sekavý pohyb robota. Tento jev byl způsoben logickou chybou, která byla následně odstraněna.



Obr. 46: Testování v robotické laboratoři

4.6 Popis procesu sběru dat z UR3 CB3

Sběr dat proběhl v robotické laboratoři. Proces sběru dat byl realizován prostřednictvím pohybu robotického ramene z bodu A do bodu B za využití zařízení SpaceMouse. Tyto body byly předem určeny. Do prvního bodu se robot dostal pomocí programu. Do druhého bodu se robot vedl pomocí SpaceMouse. Během tohoto pohybu byla řídicím programem zaznamenána data týkající se polohy efektoru a jednotlivých kloubů robotu. Data se zapisovala do csv souboru (coma-separated values – hodnoty odděleny čárkou). Tento postup byl opakován pro 15 různých dvojic bodů A a B, Tyto data mohou být použita pro strojové učení pohybu robotu pomocí učení imitací. Data jsou uvedena v elektronické příloze této práce a také jsou dostupná na platformě Kaggle [43].

5 DISKUZE

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit software, který umožní integraci haptického zařízení SpaceMouse Module s kolaborativním robotickým ramenem UR3 CB3. Hlavním záměrem bylo dosáhnout efektivní a plynulé komunikace mezi těmito zařízeními za využití programovacího jazyka Python. Práce se skládala z několika klíčových částí, zahrnujících teoretický základ kolaborativní robotiky a haptických technologií, praktickou implementaci a sběr dat pro účely strojového učení.

Práce úspěšně dosáhla stanovených cílů. Byl vyvinut a implementován program, který zajišťuje komunikaci mezi haptickým zařízením SpaceMouse a robotickým ramenem UR3. Program umožňuje plynulou interakci uživatele s robotem, kde jsou data ze SpaceMouse filtrována a transformována do formátu kompatibilního s robotickým API UR3.

Implementace zahrnovala výběr a aplikaci vhodných filtrů. Byly použity dva filtry, Pásmo necitlivosti a filtr klouzavého průměru, které pomáhají eliminovat nežádoucí pohyby a šum, čímž zajišťují plynulost ovládání robota. Data o poloze efektoru a kloubů robota byla úspěšně shromážděna.

Pro zlepšení této práce by bylo vhodné vyvinout uživatelské rozhraní. Tento vývoj by mohl zjednodušit ovládání a nastavování parametrů robota, zejména pro uživatele bez technických a programátorských zkušeností. Další rozvoj této práce by mohl spočívat v natrénování modelu strojového učení s využitím nasbíraných dat. Konkrétně by mohl být použit model založený na behavioral cloning, který se učí napodobovat chování na základě demonstračních dat.

6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo provést důkladnou rešerši v oblasti kolaborativní robotiky a haptických zařízení využívaných v robotice. Hlavním úkolem bylo vytvořit a implementovat program v jazyce Python, který by umožnil efektivní komunikaci mezi haptickým zařízením SpaceMouse a robotickým ramenem UR3. Během vývoje programu byly úspěšně zajištěny všechny klíčové aspekty této komunikace, včetně přenosu dat, jejich zpracování a filtrování.

V úvodní kapitole byla zkoumána současná situace v oblasti kolaborativní robotiky a její aplikace v různých odvětvích, jako jsou průmysl, zdravotnictví a potravinářství. Tato část poskytla přehled o možnostech a výhodách, které kolaborativní roboti přinášejí do těchto sektorů. Podrobněji zde byl popsán kobot UR3 společnosti Universal Robots, jelikož je v této práci využit.

V druhé kapitole práce byla prozkoumána oblast haptických zařízení se zaměřením na problematiku haptické odezvy, která zajišťuje efektivní interakci člověka se stroji. Bylo detailně představeno haptické zařízení SpaceMouse Module, jehož schopnosti byly využity pro ovládání robotického ramene UR3.

V praktické části byl popsán proces tvorby ovládacího programu s využitím programovacího jazyka Python. Program umožňuje uživatelům ovládat robotické rameno UR3 pomocí SpaceMouse Module. Byl proveden výběr vhodného filtru na filtrování dat ze SpaceMouse. Byly aplikovány dva filtry: první byl filtr pásma necitlivosti o velikosti 20, který pomáhá eliminovat malé nežádoucí pohyby, a druhý filtr filtroval šum pomocí filtru klouzavého průměru s počtem vzorků $M=7$. Implementované filtry umožňují uživatelům provádět izolované pohyby v jednotlivých osách bez nežádoucího pohybu v jiných směrech a zajišťují plynulost pohybů robotického ramene.

Při realizaci práce byla získána data z robotického ramene o poloze efektoru a poloze jednotlivých kloubů. Tyto informace byly získány během pohybu mezi dvěma body. Nasbíraná data jsou určena pro využití pro strojové učení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SHERWANI, F.; ASAD, Muhammad Mujtaba a IBRAHIM, B.S.K.K. Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0). Online. *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST)*. 2020. ISBN 978-1-7281-7113-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICETST49965.2020.9080724>. [cit. 2024-03-31].
- [2] MENNINGS, Robbin. *Technologies used to ensure safety of cobots*. Online. WiredWorkers. Dostupné z: <https://www.wiredworkers.io/blog/technologies-used-to-ensure-safety-of-cobots/>. [cit. 2024-03-31].
- [3] JAVAID, Mohd; HALEEM, Abid; SINGH, Ravi Pratap; RAB, Shanay a SUMAN, Rajiv. Significant applications of Cobots in the field of manufacturing. Online. *Cognitive Robotics*. 2022, s. 222-233. ISSN 26672413. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.10.001>. [cit. 2024-04-01].
- [4] *A History of Collaborative Robots: From Intelligent Lift Assists to Cobots*. Online. Engineering.com. 2016. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/a-history-of-collaborative-robots-from-intelligent-lift-assists-to-cobots>. [cit. 2024-04-01].
- [5] *A Brief History of Collaborative Robots*. Online. Material handling and logistics. 2020. Dostupné z: <https://www.mhlnews.com/technology-automation/article/21124077/a-brief-history-of-collaborative-robots>. [cit. 2024-04-01].
- [6] *History of the Cobots - The Cobots from Universal Robot*. Online. Universal Robots. 2017. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/news-centre/the-history-behind-collaborative-robots-cobots/>. [cit. 2024-04-01].
- [7] *The Future of Collaborative Robots*. Online. Association for advancing automation. Dostupné z: <https://www.automate.org/robotics/cobots/future-of-collaborative-robots>. [cit. 2024-04-02].
- [8] ABB. *Dual-arm YuMi® - IRB 14000*. Online. ABB. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/yumi/dual-arm>. [cit. 2024-04-02].
- [9] *KMR iisy*. Online. KUKA. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%5%beby/amr-autonomni-mobilni-robotika/mobiln%3%ad-roboty/autonomn%3%ad-mobiln%3%ad-kobot-kmr-iisy>. [cit. 2024-04-02].
- [10] *AI Cobot Series*. Online. Techman Robot. Dostupné z: <https://www.tm-robot.com/en/>. [cit. 2024-04-02].
- [11] *Collaborative Robot Market Size*. Online. Allied Market Research. 2023. Dostupné z: <https://www.alliedmarketresearch.com/collaborative-robot-market>. [cit. 2024-04-02].
- [12] *LBR Med: Kolaborativní robot pro lékařství*. Online. KUKA. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/pr%5%AFmyslov%3%A1->

- [odv%C4%9Btv%C3%AD/zdravotn%C3%AD-p%C3%A9%C4%8De/l%C3%A9ka%C5%99sk%C3%A1-robotika-firmy-kuka/lbr-med.](#) [cit. 2024-04-05].
- [13] *Rehabilitace s robotickou podporou – snadná mobilizace díky robotům ROBERT® a společnosti KUKA.* Online. KUKA. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/pr%C5%AFmyslov%C3%A1-odv%C4%9Btv%C3%AD/solutions-database/2019/08/life-science-robotics-robot>. [cit. 2024-04-05].
- [14] *KUKA_LBR-Med_EN_iywa_7_14.pdf.* Online. KUKA. 2017. Dostupné z: https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/sites.usc.edu/dist/0/595/files/2021/05/KUKA_LBR-Med_EN_iywa_7_14.pdf. [cit. 2024-04-05].
- [15] FORCE DIMENSION. *Sigma.7.* Online. Force Dimension. Dostupné z: <https://www.forcedimension.com/products/sigma>. [cit. 2024-04-05].
- [16] *Robots in the bakery.* Online. FANUC. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/kdojsme/news-and-events/de-roboter-backerei-03-2023>. [cit. 2024-04-05].
- [17] STARTUS. *Discover RoboTwin: A Startup Success Story Beyond the State-of-the-Art of Automation.* Online. StartUs Magazine. 2023. Dostupné z: <https://magazine.startus.cc/discover-robotwin-a-startup-success-story-beyond-the-state-of-the-art-of-automation/>. [cit. 2024-05-16].
- [18] *The ROS Ecosystem.* Online. ROS. Dostupné z: <https://www.ros.org/blog/ecosystem/>. [cit. 2024-04-27].
- [19] ROBOTIC AUTOMATION SYSTEMS. *What Are Robotic Teach Pendants?* Online. Robotic Automation Systems. 2022. Dostupné z: <https://www.roboticautomationsystems.com/blog/what-are-robotic-teach-pendants/>. [cit. 2024-04-06].
- [20] FANUC AMERICA CORPORATION. *The Facts About Hand Guiding Robots.* Online. FANUC. 2020. Dostupné z: <https://www.fanucamerica.com/news-resources/articles/the-facts-about-hand-guiding-robots>. [cit. 2024-04-06].
- [21] UNIVERSAL ROBOTS. *Universal Robots.* Online. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/>. [cit. 2024-04-07].
- [22] UR3. Online. In: © 2024 UNIVERSAL ROBOTS A/S. Universal Robots. Dostupné z: https://universal-robots.com/media/1828034/ur3_tech_spec_web_en.pdf. [cit. 2024-04-07].
- [23] SREELAKSHMI, M. a SUBASH, T.D. Haptic Technology: A comprehensive review on its applications and future prospects. Online. *Materials Today: Proceedings.* 2017, roč. 4, č. 2, s. 4182-4187. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.120>. [cit. 2024-04-08].
- [24] GANI, Abrar; PICKERING, Oliver; ELLIS, Caroline; SABRI, Omar a PUCHER, Philip. Impact of haptic feedback on surgical training outcomes: A Randomised Controlled Trial

- of haptic versus non-haptic immersive virtual reality training. Online. 2022, roč. 83. ISSN 2049-0801. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2022.104734>. [cit. 2024-04-09].
- [25] FORCE DIMENSION. *METERON*. Online. Dostupné z: <https://www.forcedimension.com/applications/aerospace>. [cit. 2024-04-08].
- [26] 3D SYSTEMS, INC. *Touch HAPTIC DEVICE*. Online. 3D Systems. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch>. [cit. 2024-04-09].
- [27] SENSEGLOVE. *Volkswagen improves Car Assembly Training and keeps the equipment safe*. Online. SenseGLove. Dostupné z: <https://www.senseglove.com/cases/volkswagen-commercial-vehicles/>. [cit. 2024-04-10].
- [28] FUNDAMENTAL SURGERY. *PLATFORM HAPTICVR™*. Online. Fundamental VR. Dostupné z: <https://fundamentalsurgery.com/platform/hapticvr/>. [cit. 2024-04-11].
- [29] FORCE DIMENSION. *OceanOne*. Online. Force Dimension. Dostupné z: <https://www.forcedimension.com/applications/underwater>. [cit. 2024-04-10].
- [30] *Arrangement for the detection for relative movements or relative position of two objects*. Bernd Gombert. Přihl.: 12.3.2002. Uděl.: 5.6.2003. US20030103217A1. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US20030103217A1/en>. [cit. 2024-04-13].
- [31] *SpaceMouse® Module*. Online. MEGATRON ELEKTRONIK GMBH & CO. KG. MEGATRON. Dostupné z: <https://www.megatron.de/en/products/finger-joysticks/finger-joystick-series-spacemouser-module.html>. [cit. 2024-05-16].
- [32] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *What is Python? Executive Summary*. Online. PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python. Dostupné z: <https://www.python.org/doc/essays/blurbl/>. [cit. 2024-04-19].
- [33] GITHUB, INC. *PyUSB – Easy USB access for Python*. Online. GITHUB, INC. GitHub. Dostupné z: <https://github.com/pyusb/pyusb>. [cit. 2024-04-19].
- [34] UNIVERSAL ROBOTS A/S. *REAL-TIME DATA EXCHANGE (RTDE) GUIDE*. Online. Universal Robots. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/interface-communication/real-time-data-exchange-rtde-guide/>. [cit. 2024-04-21].
- [35] *UR_RTDE Installation*. Online. GitLab. Dostupné z: https://sdurobotics.gitlab.io/ur_rtde/installation/installation.html. [cit. 2024-04-28].
- [36] *VMware Workstation Pro*. Online. VMware. Dostupné z: <https://www.vmware.com/products/workstation-pro.html>. [cit. 2024-04-27].
- [37] UNIVERSAL ROBOTS. *OFFLINE SIMULATOR - CB-SERIES - NON LINUX - URSIM 3.15.8*. Online. Universal Robots. 2022. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/download/software-cb-series/simulator-non-linux/offline-simulator-cb-series-non-linux-ursim-3158/>. [cit. 2024-04-25].

- [38] *How Fast is Real-Time? Human Perception and Technology*. Online. PubNub. 2024. Dostupné z: <https://www.pubnub.com/blog/how-fast-is-realtime-human-perception-and-technology/>. [cit. 2024-05-18].
- [39] SMITH, Steven W. Moving Average Filters. Online. In: *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Second Edition. California Technical Publishing, 1999, s. 277-284. ISBN 0-9660176-6-8. Dostupné z: https://www.analog.com/en/resources/technical-books/scientist_engineers_guide.html. [cit. 2024-04-26].
- [40] *Exponential Moving Average (EMA) Filters*. Online. Mbedded.ninja. 2014, 11.4.2024. Dostupné z: <https://blog.mbedded.ninja/programming/signal-processing/digital-filters/exponential-moving-average-ema-filter/>. [cit. 2024-05-18].
- [41] NOUNOU, Mohamed N. a BAKSHI, Bhavik R. Chapter 5 - Multiscale Methods for Denoising and Compression. Online. In: WALCZAK, Beata (ed.). *Multiscale Methods for Denoising and Compression*. Volume 22. Elsevier, 2000, s. 119-150. ISBN 9780444501110. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0922348700800301>. [cit. 2024-05-21].
- [42] *Window function*. Online. Wikipedia. 17.5.2024. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Window_function. [cit. 2024-05-21].
- [43] *IL_UR3_movement_public*. Online. Kaggle. Dostupné z: <https://www.kaggle.com/datasets/tomkotrba/il-ur3-movement-public>. [cit. 2024-05-23].
- [44] *Cobot innovation resolves redeployment challenge*. Online. In: © 2024 IML GROUP PLC. Control Engineering Europe. 2021. Dostupné z: <https://www.controlengurope.com/article/184067/Cobot-innovation-resolves-redeployment-challenge.aspx>. [cit. 2024-04-01].
- [45] *Machine tending and gauge robot cell*. Online. In: © 2024 FLEXIBLE AUTOMATION INC. Flexible Automation Inc. Dostupné z: <https://flexautoinc.com/products/machine-tending-and-gauge-robot-cell/>. [cit. 2024-04-01].
- [46] *KUKA LBR iiwa 7 R800 CR*. Online. In: AEP Zimmer Ingenieurgesellschaft mbH. Dostupné z: <https://www.aep-ingenieurbuero.de/cobotex-en/kuka-lbr-iiwa-7-r800-cr>. [cit. 2024-04-01].
- [47] *LWR III*. Online. In: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Dostupné z: <https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-12464/#gallery/29165>. [cit. 2024-04-01].
- [48] *Dual-arm YuMi® - IRB 14000*. Online. In: ABB. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/yumi/dual-arm>. [cit. 2024-05-16].

- [49] *Mobilní roboty zvyšují produktivitu.* Online. In: KUKA. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/firma/tisk/novinky/2018/03/mobiln%C3%AD-roboty-zvy%C5%A1uj%C3%AD-produktivitu>. [cit. 2024-04-02].
- [50] *TM12.* Online. In: Techman Robot. Dostupné z: <https://www.tm-robot.com/en/tm12/>. [cit. 2024-04-02].
- [51] *Robot ROBERT® je schopen provádět stejné pohyby znovu a znovu – a to bez přerušení.* Online. In: © KUKA AG 2024. KUKA. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/pr%C5%AFmyslov%C3%A1-odv%C4%9Btv%C3%AD/solutions-database/2019/08/life-science-robotics-robotr>. [cit. 2024-05-23].
- [52] *Bake-Off Station 4.0.* Online. In: © 2024 WIESHEU GMBH. WIESHEU. Dostupné z: <https://www.wiesheu.de/en/solutions/bakisto>. [cit. 2024-04-05].
- [53] *Teaching a robot to paint through motion imitation.* Online. In: STARTUS. StartUs Magazine. 2023. Dostupné z: <https://magazine.startus.cc/discover-robotwin-a-startup-success-story-beyond-the-state-of-the-art-of-automation/>. [cit. 2024-05-16].
- [54] *Tablet Teach Pendant for Industrial Robots.* Online. In: FANUC. Dostupné z: <https://www.fanucamerica.com/products/robots/controllers/tablet-teach-pendant>. [cit. 2024-04-06].
- [55] *Automatic Screwdriving System SPATZ.* Online. In: © 2024 UNIVERSAL ROBOTS A/S. Universal Robots. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/plus/products/stoger-automation/automatic-screwdriving-system-spatz/>. [cit. 2024-04-07].
- [56] *Distinctive Design Features.* Online. In: © 2024 FORCE DIMENSION. Force Dimension. Dostupné z: <https://www.forcedimension.com/products/sigma>. [cit. 2024-05-23].
- [57] *Touch HAPTIC DEVICE.* Online. In: © 2024 3D SYSTEMS, INC. 3D Systems. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch>. [cit. 2024-05-23].
- [58] *Implementation of haptic gloves.* Online. In: SenseGlove. Dostupné z: <https://www.senseglove.com/cases/volkswagen-commercial-vehicles/>. [cit. 2024-05-23].
- [59] *VR skills transfer with full HapticVR kinesthetic capabilities with collaboration feature.* Online. In: © FUNDAMENTAL SURGERY 2024. Fundamental Surgery. Dostupné z: <https://fundamentalsurgery.com/platform/hapticvr/>. [cit. 2024-05-23].
- [60] OSADA, Frederic a SEGUIN, Teddy. *OceanOne.* Online. In: © 2024 FORCE DIMENSION. Force Dimension. Dostupné z: <https://www.forcedimension.com/applications/underwater>. [cit. 2024-05-23].
- [61] *SpaceMouse® Module.* Online. In: MEGATRON. Megatron. Dostupné z: <https://www.megatron.de/en/products/finger-joysticks/finger-joystick-series-spacemouser-module.html>. [cit. 2024-04-13].

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1: Srovnání pracoviště konvenčního robotu (vlevo) a kolaborativní pracoviště [44; 45] | 18 |
| Obr. 2: KUKA LBR 3 (vlevo) a KUKA LBR iiwa [46; 47] | 19 |
| Obr. 3: ABB YuMi [48]..... | 20 |
| Obr. 4: KUKA KMR iiwa [49]..... | 20 |
| Obr. 5: Techman Robot TM12 [50]..... | 21 |
| Obr. 6: Rehabilitace pomocí kobotu ROBERT [51]..... | 22 |
| Obr. 7: Systém Bakisto [52] | 23 |
| Obr. 8: Učení robota lakování pomocí napodobování pohybu [53] | 24 |
| Obr. 9: Teach pendant společnosti FANUC [54] | 26 |
| Obr. 10: UR+ Automatický šroubovací systém SPATZ [55]..... | 28 |
| Obr. 11: Kolaborativní robot UR3 CB3 v robotické laboratoři | 29 |
| Obr. 12: Haptické zařízení sigma.7 [15]..... | 32 |
| Obr. 13: Haptické zařízení Touch 3D Systems [26]..... | 33 |
| Obr. 14: Účastník tréninkového programu a jeho pohled [27]..... | 33 |
| Obr. 15: Chirurgický simulátor HapticVR [28]..... | 34 |
| Obr. 16: OceanOne a jeho ovládání [29] | 34 |
| Obr. 17: Spacemouse Module [56] | 35 |
| Obr. 18: Rozložení komponent Spacemouse dle patentové dokumentace (upraveno autorem) [30] | 36 |
| Obr. 19: Příklad neupravených dat odeslaných ze SpaceMouse | 39 |
| Obr. 20: Upravená data do celočíselných hodnot | 40 |
| Obr. 21: Data vhodná pro funkci jogStart..... | 40 |
| Obr. 22: Vývojový diagram | 41 |
| Obr. 23: Nežádoucí vychýlení os při translačním pohybu v ose X | 42 |
| Obr. 24: Šum signálu | 43 |
| Obr. 25: Pohyb v ose x, velikost pásma necitlivosti 0..... | 45 |
| Obr. 26: Pohyb v ose X, velikost pásma necitlivosti 5 | 45 |
| Obr. 27: Pohyb v ose X, velikost pásma necitlivosti 10 | 46 |
| Obr. 28: Pohyb v ose X, velikost pásma necitlivosti 20 | 46 |
| Obr. 29: Pohyb v ose X, velikost pásma necitlivosti 40 | 47 |
| Obr. 30: Pohyb v ose X, velikost pásma necitlivosti 30 | 47 |
| Obr. 31: Porovnání nefiltrovaného signálu s filtrem klouzavého průměru interval 3 | 49 |
| Obr. 32: Porovnání nefiltrovaného signálu s filtrem klouzavého průměru interval 5 | 50 |
| Obr. 33: Porovnání nefiltrovaného signálu s filtrem klouzavého průměru interval 7 | 50 |
| Obr. 34: Porovnání nefiltrovaného signálu s filtrem klouzavého průměru interval 10 .. | 51 |
| Obr. 35: Porovnání nefiltrovaného signálu s EMA filtrem – koeficient útlumu 0,6 | 53 |
| Obr. 36: Porovnání nefiltrovaného signálu s EMA filtrem – koeficient útlumu 0,7 | 53 |
| Obr. 37: Porovnání nefiltrovaného signálu s EMA filtrem – koeficient útlumu 0,8 | 54 |
| Obr. 38: Porovnání nefiltrovaného signálu s EMA filtrem – koeficient útlumu 0,9 | 54 |

| | |
|--|----|
| Obr. 39: Porovnání nefiltrovaného signálu s FIR filtrem – okno Hamming..... | 57 |
| Obr. 40: Porovnání nefiltrovaného signálu s FIR filtrem – okno Hanning..... | 58 |
| Obr. 41: Porovnání nefiltrovaného signálu s FIR filtrem – okno Blackman | 58 |
| Obr. 42: Porovnání nefiltrovaného signálu s FIR filtrem – okno Kaiser | 59 |
| Obr. 43: Porovnání nefiltrovaného signálu s FIR filtrem – trojúhelníkové okno | 59 |
| Obr. 44: Porovnání nefiltrovaného signálu s filtrem klouzavého průměru, exponenciálním filtrem klouzavého průměru a FIR filtrem | 60 |
| Obr. 45: Simulační prostředí v URSim – Polyscope..... | 61 |
| Obr. 46: Testování v robotické laboratoři | 62 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tab. 1: Časy zpoždění podle koeficientů útlumu EMA filtru..... | 55 |
| Tab. 2: Časy zpoždění podle počtu koeficientů FIR filtru..... | 56 |
| Tab. 3: Koeficienty různých typů oken..... | 57 |

SEZNAM PŘÍLOH

Elektronické přílohy – hlavní adresář \Bakalářská práce\:

| Složka | Soubor |
|-----------------------------------|---|
| \Model držáku pro SpaceMouse\ | Držák SpaceMouse.ipt Držák SpaceMouse.stl |
| \Ovládací program\ | config.py functions.py readme.txt requirements.txt UR_control.py UR_initialization.py USB_initialization.py |
| \Sesbíraná data\ | csv soubory jednotlivých trajektorií |
| \Videa\ | Testování v laboratoři.mp4 Testování_Sekavý pohyb.mp4 Proces sběru dat.mp4 |