



Ing. Dominik Janecký

Autoreferát dizertačnej práce

**MODERNÉ METÓDY HMI ZALOŽENÉ
NA ROZPOZNÁVANÍ GEST OPERÁTORA**

na získanie

akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Mechatronické systémy

v študijnom odbore: kybernetika

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Bratislava, 27.7.2025



Ing. Dominik Janecký

Autoreferát dizertačnej práce

**MODERNÉ METÓDY HMI ZALOŽENÉ
NA ROZPOZNÁVANÍ GEST OPERÁTORA**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:
Mechatronicke systémy

Miesto a dátum: Bratislava, 27.7.2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forma doktorandského štúdia

Na Ústave automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave (FEI STU BA)

Predkladateľ: Ing. Dominik Janecký
Ústav automobilovej mechatroniky
FEI STU BA, Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Erik Kučera, PhD.
Ústav automobilovej mechatroniky
FEI STU BA, Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava

Oponenti: doc. Ing. Martin Juhás, PhD.
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky
MTF STU, Ulica Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava

Ing. Erich Stark, PhD.
Stark Codes, s.r.o.
Holičska 3043/13, 851 05, Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:

Na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3,
841 04 Bratislava, v miestnosti D-124

prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.

SÚHRN

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný program :

Mechatronické systémy

Písomná práca k dizertačnej skúške

Moderné metódy HMI založené na
rozpoznávaní gest operátora

Autor:

Ing. Dominik Janecký

Vedúci záverečnej práce:

doc. Ing. Erik Kučera, PhD.

Miesto a rok predloženia práce:

Bratislava 2025

Práca je venovaná problematike moderných metód HMI (rozhranie človek-stroj, angl. human machine interface) založených na rozpoznávaní gest operátora. Hlavným cieľom práce je vývoj metód a aplikačného systému pre ovládanie mechatronických systémov s využitím obleku na snímanie pohybu človeka (motion capture obleku) a vytvorenie grafického používateľského rozhrania v zariadení zmiešanej reality (Microsoft HoloLens 2). Na základe vykonanej analýzy dostupných oblekov a metód HMI pre vizuálne rozhranie sme zvolili najvhodnejšie zariadenia, vďaka ktorým bude možné ovládať laboratórne modely robotických systémov. Prínosom práce je nové unikátne riešenie spolupráce človeka so strojom, ktoré by bolo možné využívať pri nežiadúcich podmienkach pre človeka, ako sú rôzne nebezpečné prostredia - napríklad tesné priestory, požiare, rádioaktívne prostredia alebo aj vesmír.

Kľúčové slová: motion capture, zmiešaná realita, robot operating system, rozhranie človek-stroj

ABSTRACT

SLOVAK TECHNICAL UNIVERSITY IN BRATISLAVA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION
TECHNOLOGY

Study Programme:
Dissertation Thesis

Mechatronic systems
Modern HMI methods based on gestures
recognition

Author:
Supervisor:
Place and year of submission:

Ing. Dominik Janecký
doc. Ing. Erik Kučera, PhD.
Bratislava 2025

The thesis is devoted to the problem of modern HMI (human-machine interface) methods based on operator gesture recognition. The main aim of the thesis is to develop methods and application system for controlling mechatronic systems using a human motion capture suit and to create a graphical interface in a mixed reality device (Microsoft HoloLens 2). Based on the analysis of available suits and HMI methods for visual interface, we have selected the most suitable devices to control laboratory models of robotic systems. The contribution of the thesis is to bring a new unique human-machine collaboration solution that could be used in undesirable conditions for humans, such as various hazardous environments - for example, tight spots, fires, radioactive environments or even space.

Key words: motion capture, mixed reality, robot operating system, human-machine interface

OBSAH

ÚVOD	5
1 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	7
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	12
3 NÁVRH RIEŠENIA	14
3.1 OČAKÁVANÉ APLIKAČNÉ PRÍNOSY	14
3.1.1 Zvýšená bezpečnosť a efektívnosť práce	15
3.1.2 Optimalizácia pracovného procesu	16
3.1.3 Integrácia s existujúcimi robotickými systémami	16
3.1.4 Podpora pre nebezpečné prostredia a záchranné operácie.....	16
3.1.5 Budúce možnosti rozšírenia a prispôsobenia	17
3.2 VÝBER HARDVÉRU A SOFTVÉRU NA REALIZÁCIU RIEŠENIA	17
3.2.1 Zvolený hardvér	17
3.2.2 Zvolený softvér	18
3.3 KONCEPČNÝ NÁVRH RIEŠENIA	19
3.3.1 Celkový pohľad na systém	19
3.3.2 Architektúra systému	20
3.3.3 Princíp fungovania aplikácie	21
4 IMPLEMENTÁCIA NAVRHNUTÉHO RIEŠENIA	23
4.1 VYTVORENIE DATABÁZY GEST	23
4.2 TRÉNOVANIE	31
4.3 IMPLEMENTÁCIA UNITY APLIKÁCIE	35
4.4 PRINCÍP A UKÁŽKA FUNGOVANIA APLIKÁCIE.....	36
5 DISKUSIA	41
ZÁVER	42
PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ AUTORA	44
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	49

Úvod

Rozhranie človek-stroj (HMI) prešlo výrazným vývojom – od jednoduchých ovládacích panelov a tlačidiel, cez dotykové obrazovky až po moderné riešenia založené na rozšírenej (AR) a zmiešanej realite (MR) či rozpoznávaní hlasu a gest. Tento vývoj úzko súvisí so štvrtou priemyselnou revolúciou (Industry 4.0), ktorá prináša nové možnosti vďaka internetu vecí, umelej inteligencii a vysokorýchlostnému pripojeniu.

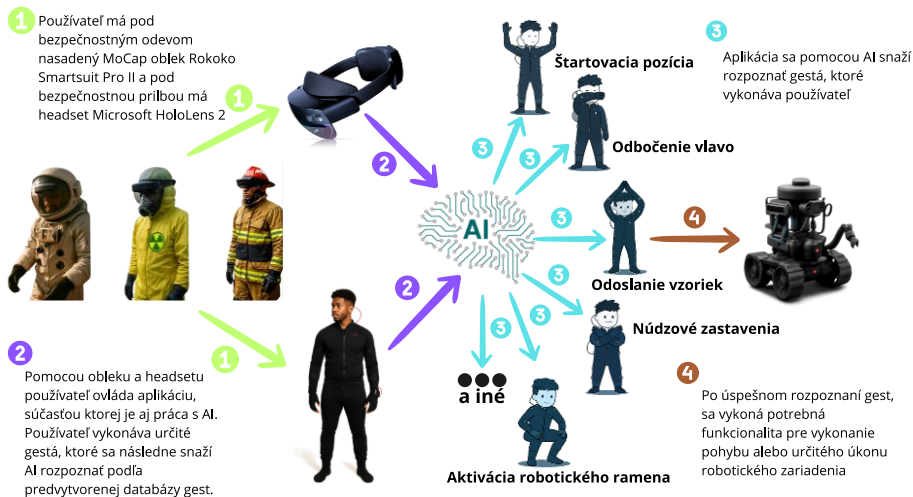
Naša práca sa zameriava na vývoj aplikačného systému umožňujúceho ovládanie mechatronických zariadení prostredníctvom rozpoznávania gest používateľa. Oproti existujúcim riešeniam je navrhnutá metóda prispôbena náročným podmienkam, kde tradičné kamery a štandardné ovládacie prvky zlyhávajú – napríklad v špeciálnych ochranných oblekoch alebo v prostredí s extrémnymi podmienkami.

Predstavme si situáciu, kde operátor (napríklad hasič pri požiari alebo astronaut na Marse) potrebuje ovládať robotické zariadenie (Obrázok 1). V takýchto prostrediach nie je praktické používať tablety alebo iné klasické ovládacie zariadenia. Naše riešenie preto využíva kombináciu motion capture obleku a okuliarov zmiešanej reality Microsoft HoloLens 2, ktoré môže operátor pohodlne používať aj pod ochranným oblekom a prilbou.



Obrázok 1 Príklady špecifických situácií pre zámer našej aplikácie (generované umelou inteligenciou s pomocou modelu DALL-E)

Aplikácia (Obrázok 2) spracúva gestá detegované motion capture oblekom a MR okuliarmi pomocou umelej inteligencie, ktorá následne umožňuje ovládanie robotických zariadení v reálnom čase. Tento prístup zlepšuje bezpečnosť, znižuje potrebu priameho kontaktu so zariadením a umožňuje použitie v náročných a nebezpečných podmienkach.



Obrázok 2 Stručný opis zámeru aplikácie

Cieľom riešenia je priniesť inovatívnu metódu HMI, ktorá nájde uplatnenie nielen v priemysle, ale aj v špecifických situáciách ako sú záchranné operácie alebo vesmírne misie, kde sú nároky na spoľahlivosť a bezpečnosť ovládania zariadení mimoriadne vysoké.

1 Súčasný stav problematiky

Počas analýzy aktuálneho stavu problematiky sme sa primárne zamerali na rešerš vedeckých prác, zaoberajúcich sa modernými metódami HMI založenými na rozpoznávaní gest operátora. Počas rešerše sme našli pomerne veľké množstvo prác zaoberajúcich sa príbuznou problematikou.

Autori [1] sa v práci venovali predovšetkým gestikulácii rúk a ďalej využitiu pri interakcii s rôznymi robotickými zariadeniami. Práca nám poskytuje prehľad komunikačných metód pri rôznych situáciách a oblastiach života ľudí, ktoré sú založené prevažne na gestách. V súčasnosti je trendom hĺbkové snímanie priestoru. Práca obsahuje taktiež návrh a realizáciu troch vlastných HMI metód. Prvou metódou bola lokalizácia rúk operátora voči trupu. Cieľom druhej metódy bolo vypočítanie súradníc podlahového bodu, na ktorý operátor musí ukázať a robotické zariadenie sa do tohto bodu odnaviguje a premiestni. Tretia metóda sa zameriava na riadenie skupiny 1 až 5 robotov s rovnakým cieľom.

Autori [2] sa v článku venovali dynamickému rozpoznávaniu gest ruky na základe signálov zo špecializovanej dátovej rukavice a algoritmov hlbokého učenia. Najskôr sa venovali návrhu nízkonákladovej a efektívnej dátovej rukavici s jednoduchou hardvérovou štruktúrou, ktorá neskôr slúžila na snímanie pohybu ruky a ohybu prstov. Na rozpoznávanie gest ruky využívali algoritmus rozpoznávania dynamických gest ruky, v ktorom sa využíval fúzny model konvolučnej neurónovej siete a všeobecnú časovú konvolučnú sieť. Výsledky ich experimentov dokázali, že nimi navrhovaný algoritmus prekonáva mnohé moderné algoritmy v meraní presnosti.

Článok [3] opisujúci vývoj techniky rozpoznávania gest na ovládanie infotainmentu v automobile. Ich navrhnuté HMI umožňuje komunikáciu s prístrojmi automobilu bez toho, aby sa zmenila pozornosť vodiča a ten sa tak musel niekde pozeráť a nevenovať pozornosť cestnej premávke. Zamerali sa na snímanie gest vodiča za pomoci radarového snímača s milimetrovými vlnami a na rozpoznávanie gest v reálnom čase používali strojové učenie. Vodičovi tak stačí používať ruku na znázornenie jednoduchých gest a vôbec tak nemusí pozeráť na displej palubovej dosky a niečo hľadať s tlačidlami, prípadne interagovať s dotykovým displejom.

Pri článku hodnotiacom presnosť a precíznosť sledovania kostry pomocou zariadenia Azure Kinect oproti jeho predchodcami Kinect V1 a Kinect V2 [4]. Autori sa rozhodli v článku začať s hodnotením hĺbkového senzoru Azure Kinect, jeho výhodám, technickým vlastnostiam a porovnať tieto vlastnosti s jeho vyradenými predchodcami. Výskum dokázal, že Azure Kinect hravo prekonáva svojich

predchodcov, a to nie len v presnosti, ale aj precíznosti. Na interakciu človeka s robotom, analýzu pohybov tela a na rôzne ďalšie aplikácie je vhodné použitie tohto senzoru.

V projekte [5] zaoberajúcom sa interakciou človeka so strojom za pomoci gest autori opisovali rôzne spôsoby HMI. Pre svoju aplikáciu zvolili interakciu na báze detekcie gest s využitím RCNN (Region-based Convolutional Neural Network). Ich navrhnutý systém pracuje v reálnom čase a spoľahlivo odoláva zmenám svetelných podmienok, čiastočným oklúziám, zmenám farieb atď. Navyše pri navrhnutí novej konvolučnej neurónovej siete sa zamerali na malú architektúru z hľadiska počtu vrstiev, nízky ale stále efektívny počet neurónov. Práve preto je ich riešenie použiteľné aj na výpočtovo obmedzených zariadeniach. Napriek tomu je však stále hlavnou nevýhodou tejto technológie (ako aj pre väčšinu problémov využívajúcich konvolučné neurónové siete) potreba vysokej výpočtovej kapacity.

Autori [6] sa v tomto článku venovali rozpoznávaniu gest rúk pre kolaboratívne pracovné stanice. Jednalo sa o prototyp inteligentného príkazového systému. Spolupráca človeka so strojom je kľúčovým aspektom v moderných priemyselných odvetviach, ktoré musia byť v súlade s paradigmou Priemysel 4.0. Hoci spoluprácu možno dosiahnuť pomocou kolaboratívneho robota na účelovo navrhnutom pracovisku, toto riešenie nie je vždy realizovateľné ani cenovo dostupné pre konkrétnu úlohu, ktorá sa má na pracovisku vykonávať. Na druhej strane, použitie inteligentného rozhrania HMI, ktoré z priemyselného robota urobí "inteligentného" robota, môže byť lepším a cenovo dostupným riešením v závislosti od úlohy. Vo svojej práci preto predstavili predbežný vývoj a vlastnosti experimentálneho HMI pre inteligentnú výrobu vyvinutého v prostredí MATLAB a ROS Industrial. Túto spoluprácu medzi ľuďmi a robotmi dosiahli využitím rýchleho detektora objektov R-CNN na robustné zisťovanie a rozpoznávanie gest rúk vykonávaných v reálnom čase.

V práci zameranej na rozpoznávanie a sledovanie gest ruky pre virtuálnu manipuláciu robota UR5 [7] sa autori zamerali na systém rozpoznávania gest rukou (HGR) a inerciálnu jednotku merania (IMU) integrovanú v senzore Myo Armband ako HMI na ovládanie polohy a orientácie virtuálneho robota UR5 so 6-DoF. V rámci HMI sa táto práca zameriava aj na riešenie problému sledovania trajektórie robota UR5 pomocou dvoch rôznych stratégií riadenia: PID s minimálnou normou a regulátora založeného na lineárnej algebre. Oba regulátory sú navrhnuté na základe kinematického modelu robota UR5.

Autori [8] sa vo svojej práci venovali interakcii s kolaboratívnym robotom pomocou 2D a TOF kamery. S rastúcim počtom aplikácií s kolaboratívnymi robotmi je

dôležité, aby bolo možné nastaviť podmienky na ovládanie robota a jeho interakciu s ľudským operátorom. V ich článku sa opisuje systém rýchlej odozvy na detekciu rúk operátora pomocou 2D a TOF kamery v spoločnom pracovnom priestore operátora a robota. Táto technológia poskytuje údaje o polohe rúk a gestách, ktoré sa využívajú na okamžité reakcie robota na prítomnosť operátora a na ovládanie robota. Interakcia s robotom pomocou gest je pre operátora intuitívnejšia bez potreby odborných znalostí. Operátor tak môže používať obe ruky, takže operácia je efektívnejšia a rýchlejšia. Systém testovali aj na prototypovom pracovisku, kde ovládanie gestami bolo testované pomocou 3D kamery a jej SDK v kombinácii s aplikačným systémom na komunikáciu a ovládanie robota. Používanie gest na interpretáciu jednoduchých príkazov a na navigáciu v pracovnom priestore sa pre operátora ukázalo ako intuitívne.

Systém rozpoznávania gest rukou na ovládanie zariadení v aute založený na infračervenom senzore [9] ma za úlohu odbremeniť vodiča od tradičného používania rôznych funkcionalít auta, ktoré znižujú jeho koncentráciu a sú hlavnou príčinou zvýšeného počtu dopravných nehôd.

Bežné systémy HMI pre zariadenia v automobiloch sú založené na optike, akustike atď., ktoré čelia obmedzeniam prostredia, ako napríklad vplyvom podmienok osvetlenia. S cieľom vyrovnať sa s týmito obmedzeniami sa autori tohto článku zamerali na používanie infračervených maticových snímačov na vytvorenie systému rozpoznávania gest ruky na ovládanie zariadení v automobile. Navrhovaný systém môže prekonať nevýhody iných systémov a má širšie uplatnenie. V systéme sa kombinuje sedem rôznych tvarov ruky a pohyb do štyroch smerov, aby sa dosiahol cieľ operácií zariadenia. Pri spracovaní údajov sa na realizáciu rozpoznávania opäť používala konvolučná neurónová sieť. Na overenie realizovateľnosti tohto systému sa vykonávali simulované experimenty.

Autori [10] sa zaoberali technológiou snímania a interakcie človeka so strojom založenej na rozpoznávaní gest ruky. Tradičné HMI vrátane myši, klávesnice atď. si zvyčajne vyžaduje pevný pracovný priestor, ktorý obmedzuje činnosť ľudí a nemôže priamo odrážať ich zámery. Vyžaduje, aby sa ľudia systematicky učili, ako zručne pracovať, čo nepriamo ovplyvňuje efektívnosť práce. Gestá rúk ako jeden z dôležitých spôsobov, ktorými človek odovzdáva informácie a vyjadruje intuitívne zámery. Majú výhodu vysokého stupňa diferenciacie, silnej flexibility a vysokej účinnosti prenosu informácií, vďaka čomu je rozpoznávanie gest rúk (HGR) jedným z horúcich miest výskumu v oblasti HMI. Článok autorov si berie za vstupný bod metódu snímania používanú technológiou HGR a na rozoznávanie gest sa opäť používa konvolučná neurónová sieť.

Autori [11] sa vo svojej práci venovali návrhu systému rozpoznávania gest, ktorý umožňuje riadenie kolaboratívneho robota pomocou dynamických gest v reálnom čase. Ich riešenie využíva kombináciu senzorických údajov, počítačového videnia a strojového učenia v architektúre nazwanej *Conditional Collaborative Handling Process*. Ide o kontextovo citlivý prístup, ktorý umožňuje systému pružne reagovať na variabilitu ľudského správania, náhodné odchýlky v interpretácii gest, ako aj na meniace sa prostredie. Na rozdiel od tradičných HMI systémov založených na preddefinovaných pravidlách tento prístup poskytuje prirodzenejšiu interakciu a vyššiu úroveň spoľahlivosti. Experimentálne nasadenie bolo realizované na platforme Kinova Gen3, pričom výsledky ukázali nielen vyššiu presnosť, ale aj zvýšený komfort pre používateľov počas ovládania. Výskum je prínosný najmä pre prostredia, kde je nevyhnutná vysoká miera flexibility Human-Robot Interaction.

Autori [12] vo svojej práci GestLLM predstavili inovatívny prístup, ktorý kombinuje vizuálne vstupy zo systému MediaPipe s veľkým jazykovým modelom (LLM). Tento hybridný systém umožňuje interpretovať nielen bežné a preddefinované gestá, ale aj komplexné a netradičné pohyby rúk bez potreby špeciálneho tréningu, tzv. zero-shot učenie. Autori týmto konceptom rozširujú možnosti klasickej „abecedy gest“ o schopnosť interpretovať gestá v prirodzenejšom a kontextuálne bohatšom formáte. Takéto riešenie predstavuje ďalší krok k intuitívnejšej a univerzálnejšej interakcii človeka so strojom.

Autori [13] vo svojej práci predstavili komplexný prehľad súčasných metód rozpoznávania gest v kontexte interakcie človek–robot. V článku analyzujú rôzne prístupy využívajúce snímanie hĺbky, ako aj použitie rôznych architektúr strojového učenia, vrátane CNN, RNN, LSTM, ale aj menej tradičných techník ako reinforcement learning (RL) či transfer learning. V práci sa venujú aj kombinovaným senzorickým systémom (napr. video + IMU) a porovnávajú ich výkonnosť z pohľadu presnosti, robustnosti, odozvy v reálnom čase a nárokov na výpočtové zdroje. Zároveň diskutujú o výzvach pri návrhu HMI systémov, ako je napríklad odolnosť voči rôznym svetelným podmienkam, oklúziám, šumu či adaptabilita k používateľovi. Prehľad pokrýva viacero aplikačných domén, od priemyselných pracovísk až po zdravotníctvo a asistenčné roboty, a preto poskytuje užitočný kontext aj pre návrh hybridných rozhraní založených na gestách.

Autori [14] vo svojej prehľadovej štúdii hodnotili metódy rozpoznávania gest ruky založené na počítačovom videní pre interakciu človek–robot. Štúdia zahŕňa analýzu najpoužívanejších prístupov. Jedná sa o krokový proces od zachytenia gestá cez detekciu a segmentáciu dlaňových oblastí až po extrakciu príznakov a klasifikáciu

pomocou CNN a SVM. Autori podrobne rozoberajú výsledky výskumov s použitím monokulárnych RGB aj RGB-D senzorov, porovnávajú ich výkon v rôznych prostrediach, vrátane problémov s osvetlením a oklúziami a identifikujú hlavné výzvy ako robustnosť a spoľahlivosť v reálnom čase. Tento prístup poskytuje hodnotný kontext pre našu prácu.

Autori [15] sa vo svojom článku venovali rozpoznávaniu gest rúk z egocentrického pohľadu (HoloLens 2) s cieľom riadiť robota v inteligentných priemyselných aplikáciách. Použili MediaPipe na extrakciu 21 kľúčových bodov ruky z video streamu z headsetu a následne využili LSTM model na klasifikáciu gest v reálnom čase. Rozpoznané gestá (napr. „stop“, „pokračuj“, „príď sem“) sú prekladané na ROS 2 správy, ktoré slúžia ako príkazy pre robotické systémy. Systém dosahuje presnosť ~96 %. Toto riešenie bez spoľahlivo znázorňuje spojenie MR/HoloLens a ROS 2 prostredníctvom gest, čo čiastočne korešponduje s našim konceptom hybridného HMI.

Autori [16] navrhli systém na rozpoznávanie gest pomocou dát z inerciálneho motion capture obleku, pričom ako základ klasifikačného jadra využili rekurentné neurónové siete typu LSTM a GRU. Senzory rozmiestnené po celom tele snímali pohyby operátora, ktoré boli zaznamenané ako časovo závislé sekvencie. Tieto dáta boli následne spracované neurónovou sieťou, ktorá jednotlivé pohyby klasifikovala ako konkrétne gestá. Navrhovaný systém umožnil mapovať gestá na príkazy pre mechatronické zariadenia v reálnom čase, čo demonštruje praktickú využiteľnosť takéhoto riešenia pre HMI aplikácie. Výhodou riešenia je, že nevyžaduje optickú infraštruktúru, čím sa znižuje jeho komplexita a náklady. Výsledky experimentov preukázali vysokú presnosť rozpoznávania a nízku odozvu systému aj pri dynamických pohyboch.

2 Ciele dizertačnej práce

Na základe analýzy súčasného stavu problematiky uvedenej v predošlej kapitole možno konštatovať, že väčšina doterajších riešení v oblasti HMI využíva kamery (RGB, hĺbkové, TOF) v kombinácii s konvolučnými neurónovými sieťami (CNN, R-CNN, 3D-CNN), resp. s rekurentnými modelmi (LSTM, GRU) na rozpoznávanie pohybov alebo gest operátora.

Pretože náš aplikačný systém cieľime na priemyselné alebo nebezpečné prostredia, v ktorých operátor nosí bezpečnostný odev a prilbu, je spoľahlivé vizuálne sledovanie tela výrazne obmedzené. Z tohto dôvodu navrhujeme alternatívne riešenie založené na motion capture obleku s inerciálnymi senzormi, ktorý je nositeľný pod ochranným odevom. Tento prístup nám umožňuje zbierať údaje o pohyboch jednotlivých častí tela (pozície, rotácie) bez potreby optického snímania. Na základe týchto dát môžeme spoľahlivo klasifikovať gestá a mapovať ich na príkazy pre robotické systémy bez potreby CNN či vizuálnych vstupov.

Okrem toho náš návrh obsahuje aj okuliare pre zmiešanú realitu HoloLens 2, ktoré zvyšujú komfort operátora, poskytujú okamžitú vizualizáciu spätnej väzby zo systému a umožňujú hands-free ovládanie. Vzhľadom na vývoj trendov (napr. zero-shot rozpoznávanie pomocou Large Language Model (LLM), ROS 2 integrácia, IMU + LSTM hybridy či egocentrické videnie cez MR headsety) sa naše riešenie ukazuje ako progresívne a prispôbené podmienkam reálneho použitia v priemyselnom prostredí. Cieľom práce je teda návrh a implementácia riešenia, ktoré vyššie spomínané obmedzenia obchádza.

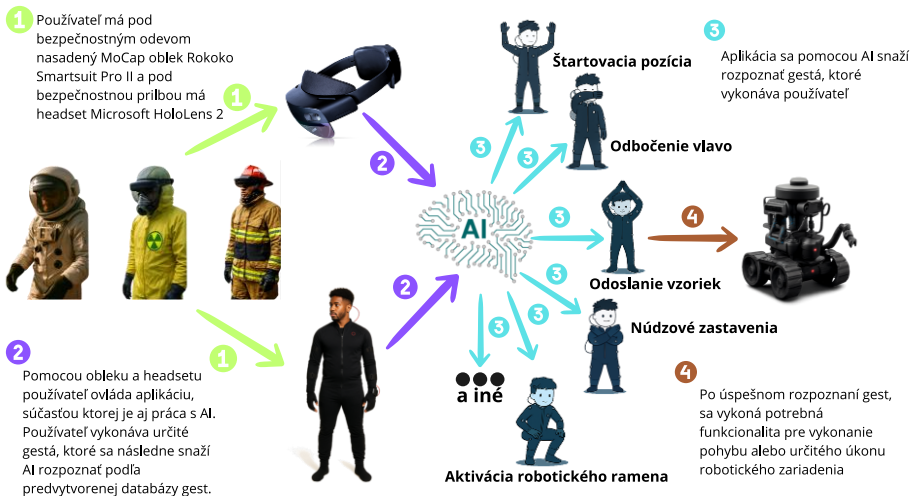
Funkcionálne požiadavky:

- Návrh HMI systému umožňujúceho ovládanie aplikácie pomocou gest
- Implementácia systému pracujúceho s motion capture oblekom
- Využitie zmiešanej reality (Microsoft HoloLens 2) na vizualizáciu a ovládanie systému.
- Vývoj AI modulu pre rozpoznávanie gest operátora na základe streamovaných pohybových dát
- Prepojenie aplikácie s ROS 2, umožňujúce riadiť robotické systémy v reálnom čase
- Návrh používateľského rozhrania v Unity, ktoré zohľadňuje intuitívne ovládanie bez potreby fyzických vstupov

Nefunkcionálne požiadavky:

- Robustnosť v reálnych podmienkach (napr. detekcia cez kombinézu)
- Kompatibilita so štandardmi ROS 2
- Možnosť budúceho rozšírenia o ďalšie gestá alebo výstupné zariadenia

Na nasledujúcom obrázku (Obrázok 3) je znázornená návrhová architektúra aplikačného systému pre rozpoznávanie gest operátora a následné ovládanie robotických zariadení. Diagram sumarizuje postupnosť krokov a technickú integráciu jednotlivých komponentov riešenia od snímania pohybov cez rozpoznávanie gest až po samotné ovládanie robota.



Obrázok 3 Stručný opis zámeru aplikácie

Operátor má na sebe motion capture oblek Rokoko Smartsuit Pro 2, ktorý je nasadený pod ochranným odevom. Tento oblek umožňuje snímať dáta o pohyboch a gestách v reálnom čase a odosiela ich do programu Rokoko Studio (Obrázok 5), ktorý zabezpečuje ich spracovanie a streaming. Tieto dáta sú paralelne smerované dvomi kanálmi:

1. Rozpoznávanie gest pomocou rekurentných neurónových sietí.
2. Unity aplikácie na vizualizáciu 3D postavy v prostredí zmiešanej reality.

Dôležitým komponentom riešenia je aj zariadenie Microsoft HoloLens 2, ktoré slúži na ovládanie Unity aplikácie v prostredí zmiešanej reality. Operátor tak môže interagovať s rozhraním aj v prípade, že nemá priestor na používanie tradičných vstupných zariadení. Unity aplikácia zároveň slúži ako prostredník medzi rozpoznávanými gestami a komunikačnými vrstvami systému ROS 2, ktorý zabezpečuje vykonanie príkazov na robote.

Výsledkom tohto návrhu je systém, ktorý je plne modulárny, rozšíriteľný a schopný fungovať v podmienkach, kde štandardné HMI technológie zlyhávajú, napríklad pri hasičských zásahoch, rádioaktívnych oblastiach či vesmíre. Diagram (Obrázok 3) slúži ako základ pre implementačnú fázu a demonštruje súlad medzi technologickým návrhom a cieľmi dizertačnej práce.

3 Návrh riešenia

Každé riešenie, ktoré sme preskúmali prinášalo určité výhody a nevýhody oproti ostatným. Cieľom našej dizertačnej práce je navrhnúť unikátne riešenie zamerané na komunikáciu a interakciu človeka s robotickým zariadením a pri návrhu riešenia sa zamerať na hlavné nedostatky ostatných riešení. Po dôkladnej analýze aktuálneho stavu riešení sme prišli so záverom, že hlavným nedostatkom vo väčšine riešení bola odkázanosť na snímanie kamerou a následná detekcia gest za pomoci konvolučných neurónových sietí. Takéto riešenia môžu byť niekedy výpočtovo náročné a hlavne náchylné na dokonalosť vstupných dát. Rizikové povolania, kde operátori musia mať oblečené bezpečnostné obleky/skafandre nedokážu priniesť takúto dokonalosť vstupných dát. Snímanie kamerou/hĺbkovou kamerou by mohlo priniesť nepresnosti, ktoré by sa neskôr odzrkadlili v detekcii gest a vyhodnocovaní za pomoci konvolučných neurónových sietí. Nami navrhnuté riešenie sa preto zameriava hlavne na tento hlavný nedostatok, ktorý sme sa rozhodli eliminovať pomocou technológie snímania pohybu tela za pomoci motion capture obleku.

3.1 Očakávané aplikačné prínosy

Cieľom vývoja aplikačného systému na ovládanie mechatronických systémov pomocou rozpoznávania gest operátora je poskytnúť nový, efektívny a bezpečný spôsob interakcie človek-stroj, najmä v prostrediach potenciálne nebezpečných pre ľudí (Obrázok 3).

Ciele vývoja aplikačného systému:

- Zabezpečiť bezpečnú a efektívnu interakciu človek-stroj pomocou rozpoznávania gest operátora.
- Zamerať sa na aplikácie v náročných a nebezpečných prostrediach, kde je použitie kamier neefektívne alebo nemožné.
- Využiť motion capture oblek, ktorý môže operátor nosiť pod ochranným odevom alebo skafandrom bez obmedzenia funkčnosti.

Hlavné technológie použité v riešení:

- Motion capture oblek slúži na snímanie pohybov rúk a tela aj cez pracovný odev.
- Headset pre zmiešanú realitu (Microsoft HoloLens 2) – umožňuje:
 - zobrazovať stav aplikácie a robota v reálnom alebo kvázi-reálnom čase,
 - používať rozhranie v prostredí zmiešanej reality bez blokovania reálneho vnímania.
- Unity engine (vizualizácie, UI)
- ROS 2 (middleware pre ovládanie robotických zariadení)
- AI modely / neurónové siete (rozpoznávanie gest)

Výhody navrhnutého systému:

- Zvýšenie bezpečnosti operátorov pri práci v rizikovitom prostredí (napr. požiare, rádioaktivita, vesmír).
- Nepretržitý vizuálny prehľad o činnosti robotického systému aj počas nosenia prilby či ochranných pomôcok.
- Nerušené vnímanie reálneho prostredia na rozdiel od virtuálnej reality, MR headset len dokresľuje informácie do okolitého sveta.

3.1.1 Zvýšená bezpečnosť a efektivita práce

Jednou z kľúčových výhod tohto aplikačného systému je zvýšená bezpečnosť pri vykonávaní úloh, ktoré sú pre človeka nebezpečné. Predstavte si situácie, že hasiči reagujú na veľký požiar, pracovníci v rádioaktívnom či chemickom prostredí alebo astronauti v extrémnych podmienkach vesmíru. V týchto situáciách je nevyhnutný vysoký stupeň ochrany ľudí prostredníctvom technológie, ktorá im umožňuje bezpečnú interakciu so strojmi alebo robotickými systémami. Aplikačný systém, ktorý umožňuje ovládanie robotov pomocou rozpoznávania gest cez oblek na snímanie pohybu, znamená, že operátor môže vykonávať rôzne akcie bez toho, aby sa musel zariadenia fyzicky dotknúť. To je užitočné najmä v prostrediach, kde by pre operátora nebolo

bezpečné manipulovať s fyzickými zariadeniami alebo ovládacími prvkami. Vďaka tejto technológii je možné bezpečnejšie a efektívnejšie ovládať robotické zariadenia, čím sa minimalizuje riziko zranení a zvyšuje bezpečnosť pracovníka.

3.1.2 Optimalizácia pracovného procesu

Ďalším benefitom je optimalizácia pracovného toku na základe intuitívneho ovládania prostredníctvom gest. Tradičné spôsoby ovládania robotov pomocou joystickov, klávesníc alebo dotykových obrazoviek vyžadujú často len minimálne fyzické pohyby a koncentrácia operátora môže byť znížená. Ovládanie gestami s motion capture oblekom umožňuje vykonávať príkazy iba pohybom rúk alebo tela, čo značne zjednodušuje celý proces a znižuje riziko chýb. Tento prístup má zásadný vplyv aj na efektivitu, keďže umožňuje rýchlejšie a flexibilnejšie vykonávanie úloh. Interakcia s robotom prostredníctvom zmiešanej reality (MR) cez HoloLens poskytuje vizuálnu prezentáciu informácií a ovládacích prvkov v reálnom čase, čo umožňuje operátorovi lepšie sa orientovať. Zobrazenie relevantných informácií priamo v zornom poli znižuje potrebu interakcie s externými zariadeniami, čo šetrí čas a zvyšuje produktivitu.

3.1.3 Integrácia s existujúcimi robotickými systémami

Ďalším dôležitým aspektom tohto riešenia je jeho integrácia s existujúcimi robotickými systémami. Pomocou Robot Operating System 2 (ROS 2), ktorý umožňuje flexibilnú komunikáciu medzi rôznymi hardvérovými a softvérovými komponentmi, je možné aplikáciu jednoducho prispôbiť rôznym typom robotov. Táto flexibilita umožňuje použitie riešenia v rôznych odvetviach a prostrediach. Integrácia s pokročilými simulačnými nástrojmi, ako je Gazebo, umožňuje testovanie a simuláciu robotických úloh v reálnom čase, čím sa zjednodušuje vývoj a údržba systému.

3.1.4 Podpora pre nebezpečné prostredia a záchranné operácie

Jednou z najväčších výhod tejto aplikácie je jej schopnosť vykonávať operácie v extrémnych podmienkach, kde by bolo pre človeka nebezpečné alebo nemožné vykonávať úlohy. Záchranné operácie v nebezpečných oblastiach, ako sú požiare, výbuchy alebo chemické havárie, je možné vykonávať na diaľku pomocou tejto aplikácie. Roboty vybavené pokročilými senzormi a manipulátormi môžu vykonávať úlohy, ako je vyhľadávanie a záchrana osôb, presúvanie materiálov či kontrola a monitorovanie priestorov, pričom operátor zostáva v bezpečnom prostredí.

3.1.5 Budúce možnosti rozšírenia a prispôsobenia

Aplikačný systém má významný potenciál pre ďalšie rozšírenie a prispôsobenie rôznym typom mechatronických a robotických systémov. Rozšírenia by mohli zahŕňať podporu ďalších oblekov na snímanie pohybu, pripojenie nových typov robotov, ako aj vylepšenie používateľského rozhrania. V budúcnosti by sa aplikácia mohla rozšíriť o nové funkcie, ako je rozpoznávanie dodatočných typov pohybov a gest, automatické prispôsobovanie robotických systémov podľa pohybových vzorcov operátora či prepojenie s bezpečnostnými a diagnostickými systémami. Tento prístup zabezpečí, že aplikácia zostane relevantná a bude schopná reagovať na nové požiadavky a výzvy.

3.2 Výber hardvéru a softvéru na realizáciu riešenia

Pri výbere hardvéru a softvéru bolo potrebné zvážiť výkon, flexibilitu, dostupnosť knižníc, kompatibilitu s komponentmi a požiadavky na prácu v nebezpečnom prostredí. Cieľom bolo vytvoriť robustný systém umožňujúci rozpoznávanie gest, simuláciu robotických zariadení a integráciu so zmiešanou realitou. Po analýze dostupných možností sme zvolili komponenty, ktoré tieto požiadavky najlepšie spĺňali a zaručujú spoľahlivú a dlhodobú funkčnosť systému.

3.2.1 Zvolený hardvér

V tejto podkapitole si opíšeme zvolený hardvér a dôvody, kvôli ktorým sme sa pre daný hardvér rozhodli.

Rokoko SmartSuit Pro

Po analýze viacerých systémov (XSens MVN, Perception Neuron 3, HoloSuit Pro) sme zvolili Rokoko SmartSuit Pro II. Poskytuje vysokú presnosť, spoľahlivosť a nízku latenciu pri snímaní pohybov celého tela aj rúk, čo je kľúčové pre rozpoznávanie gest aj pri nosení ochranného obleku. Je ergonomický, pohodlný aj pri dlhodobom používaní a prispôsobiteľný rôznym veľkostiam. Vďaka kombinácii presnosti, pohodlia a jednoduchej integrácie sa ukázal ako najvhodnejšie riešenie pre náš projekt.

Microsoft HoloLens 2

Pre interakciu s aplikáciou a prehľad o stave robotických zariadení sme zvolili headset pre zmiešanú realitu Microsoft HoloLens 2. Poskytuje nízku latenciu, pokročilé senzory a vizualizáciu informácií v reálnom čase priamo v zornom poli operátora. Je kompaktný, pohodlný a vhodný na dlhodobé používanie v náročných podmienkach. HoloLens 2 zároveň ponúka najvyššiu úroveň stability na trhu, čo z neho robí spoľahlivý nástroj aj pre kritické úlohy.

Robotické zariadenia

Navrhli sme univerzálne riešenie použiteľné s rôznymi typmi robotických zariadení. Pre ich ovládanie používame ROS 2, ktorý prináša spracovanie dát v reálnom čase, modularitu, bezpečnosť a dlhodobú podporu oproti ROS1. Slúži ako komunikačné rozhranie medzi aplikáciou a robotickými zariadeniami. ROS 2 sme zvolili aj preto, že je otvorený a ľahko rozšíriteľný, čo uľahčí budúce úpravy a prispôsobenie systému.

3.2.2 Zvolený softvér

V tejto podkapitole si opíšeme zvolený softvér a dôvody, kvôli ktorým sme sa pre daný softvér rozhodli.

Unity

Na vývoj grafického rozhrania a vizualizáciu dát sme zvolili Unity. Umožňuje tvorbu 3D vizualizácií a integráciu s HoloLens, ako aj jednoduché prepojenie s ďalšími systémami (Gazebo). Jeho široká podpora pluginov a knižníc nám umožnila rýchlejší a efektívnejší vývoj aplikácie.

C# & Python

C# sme použili v Unity, Python na tvorbu a rozpoznávanie gest. Tieto jazyky boli zvolené pre svoju robustnosť, širokú podporu a dostupnosť knižníc pre AI a HMI aplikácie.

Gazebo

Z dostupných simulačných prostredí (CoppeliaSim, Webots) sme vybrali Gazebo. Poskytuje realistické simulácie s reálnou fyzikou, jednoduchú integráciu s ROS 2 a aktívnu komunitu. Tento nástroj nám umožňuje testovať riešenia v podmienkach veľmi blízkych reálnemu svetu ešte pred ich nasadením.

Ubuntu

Použili sme distribúciu ROS 2 Humble Hawksbill s dlhodobou podporou do roku 2027. Ubuntu je jediný systém s plnou podporou ROS 2, čo zjednodušuje vývoj a testovanie aplikácií aj simulačných nástrojov. Zároveň je stabilný, spoľahlivý a ideálny pre dlhodobé nasadenie v profesionálnych projektoch.

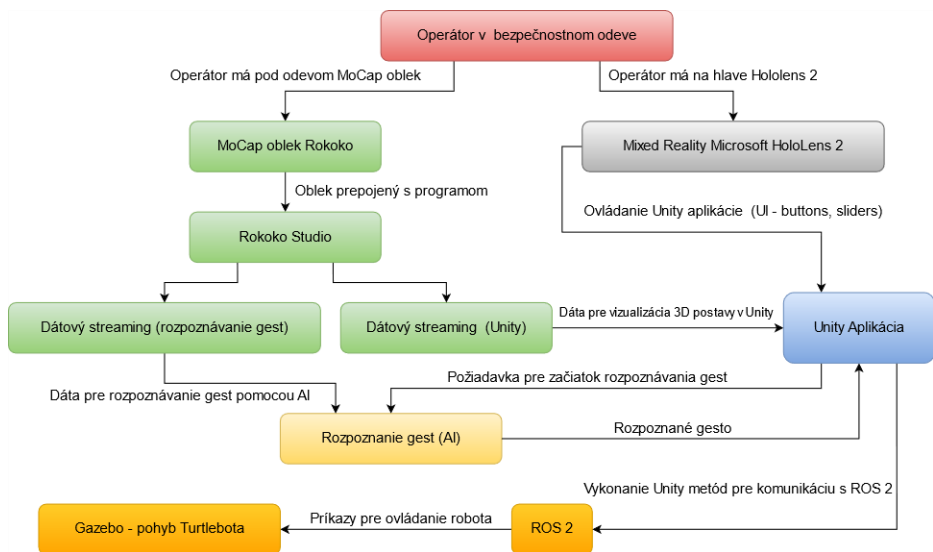
3.3 Konceptný návrh riešenia

Konceptný návrh aplikácie predstavuje základnú štruktúru a architektúru celého systému, ktorý bude slúžiť na ovládanie robotických zariadení pomocou gest operátora za použitia motion capture obleku a zmiešanej reality. Tento návrh zahŕňa všetky kľúčové komponenty, ich vzájomnú interakciu a spôsob, akým budú tieto komponenty pracovať v reálnom čase na dosiahnutie požadovaného výsledku. Cieľom tohto návrhu je poskytnúť prehľad o tom, ako budú jednotlivé technológie a nástroje integrované do jedného funkčného systému, ktorý bude schopný nielen presne rozoznávať gestá operátora, ale aj vizualizovať a interpretovať tieto gestá v kontexte riadenia robotov a zariadení v rôznych prostrediach.

3.3.1 Celkový pohľad na systém

Koncepcia aplikácie sa zakladá na kombinácii dvoch kľúčových technologických oblastí a to motion capture (na snímanie pohybov operátora) a zmiešanej reality (na vizualizáciu týchto pohybov a ovládanie robotických systémov). Hlavným cieľom je vytvoriť intuitívny a efektívny systém, ktorý umožní operátorovi ovládať roboty a mechanické zariadenia pomocou gest, ktoré sú prirodzené a intuitívne pre človeka. Tento prístup bude funkčný aj v prostrediach s obmedzenou viditeľnosťou alebo v nebezpečných situáciách, ako sú požiare, rádioaktívne zóny alebo dokonca vesmírne prostredie.

Ako môžeme vidieť aj na obrázku (Obrázok 4), tak hlavná myšlienka spočíva v tom, že motion capture oblek v reálnom čase zachytáva pohyby operátora, ktoré sú následne prenášané do aplikácie. Tieto údaje sú spracovávané a vyhodnocované pomocou neurónovej siete, ktorá rozpoznáva jednotlivé gestá. Výsledné gesto je následne vizualizované v Unity aplikácii, kde zároveň riadi simuláciu robota v Gazebo. Pre používateľa je k dispozícii interaktívne rozhranie prostredníctvom Microsoft HoloLens 2, ktoré umožňuje ovládať robota, manipulovať s objektmi a získať potrebné vizuálne informácie v reálnom čase.



Obrázok 4 Schéma fungovania aplikácie

3.3.2 Architektúra systému

Systém pozostáva z viacerých hlavných komponentov, ktoré spolupracujú a komunikujú, aby zabezpečili plynulý chod aplikácie. Architektúra je navrhnutá tak, aby umožnila efektívnu a rýchlu komunikáciu medzi hardvérom a softvérom.

Motion capture oblek (Rokoko SmartSuit Pro):

Oblek je vybavený inerciálnymi senzormi snímajúcimi pohyby celého tela operátora. Dáta spracúva softvér Rokoko Studio v reálnom čase a odosiela ich do Unity a Python skriptov. Oblek je pohodlný, flexibilný a prispôsobiteľný rôznym veľkostiam, čo umožňuje jeho nasadenie v rôznych pracovných podmienkach.

Neurónová sieť pre rozpoznávanie gest:

Dáta z obleku sú spracované neurónovou sieťou, ktorá ich klasifikuje do jednotlivých gest. Model je trénovaný na databáze pohybov operátora, čo zaručuje presné rozpoznávanie gest pre ovládanie robota.

Unity aplikácia:

Unity vizualizuje pohyby operátora v reálnom čase a sprostredkúva rozpoznané gestá do príkazov pre robotický simulátor Gazebo. Zároveň poskytuje vizuálnu spätnú väzbu operátorovi prostredníctvom 3D modelu postavy.

Gazebo:

Simulačný nástroj prepojený s ROS 2 umožňuje testovanie a ladenie robotických funkcií v realistickom 3D prostredí. Umožňuje bezpečne otestovať reakcie robota na gestá pred nasadením v reálnom svete.

Turtlebot (virtuálny robotický model):

V simulácii používame Turtlebot3 Burger, podporovaný v ROS 2. Robot prijíma povely na pohyb (vpred, vzad, otáčanie) a parametre ako rýchlosť či intenzita. Výstupom je simulovaná pozícia a orientácia robota v priestore.

Microsoft HoloLens 2:

Headset zmiešanej reality vizualizuje informácie o robotovi, jeho stave a akciách priamo pred očami operátora. Umožňuje aj interaktívne ovládanie pomocou gest a hlasu.

Robot Operating System 2 (ROS 2):

ROS 2 zabezpečuje komunikáciu medzi hardvérom a softvérom. Spoľahlivá a nízkolatenčná infraštruktúra umožňuje rýchle a presné spracovanie gest a príkazov v reálnom čase.

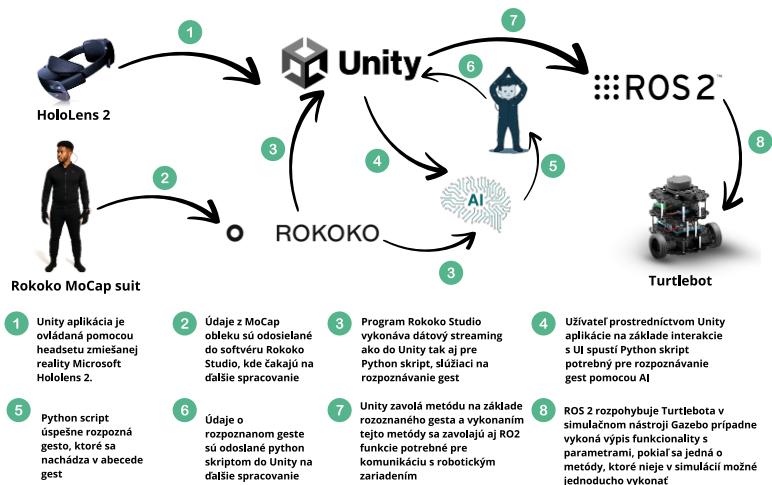
3.3.3 Princíp fungovania aplikácie

Celý proces (Obrázok 5) začína, keď si operátor nasadí motion capture oblek Rokoko SmartSuit Pro a vykoná gesto. Tento oblek sníma pohyby operátora, ktoré sa následne posielajú do počítača, kde ich spracováva neuronová sieť. Neuronová sieť analyzuje tieto pohyby a na základe tréningového modelu ich klasifikuje ako konkrétne gestá.

Tento spracovaný signál sa následne posielá do aplikácie Unity, ktorá zobrazuje gesto v 3D prostredí a vykonáva ďalšie operácie na vizualizáciu týchto pohybov. Operátor vidí okamžitú spätnú väzbu v reálnom čase, čo mu umožňuje okamžite reagovať a ďalej interagovať so systémom. Unity aplikácia zároveň komunikuje so simulačným nástrojom Gazebo, ktorý na základe rozpoznaného gesta riadi pohyb robota v simulovanom prostredí. Napríklad, ak operátor vykoná gesto na zmenu polohy robota alebo manipuláciu s objektom, Gazebo prevezme tento pokyn a vykoná požadovanú akciu.

Zároveň Microsoft HoloLens 2 poskytuje operátorovi vizuálnu spätnú väzbu či už z vykonávania a vyhodnocovania gest alebo o stave robota v simulačnom nástroji Gazebo. Tento interaktívny vizuálny zážitok má potenciál zvýšiť presnosť a efektivitu operácií. Prostredníctvom HoloLens 2 môže operátor v reálnom čase vidieť stav

analyzovania gest, ktoré vykonáva, a následne priamo ovládať pohyby a činnosti robota v prostredí, v ktorom sa nachádza.



Obrázok 5 Schéma architektúry hybridného HMI systému

4 Implementácia navrhnutého riešenia

Vývoj aplikácie na ovládanie robotických zariadení pomocou gest operátora prebiehal v niekoľkých kľúčových fázach, ktoré sa vzájomne prekrývali a navzájom ovplyvňovali. Každá z týchto fáz bola navrhnutá tak, aby sa dosiahla maximálna presnosť, efektívnosť a bezproblémová integrácia medzi jednotlivými komponentmi systému. V tejto kapitole si podrobne popíšeme jednotlivé kroky implementácie aplikácie, ktoré nakoniec viedli k vytvoreniu funkčného a robustného systému.

Prvým krokom vývoja aplikácie bolo nastavenie základnej štruktúry, ktorá zahrnovala všetky kľúčové komponenty systému - motion capture oblek, neurónovú sieť, Unity aplikáciu, Gazebo simulátor a HoloLens 2. Tento krok zahŕňal aj prípravu vývojového prostredia a integráciu potrebných knižníc a nástrojov, ako sú ROS 2, Python, C++, TensorFlow pre neurónovú sieť a ďalšie špecifické knižnice pre simuláciu a vizualizáciu.

Vývojové prostredie: Ako operačný systém sme zvolili Ubuntu, na ktorom bežali všetky softvérové komponenty. Na tento systém sme nainštalovali ROS 2, a nakonfigurovali základné uzly, ktoré neskôr zabezpečili komunikáciu medzi všetkými systémovými komponentmi (motion capture oblekom, Unity aplikáciou, Gazebo simulátorom a HoloLens 2).

Unity projekt: Vytvorili sme nový projekt v Unity, ktorý slúžil ako hlavná vizualizačná platforma pre zobrazenie pohybov operátora. V Unity sme nastavili základné 3D prostredie, ktoré bude zobrazovať pohyb operátora a interakciu s robotickými zariadeniami. Unity bolo následne prepojené s motion capture oblekom, čo umožnilo vizualizáciu pohybu v reálnom čase, čím sa zabezpečila plynulá spätná väzba pre operátora počas interakcie so systémom.

4.1 Vytvorenie databázy gest

Prvým krokom nášho riešenia bolo systematické navrhnutie a optimalizácia databázy gest, ktorá predstavuje kľúčovú časť pri ovládaní robotických systémov. Navrhované gestá musia spĺňať viacero požiadaviek. Napríklad musia byť intuitívne, prirodzené a jednoznačne rozpoznateľné neurónovou sieťou, aby bola zabezpečená čo najvyššia presnosť ich interpretácie v reálnom čase.

Výber gest preto nebol náhodný, bol výsledkom iteratívneho testovania a analýzy rôznych typov pohybov, pričom boli uprednostnené tie, ktoré:

- sú z hľadiska biomechaniky ľahko opakovateľné a odlišiteľné,
- majú nízku mieru prekryvania v dátach z pohybových senzorov,
- sú prakticky využiteľné v prostredí s obmedzenou pohyblivosťou (napr. v ochrannom obleku).

Na rozdiel od mnohých iných prístupov, ktoré využívajú výhradne diskrétny pohyby naša abeceda gest je koncipovaná ako hybridná pozostáva z:

- **diskrétnych gest**, ktoré majú jasne ohraničený začiatok a koniec a aktivujú konkrétnu akciu
- **spojitých gest**, ktoré vyjadrujú súvislú veličinu alebo smer (napr. upažovanie ruky na ovládanie intenzity jazdy robota).

Táto hybridná štruktúra umožňuje systému kombinovať výhody oboch prístupov. Presnosť a jednoznačnosť diskrétnych gest spolu s flexibilitou a plynulosťou spojitých pohybov. Takto navrhnutá abeceda gest predstavuje originálny prínos tejto práce a umožňuje sofistikovanejšiu a intuitívnejšiu interakciu medzi človekom a robotickým systémom.

- a) **„Starting position“** - Štartovacia pozícia (Obrázok 6) - Toto gesto označuje počiatočnú pozíciu operátora a je nevyhnutné k tomu, aby používateľ mohol pokračovať so zadávaním ostatných gest určených na ovládanie robotického zariadenia. Je predpokladom pre každú interakciu s robotickými systémami. Vychádza zo statickej pozície operátora, čo umožňuje systému "rozpoznať" začiatok operácie. Potrebnosťou zadania štartovacej pozície ako povinného gesta pred zadávaním ďalších gest sa snažíme zabrániť nechceným detekciám gest, ktoré by mohli viesť k chybným signálom pri ovládaní robotického zariadenia.



Obrázok 6 Gesto - Starting position

- b) **„Emergency stop“** - Núdzové ukončenie (Obrázok 7) - Toto gesto je používané vtedy, keď chce používateľ okamžite zastaviť vykonávanie predošlého gesta (napr. zastavenie pohybu robotického zariadenia, otáčania a pod.). Tento pohyb je kritický pre bezpečnosť a vyžaduje rýchlu a presnú detekciu.



Obrázok 7 Gesto - Emergency stop

- c) **„Turn left“** - Otočenie vľavo (Obrázok 8) - Gesto na otočenie robota doľava. Priamo za týmto gestom bude potrebné zadať gesto **„Movement Intensity“**, pre určenie intenzity otáčania.



Obrázok 8 Gesto - Turn left

- d) **„Turn right“** - Otočenie vpravo (Obrázok 9) - Gesto na otočenie robota doprava. Priamo za týmto gestom bude potrebné zadať gesto **„Movement Intensity“**, pre určenie intenzity otáčania.



Obrázok 9 Gesto - Turn right

- e) **„Move forward“** - Pohyb vpred (Obrázok 10) - Gesto na rozpohybovanie robotického zariadenia smerom vpred. Priamo za týmto gestom bude potrebné zadať gesto **„Movement Intensity“**, pre určenie intenzity pohybu.



Obrázok 10 Gesto - Move forward

- f) **„Move back“** - Pohyb vzad (Obrázok 11) - Gesto na rozpohybovanie robotického zariadenia smerom vzad. Rovnako, ako pri predošlých gestách bude za týmto gestom potrebné zadať gesto **„Movement Intensity“**, pre určenie intenzity pohybu.



Obrázok 11 Gesto - Move back

- g) **„Start flight“** – Vzlietnutie (Obrázok 12) - Gesto, pri ktorom môže robotické zariadenie vzlietnuť. Využiteľné pri dronoch, prípadne malých prieskumných zariadeniach.



Obrázok 12 Gesto - Start flight

- h) **„Activation of robotic arm“** (Obrázok 13) - Aktivácia robotického ramena - Gesto, ktoré aktivuje manipulátor robota, ktorý spúšťa manipuláciu s objektmi. Následná manipulácia s objektami pomocou robotického ramena by mohla byť vykonávaná pomocou gest a pohybu ruky, ktorá by simulovala robotické rameno.



Obrázok 13 Gesto - Activation of robotic arm

- i) **„Analysing samples“** (Obrázok 14) - Analýza vzoriek - Gesto na aktiváciu analýzy vzoriek, napríklad v laboratórnom alebo priemyselnom prostredí. Po tomto úkone môže nasledovať napríklad odovzdanie vzoriek.



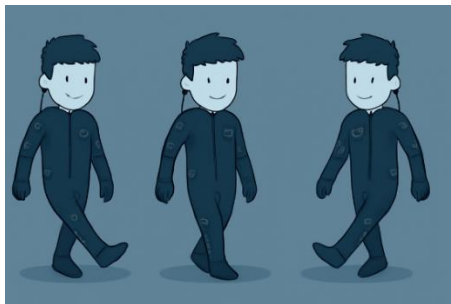
Obrázok 14 Gesto - Analysing samples

- j) **„Transmit samples“** (Obrázok 15) - Odoslanie vzoriek - Gesto signalizujúce odovzdanie alebo prenos vzoriek, ktoré robot zozbieral a analyzoval.



Obrázok 15 Gesto - Transmit samples

- k) **„Scanning environment“** (Obrázok 16) - Skenovanie prostredia - Gesto, ktoré signalizuje robotovi, že má začať skenovanie okolia, napríklad pri zisťovaní objektov alebo prekážok. Toto gesto sa vykonáva tak, že používateľ pravou nohou robí taký poloblúk pred sebou (ako keby skenuje nohou prostredie pred sebou).



Obrázok 16 Gesto - Scanning environment

- 1) **„Movement Intensity“** (Obrázok 17) - Intenzita pohybu - Takéto gesto je vhodné na plynulé riadenie parametrov, ktoré vyžadujú jemné a dynamické ovládanie. V tomto prípade vyjadruje napr. intenzitu pohybu, napríklad zvýšenie alebo zníženie rýchlosti robota vpred, vzad, alebo je možné toto gesto používať aj pri intenzite otáčania robotického zariadenia. Na rozdiel od diskretných gest, ktoré vyvolávajú konkrétnu jednorazovú akciu, toto gesto patrí medzi tzv. spojité gestá, teda ho systém nehodnotí binárne, ale priebežne interpretuje jeho hodnotu ako intenzitu pohybu.



Obrázok 17 Gesto - Movement intensity

Úspešne sa nám podarilo vytvoriť našu databázu gest. Avšak táto databáza je príliš malá, aby sme pri trénovaní a následnom rozpoznávaní gest dosiahli požadované výsledky. Tvorba takejto databázy je veľmi zdĺhavá, keďže treba každé gesto opakovať veľmi veľa krát. Rozhodli sme sa preto, že našu databázu gest umelo rozšírime prostredníctvom procesu augmentácie dát, čo je technika, ktorá umožňuje zväčšiť objem dát bez nutnosti manuálneho zberu nových vzoriek, a to napríklad pridaním šumu tj. jemnou úpravou hodnôt snímačov (polôh, rotácií).

Vytvorili sme skript, ktorý prešiel cez všetky naše záznamy gest a uložené hodnoty snímačov sme poposúvali o hodnoty „šumu“. Vďaka tomu sa nám gestá ako také nezmenili, no vytvorili sme si tak veľmi rozšírený dataset, ktorý bol potrebný pre ďalšie pokračovanie v tvorbe aplikácie.

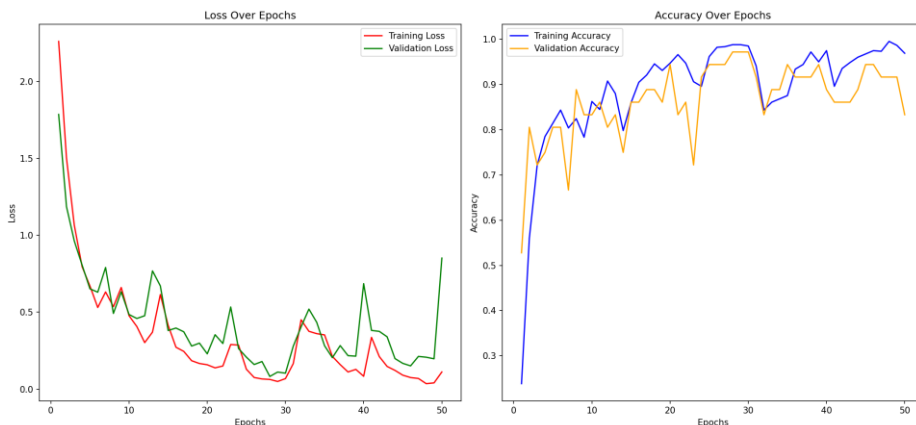
4.2 Trénovanie

Trénung LSTM neurónových sietí na rozpoznávanie gest z motion capture dát predstavuje výzvu spracovania informácií o pozíciách a rotáciách senzorov v reálnom čase. Tieto komplexné sekvencie pohybov umožňujú LSTM sieťam identifikovať dlhodobé závislosti medzi časovými bodmi. Cieľom je optimalizovať model tak, aby dokázal efektívne rozpoznávať rôzne typy pohybov a gest.

Naša práca vychádza z modelu vyvinutého v diplomovej práci [110] na Ústave automobilovej mechatroniky, ktorý využíval LSTM siete na rozpoznávanie jednoduchých gest z dát obleku Rokoko Smartsuit Pro 2. Naše riešenie sa zameriava na rozšírenie a optimalizáciu tohto prístupu pre komplexnejšie gestá a ich spracovanie v reálnom čase. V priebehu výskumu sme realizovali viacero tréningov modelov, pričom v tejto podkapitole sa venujeme tým, ktoré priniesli najlepšie výsledky.

1. Prvé trénovanie

Použitých bolo 12 gest, model so 2 LSTM vrstvami (90×69 vstupy) trénovaný 50 epoch. Rýchlo dosiahol (Obrázok 18) vysokú presnosť – z 23,8 %/52,8 % (train/val) v 1. epoche na 96,9 %/83,3 % v 50. epoche. Tento základný model poslúžil ako východisko pre ďalšie optimalizácie.



Obrázok 18 Zobrazenie priebehu prvého tréningu

2. Druhé tréovanie

Pridané dropout vrstvy (0,2) a stratifikované rozdelenie dát, lepšie ladenie hyperparametrov. Architektúra: 2 LSTM (128 a 64 jednotiek) + Dense, 50 epoch. Výsledok: 91,8 %/91,8 % (train/val), zlepšená generalizácia.

3. Tretie tréovanie

Implementovaná L2 regulácia na všetky váhy a dropout (0,2). Výsledok: 88,4 %/91,7 % (train/val) po 50 epochách, stabilnejší výkon a lepšia generalizácia oproti predchádzajúcim modelom.

4. Štvrté tréovanie

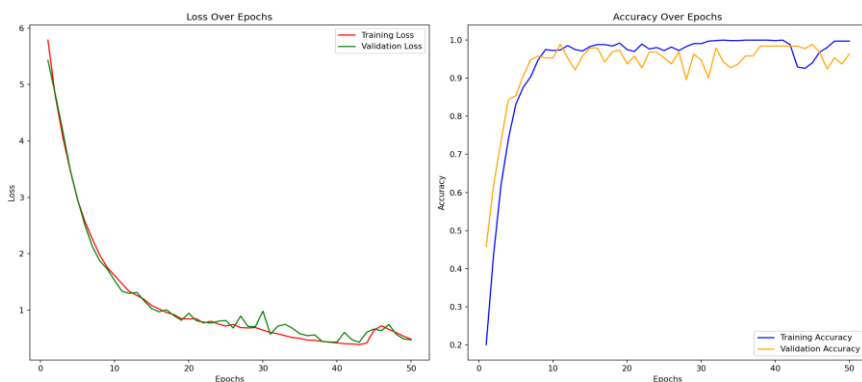
Použitý callback ReduceLROnPlateau a monitorovanie cez TensorBoard. Architektúra nezmenená, 50 epoch. Výsledok: 97,4 %/90,3 % (train/val), vyššia presnosť, no stále riziko overfittingu.

5. Piate tréovanie

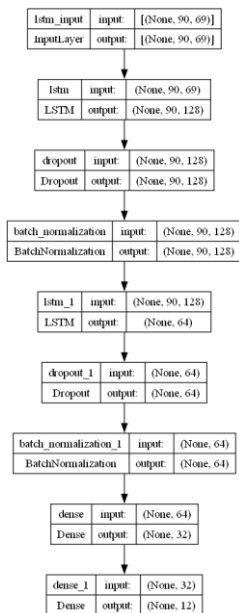
Nasadené bidirekcionálne LSTM vrstvy (128 a 64) + L2 regulácia a dropout (0,2). Výsledok: 95,7 %/91,7 % (train/val), lepšie zachytenie vzorov v dátach.

6. Šieste tréovanie (finálne)

Použitie bidirekcionálne LSTM (Obrázok 20), vyšší dropout (0,5), batch normalizácia a callbacky. Výsledok: 98,6 %/95,9 % (train/val) po 50 epochách – najstabilnejší a najpresnejší model (Obrázok 19).



Obrázok 19 Zobrazenie priebehu šiesteho tréovania



Obrázok 20 Model architektúry použitý pri šiestom tréningu

Zhrnutie tréningovania:

Na základe porovnania tréningovej presnosti (accuracy) (

Tabuľka 1) a validačnej presnosti (val_accuracy) (Tabuľka 2) v jednotlivých epochách je možné jasne určiť, ktoré tréningovanie dosiahlo najlepšie výsledky.

Tréningovanie 6 sa ukázalo ako najúspešnejšie zo všetkých. Dosiahlo najvyššiu finálnu validačnú presnosť 95,96 % a zároveň vykazoval stabilný rast počas všetkých 50 epoch. V porovnaní s ostatnými tréningami nemal výrazné prepady ani kolísanie v hodnotách validačnej presnosti. Rozdiel medzi tréningovou a validačnou presnosťou bol minimálny, čo znamená, že model sa nepreučil a dokáže dobre generalizovať na nové dáta.

Tabuľka 1 Porovnanie presnosti (accuracy) na tréningových počas tréningu

Tréning	accuracy (Ep 1)	accuracy (Ep 10)	accuracy (Ep 20)	accuracy (Ep 30)	accuracy (Ep 40)	accuracy (Ep 50)
Tréningovanie 1	22,83 %	86,26%	94,74 %	97,83 %	97,51 %	96,93 %
Tréningovanie 2	21,05 %	67,21 %	74,84 %	74,56 %	90,42 %	91,78 %
Tréningovanie 3	15,62 %	77,60 %	91,67 %	77,60 %	79,52 %	88,37 %
Tréningovanie 4	19,27 %	83,85 %	89,55 %	91,84 %	94,10 %	97,40 %
Tréningovanie 5	25,90 %	78,13 %	89,24 %	86,63 %	92,36 %	95,72 %
Tréningovanie 6	25,12 %	80,45 %	90,91 %	98,31 %	98,42 %	98,62 %

Tabuľka 2 Porovnanie presnosti (val_acc) na validačných dátach počas tréningu

Tréning	val_acc (Ep 1)	val_acc (Ep 10)	val_acc (Ep 20)	val_acc (Ep 30)	val_acc (Ep 40)	val_acc (Ep 50)
Tréningovanie 1	52,78 %	83,33 %	94,44 %	91,5 %	89,4 %	83,33 %
Tréningovanie 2	52,78 %	80,56 %	83,33 %	86,11 %	91,13 %	91,83 %
Tréningovanie 3	15,97 %	84,72 %	91,67 %	72,92 %	73,61 %	91,67 %
Tréningovanie 4	38,89 %	83,33 %	84,72 %	93,75 %	89,89 %	90,28 %
Tréningovanie 5	44,44 %	79,17 %	88,89 %	91,79%	91,44 %	91,67 %
Tréningovanie 6	45,28 %	79,67 %	87,22 %	95,31 %	97,92 %	95,96 %

Výber tohto modelu bol výsledkom postupného vylepšovania a experimentovania s rôznymi architektúrami a technikami regulácie počas viacerých tréningov. Bidirekcionálne LSTM vrstvy, ktoré spracovávajú dáta v oboch smeroch, sa ukázali ako veľmi efektívne pri zachytávaní vzorcov v sekvenčných dátach, čo je kľúčové pri rozpoznávaní gest.

Ďalej, batch normalizácia a dropout vrstvy pomohli stabilizovať učenie a zlepšiť generalizáciu modelu, čím sa minimalizovalo riziko pretrénovania. Model bol schopný dosiahnuť veľmi vysokú presnosť, čo ukazuje na jeho robustnosť a schopnosť generalizovať na predtým nevidených dátach.

Tento model sa ukázal ako najlepší na základe porovnania s predchádzajúcimi modelmi, pričom vykázal najlepší výkon na validačných dátach a zlepšenú stabilitu pri spracovaní sekvenčných dát. Model je pripravený na použitie v reálnych aplikáciách, kde bude potrebné presne a efektívne rozpoznať rôzne gestá v dynamických podmienkach.

4.3 Implementácia Unity aplikácie

V tejto kapitole popíšeme návrh, architektúru a hlavné komponenty Unity projektu, ktorý slúži na vizualizáciu a riadenie robotického systému na základe gest zachytených pomocou motion capture obleku Rokoko SmartSuit Pro a spracovaných v klasifikátore, ktorý sme si opísali v predošlej kapitole. Implementácia je rozdelená do dvoch hlavných scén:

- **HoloLensScene** – scéna určená pre nasadenie na Microsoft HoloLens 2, kde používateľ pracuje so zmiešanou realitou a taktiež je tu použitý prefab „ROSConnectionPrefab“, ktorý slúži na prepojenie s ROS2 a na ovládanie virtuálneho robotického zariadenia v Gazebe.
- **RokokoScene** – scéna určená na ladenie, kalibráciu a testovanie vstupov z motion capture obleku. Na základe týchto vstupov z motion capture obleku sa v Canvase pre používateľa zobrazia ako rozpoznané gestá tak aj samotný render 3D postavy, ktorá zrkadluje pohyb používateľa.

Implementácia UI v Unity je kľúčová pre intuitívnu interakciu používateľa s aplikáciou, najmä pri ovládaní robotických systémov a zmiešanej reality (HoloLens 2). UI musí byť jednoduché, prehľadné a použiteľné v rôznych podmienkach.

- **Dizajn používateľského rozhrania**

Pri návrhu UI bolo potrebné zohľadniť cieľovú skupinu používateľov, zariadenia a funkcionality aplikácie. Unity ponúka nástroje ako **Canvas**, **UI Elements**, základné komponenty (Text, Image, Button, Slider) a **MRTK (Mixed Reality Toolkit)** optimalizovaný pre HoloLens.

- **Dizajn pre MR (HoloLens 2):** UI prvky musia byť dobre viditeľné a umiestnené v 3D priestore tak, aby boli ľahko dosiahnuteľné. Pri HoloLens je možné využívať aj "gaze-based" interakciu (sledovanie očí), avšak v našom riešení sa hlavné funkcie ovládajú gestami z motion capture obleku.
- **Implementácia interaktívnych prvkov**

Používatelia môžu meniť parametre ako rýchlosť a smer robota. UI bolo implementované s nasledovnými prvkami:

- **Posuvníky (slidery):** nastavujú intenzitu rýchlosti. Hodnota sa primárne nastavuje podľa gesta (pozícia ruky), s možnosťou manuálneho doladenia cez HoloLens laserpointer.

- **Tlačidlá:** slúžia na spustenie a zastavenie analýzy gest, kalibráciu obleku a iné základné funkcie aplikácie.
- **Textové polia a vizualizácia príkazov:** zobrazujú aktuálne hodnoty (napr. rýchlosť robota, stav aplikácie) a rozpoznané gestá v reálnom čase.
- **Ovládanie cez gestá a pohyby**

UI podporuje ovládanie cez HoloLens a gestá rukou (ukazovanie, kliknutie, ťahanie) implementované pomocou MRTK (Obrázok 21). Väčšina interakcie však prebieha cez gestá z motion capture obleku – po rozpoznaní gesta aplikácia vykoná príslušnú akciu v Unity aj v simulátore Gazebo. Tento spôsob umožňuje intuitívne ovládanie UI bez fyzického dotyku a interakciu s 3D objektmi a virtuálnymi ovládacími prvkami.



Obrázok 21 Ilustrácia ovládanie aplikácie pomocou gest Hololens 2 (generované umelou inteligenciou s pomocou modelu DALL-E)

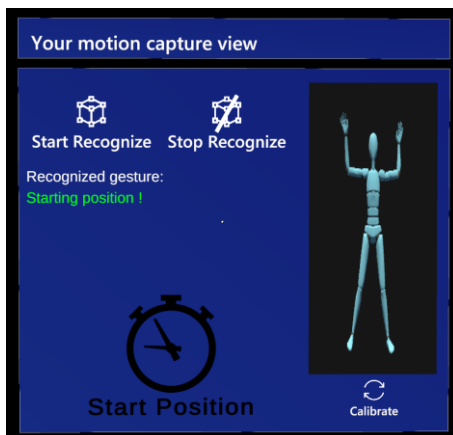
4.4 Princíp a ukážka fungovania aplikácie

Ukážka chodu aplikácie – gesto „Move forward“

Táto ukážka demonštruje interakciu používateľa s aplikáciou prostredníctvom gest a následné ovládanie robotického zariadenia v simulátore Gazebo. Proces pozostáva z niekoľkých krokov:

1. Detekcia a analýza gesta – pohyb vpred

Používateľ najprv vykoná gesto „**Starting position**“, ktoré pripraví systém na rozpoznávanie ďalších gest (Obrázok 22). Následne vykoná gesto pohybu vpred – oboma rukami smerom dopredu. Aplikácia analyzuje údaje zo senzorov motion capture obleku a zobrazí vizuálnu indikáciu, že gesto bolo rozpoznané.



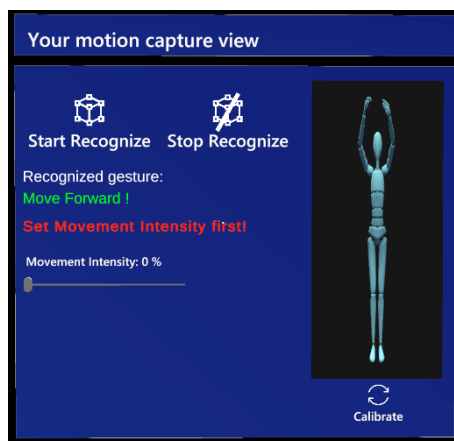
Obrázok 22 Ukážka detekcie štartovacej pozície

2. Opätovné zadanie gesta

Pre zvýšenie presnosti musí používateľ gesto pohybu vpred zopakovať (Obrázok 23). Tento krok minimalizuje riziko nesprávneho rozpoznania.

Poradie gest:

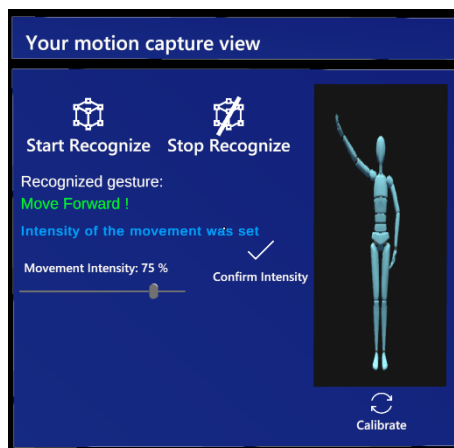
1. Starting position
2. Move forward
3. Move forward



Obrázok 23 Detekcia „Move Forward“ gesta + výzva na zadanie intenzity

3. Zadanie intenzity pohybu

Po potvrdení gesta používateľ zadáva intenzitu pohybu – rýchlosť robota. Intenzita sa nastavuje polohou pravej ruky (upažovanie) a vizuálne sa zobrazuje v UI aplikácie v reálnom čase (Obrázok 24).



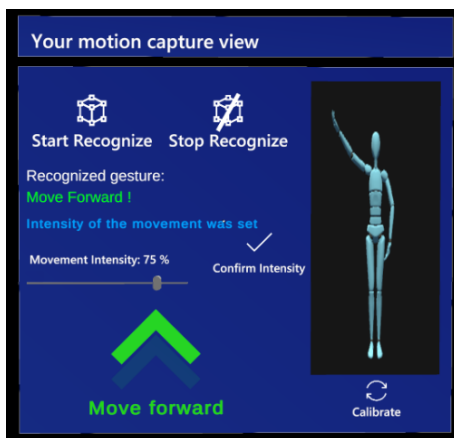
Obrázok 24 Zadanie intenzity pohybu

4. Potvrdenie gesta a intenzity

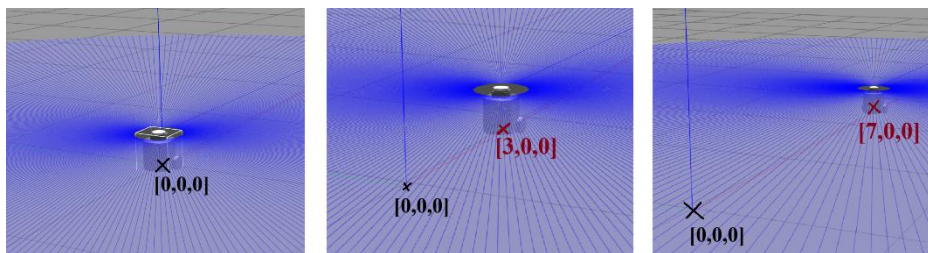
Po nastavení intenzity používateľ potvrdí hodnoty stlačením virtuálneho tlačidla „**Confirm Intensity**“ prostredníctvom HoloLens 2 gestovej interakcie.

5. Spustenie akcie v Unity a Gazebo

Aplikácia spustí animáciu pohybu robota vpred v prostredí Unity (Obrázok 25) a odošle príkaz do simulátora Gazebo. Robot (Turtlebot) sa pohybuje dopredu podľa zadanej intenzity (Obrázok 26).



Obrázok 25 Spustenie akcie pohybu vpred v Unity a Gazebo



Obrázok 26 Pohyb vpred Turtlebota v Gazebo

Táto ukážka ukazuje, ako systém integruje motion capture technológiu, gestovú interakciu, HoloLens 2 a ROS 2 pre ovládanie robotov. Proces – od detekcie gesta cez zadanie intenzity po vykonanie akcie – zabezpečuje vysokú presnosť a intuitívne ovládanie bez potreby tradičných ovládačov. Vďaka vizuálnej spätnej väzbe môže používateľ sledovať stav robota v reálnom alebo kvázi-reálnom čase.

Navrhnuté riešenie zvyšuje bezpečnosť, presnosť a efektivitu, čo je kľúčové v rizikových a náročných prostrediach. V budúcnosti môže byť aplikácia rozšírená o ďalšie funkcie a nové možnosti interakcie.

5 Diskusia

Dizertačná práca sa zamerala na vývoj metodiky a aplikačného systému umožňujúceho ovládanie mechatronických systémov prostredníctvom technológie snímania pohybu (motion capture) a rozhraní zmiešanej reality. Pri riešení problematiky bolo potrebné navrhnuť ucelený koncept integrácie zariadení motion capture obleku Rokoko SmartSuit Pro, zmiešanej reality Microsoft HoloLens 2 a robotického softvéru ROS 2, pričom jednotlivé časti systému museli spolupracovať v reálnom alebo kvázi reálnom čase.

Výsledky ukázali, že navrhnutý systém je schopný spoľahlivo rozpoznávať a prenášať gestá používateľa do riadiacich príkazov pre robotické zariadenia. Implementovaná metóda na báze neurónových sietí (LSTM) dokázala dosiahnuť vysokú úspešnosť rozpoznávania gest aj pri variabilite pohybov jednotlivých používateľov. Významným prínosom je aj možnosť interakcie so systémom prostredníctvom rozšíreného vizuálneho rozhrania HoloLens 2, čo zvyšuje intuitívnosť a bezpečnosť práce.

Napriek pozitívnym výsledkom existujú viaceré oblasti, ktoré je možné v budúcnosti rozvíjať. Najväčšou výzvou ostáva zvýšenie robustnosti rozpoznávania gest v zložitých podmienkach, ako sú obmedzenia priestorových možností pri snímaní pohybu. Ďalším smerom výskumu môže byť rozšírenie databázy gest o zložitejšie sekvencie a ich automatická adaptácia na konkrétne úlohy.

Naše riešenie predstavuje pokročilú platformu, ktorá má široké možnosti využitia nielen v priemyselných a záchranných operáciách, ale aj v iných oblastiach, ako sú simulácie v oblasti vzdialeného ovládania, teleoperácie robotov alebo výcvik operátorov v simulovaných prostrediach. Do budúcnosti plánujeme ďalej vylepšiť detekciu gest, pridať metódy umelej inteligencie na analýzu a adaptáciu na individuálne potreby používateľov a rozšíriť možnosti prepojenia s ďalšími robotickými systémami a zariadeniami.

Navrhnutý systém má potenciál nájsť uplatnenie v rôznych oblastiach od priemyselných aplikácií až po nasadenie v nebezpečných prostrediach, kde je nutné minimalizovať priamu prítomnosť človeka (napr. havarijné zásahy, rádioaktívne prostredia alebo vesmírne misie). Možnosti rozšírenia zahŕňajú aj prepojenie so systémami umelej inteligencie na vyššej úrovni, čo by umožnilo autonómne spracovanie príkazov a adaptívne riadenie robotických systémov.

Záver

Moderné metódy interakcie človek-stroj (angl. human-machine interface/interaction - HMI) nám dnes poskytujú širokú škálu možností, ktoré sa neustále vyvíjajú a zlepšujú. Táto dizertačná práca sa zaoberá modernými prístupmi v oblasti rozpoznávania gest operátora, ktoré majú potenciál výrazne zlepšiť používateľskú skúsenosť pri ovládaní robotických zariadení. Pri analýze aktuálneho stavu tejto problematiky a existujúcich riešení sme identifikovali niekoľko nedostatkov, ktoré so sebou prinášajú súčasné prístupy.

Existujúce riešenia sa prevažne zameriavajú na využívanie plošných kamerových systémov a hĺbkových kamier na detekciu gest operátora. Na spracovanie týchto dát sa v mnohých prípadoch využívajú pokročilé algoritmy a metódy výpočtovej inteligencie, ako sú konvolučné neurónové siete (CNN), ktoré sú efektívne pri analýze obrazu a rozpoznávaní vizuálnych vzorcov. Avšak tieto metódy majú výrazné obmedzenia, najmä v prípadoch, kde sú operátori vybavení ochrannými odevmi alebo kombinézami, ktoré výrazne znižujú presnosť a kvalitu vstupných dát. Tieto problémy sa vyskytujú najmä v rizikových povolaniach, ako sú hasiči, záchranári, pracovníci v rádioaktívnych prostrediach alebo astronauti, kde je nevyhnutné, aby operátori nosili ochranné obleky. Existujúce systémy by v týchto prípadoch nemohli fungovať efektívne, pretože ochranné obleky skresľujú alebo úplne blokujú detekciu gest s využitím kamerových systémov.

V predloženej dizertačnej práci sme navrhli originálne riešenie, ktoré odstraňuje uvedený zásadný problém. Naša metóda a aplikačný systém využíva motion capture oblek, ktorý môže byť pohodlne nosený pod bezpečnostným odevom alebo kombinézou. Takýto oblek umožňuje snímanie a rozpoznávanie pohybov (gest) aj v prípade, že operátor má na sebe ochranné oblečenie. Týmto je zabezpečené presné sledovanie gest v náročných a nebezpečných prostrediach, kde by využitie kamerových systémov nebolo možné.

Získané dáta z motion capture obleku sú následne spracovávané metódami výpočtovej inteligencie (vybranou triedou rekurentných neurónových sietí) a prevedené na povely určené na ovládanie mechatronického (robotického) zariadenia na báze meta operačného systému Robot Operating System 2 (ROS 2). ROS 2 bol zvolený z toho dôvodu, že predstavuje jednoznačnú budúcnosť robotických aplikácií, keďže podpora jeho predchodcu ROS 1 sa nezadržateľne blíži ku koncu. Jeho kľúčovou výhodou je

decentralizovaná architektúra, ktorá elimináciou centrálného riadiaceho uzla zvyšuje celkovú robustnosť systému a odstraňuje možný jediný bod zlyhania. Napriek tomu, že je ROS 2 na trhu už niekoľko rokov, stále pretrváva nedostatok komplexných demonstračných aplikácií pre vedeckú komunitu, a preto táto práca prispieva praktickou ukážkou jeho integrácie s modernými HMI technológiami.

Náš návrh ďalej zahŕňa rozhranie pre zmiešanú realitu (angl. mixed reality - MR), ktoré je implementované prostredníctvom headsetu pre zmiešanú realitu Microsoft HoloLens 2. Tento headset poskytuje operátorovi okamžitú vizuálnu spätnú väzbu, umožňuje ovládanie aplikácie, ktorá obsluhuje mechatronické zariadenie pomocou gest a zobrazuje aktuálny stav mechatronického zariadenia.

Prínosy dizertačnej práce možno zhrnúť do nasledovných bodov:

Definovanie abecedy gest pre ovládanie mechatronických systémov

Pre návrh a implementáciu modernej formy HMI pre mechatronické systémy s využitím motion capture oblekov bolo nevyhnutné navrhnuť efektívnu abecedu gest. Abeceda kombinuje diskrétné gestá pre jednoznačné príkazy (napr. štart, núdzové zastavenie) a spojité gestá pre plynulé ovládanie parametrov (napr. rýchlosť pohybu), čím vytvára funkčnú hybridnú abecedu gest.

Návrh a implementácia novej metódy HMI pre ovládanie mechatronických systémov s využitím motion-capture obleku

V rámci riešenie dizertačnej práce bol navrhnutý a implementovaný aplikačný systém pre podporu ovládania vybranej triedy mechatronických systémov s využitím motion capture obleku a navrhutej abecedy gest. Využitie inerciálneho motion-capture obleku prináša kľúčovú výhodu v podobe robustného rozpoznávania gest aj v náročných podmienkach, kde tradičné kamerové systémy zlyhávajú. Keďže sú senzory umiestnené priamo na tele operátora, je možné ich bez problémov nosiť pod ochrannými odevmi, ako sú hasičské kombinézy, protichemické obleky alebo skafandre. Týmto sa otvára možnosť ovládania mechatronických (robotických) zariadení gestami aj v prostrediach s výrazne zníženou alebo nulovou viditeľnosťou, napríklad v zadymených či prašných priestoroch, kde by snímanie pomocou kamerových systémov nebolo možné.

Implementácia používateľského rozhrania v zmiešanej realite pre novú metódu HMI

Navrhnuté riešenie je obohatené o používateľské rozhranie v zmiešanej realite, ktoré predstavuje ďalší kľúčový prvok zameraný na operátora. Tým, že sú všetky dôležité informácie (od stavu robota až po potvrdenie rozpoznaného gesta) premietané priamo do zorného poľa, aplikačný systém výrazne posilňuje intuitívnosť ovládania. Využitie headsetu tak prináša viaceré výhody a to najmä fakt, že ruky operátora zostávajú pri monitorovaní jednotlivých veličín alebo chybových stavov mechatronického systému a kontrole správnosti rozpoznaných gest voľné. Vyvinuté riešenie tak môžeme považovať za riešenie zamerané na človeka (angl. human-centric), čo je jeden z pilierov konceptu Industry 5.0.

Overenie navrhnutého a implementovaného aplikačného systému na virtuálnom mechatronickom systéme s využitím meta operačného systému ROS 2

Funkčnosť navrhnutého a implementovaného aplikačného systému bola experimentálne overená na virtuálnom modeli mechatronického (robotického) systému Turtlebot3 Burger, ktorý bol simulovaný v prostredí Gazebo. Komunikácia a riadenie boli zabezpečené prostredníctvom meta operačného systému ROS 2. Keďže je ROS 2 stále relatívne novou platformou s menším zastúpením v publikovaných vedeckých a vzdelávacích riešeniach, táto práca poskytuje cennú a praktickú ukážku jeho nasadenia v komplexnom HMI systéme.

Naše riešenie predstavuje pokročilú platformu, ktorá má potenciál širokého využitia nielen v priemyselných a záchranných operáciách, ale aj v iných oblastiach, ako sú simulácie v oblasti vzdialeného ovládania, teleoperácie robotov alebo výcvik operátorov v simulovaných prostrediach.

Na záver je možné konštatovať, že vyvinutú riešenie predstavuje významný krok vpred v oblasti interakcie človeka so strojom, najmä v rizikových profesiách, kde je potrebné zachovať bezpečnosť pri vykonávaní náročných operácií.

Publikačná činnosť autora

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 JANECKÝ, Dominik [30 %] - KUČERA, Erik [30 %] - HAFFNER, Oto [30 %] - VÝCHLOPEŇOVÁ, Erika [5 %] - ROSINOVÁ, Danica [5 %]. Using Mixed Reality for Control and Monitoring of Robot Model Based on Robot Operating System 2. In *Electronics*. Vol. 13, iss. 17 (2024), Art. no. 3554 [24] s. ISSN 2079-9292 (2024: 2.6 - JIF, Q2 - JIF Best Q, 0.615 - SJR, Q2 - SJR Best Q, 0.429 - AIS, Q3 - AIS Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/electronics13173554 ; WOS: 001311232400001 ; CC: 001311232400001 ; SCOPUS: 2-s2.0-85203631314.

Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V3

Ohlasy:

1. [1] SCHREITER, Josefine - MIELKE, Tonia - GEORGIADIS, Marilena - PECH, Maciej - HANSEN, Christian - HEINRICH, Florian. Exploring Interaction Concepts for the Manipulation of a Collaborative Robot: A Comparative Study. In: *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 2025, pp. 55-64. ISBN 979-835037893-1., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

ADC02 JANECKÝ, Dominik [30 %] - KUČERA, Erik [25 %] - HAFFNER, Oto [25 %] - KOŠUTZKÁ, Zuzana [10 %] - MARTIŠ, Pavol [10 %]. The Use of Mixed Reality for Exposure Therapy to Improve Phobia Handling. In *International Journal of Cognitive Behavioral Therapy*. Vol. 18, no. 2 (2025), s. 201-240. ISSN 3059-3042. V databáze: DOI: 10.1007/s41811-025-00237-4 ; SCOPUS: 2-s2.0-105007821345 ; WOS: 001456800800001.

Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V3

ADF Vedecké práce v ostatných domáciach časopisoch

ADF01 KUČERA, Erik - HAFFNER, Oto - JANECKÝ, Dominik. Monitoring of discrete-event system controlled by revolution Pi using 3D engine. In *Information Technology Applications : 31st International Conference on Cybernetics & Informatics (K&I)*. Visegrád, Maďarsko. 11-14 September 2022. Vol. 11, No. 1 (2022), s. 27-34. ISSN 1338-6468.

Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V3

AEC Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

AEC01 KUČERA, Erik [21 %] - HAFFNER, Oto [21 %] - JANECKÝ, Dominik [51 %] - ROSINOVÁ, Danica [7 %]. Learning tool for phobia handling based on virtual reality. In *Learning with Technologies and Technologies in Learning : Experience, Trends and Challenges in Higher Education*. Cham : Springer, 2022, s. 155-185. ISBN 978-3-031-04285-0. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85138159845 ; DOI: 10.1007/978-3-031-04286-7_8.

Typ výstupu: príspevok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2

Ohlasy:

1. [1] GUTIERREZ-SANCHEZ, Ma de Jesus - GONZALEZ-ISLAS, Juan Carlos - HUERTA-ORTIZ, Luis Manuel - FRANCO-ARCEGA, Anilu - VAZQUEZ-VAZQUEZ, Vanessa Monserrat - SUAREZ-NAVARRETE, Alberto. Usability and Affects Study of a Virtual Reality System Toward Scorpion Phobia Exposure Therapy. In: *Applied Sciences (Switzerland)*, 2024, vol. 14, no. 22, art. no. 10569. ISSN 2076-3417., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC

Ohlas: zahraničný

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 BEŇO, Lukáš [55 %] - KUČERA, Erik [10 %] - HAFFNER, Oto [10 %] - MEČÍR, Martin [5 %] - PAJPACH, Martin [10 %] - JANECKÝ, Dominik [10 %]. Transforming IoT with Scalable Serverless Architecture for Enhanced Data Collection. In *CINS 2024 : 2nd International conference on computational intelligence & network systems*. Dubai, UAE. November 28-29, 2024. Danvers : IEEE, 2024, [6] s. ISBN 979-8-3315-0410-6. V databáze: DOI: 10.1109/CINS63881.2024.10864436 ; IEEE: 10864436 ; SCOPUS:

2-s2.0-85219517502.

- AFC02 Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2
HAFFNER, Oto [75 %] - KUČERA, Erik [5 %] - BEŇO, Lukáš [5 %] - PRIBÍŠ, Rudolf [5 %] - PAJPACH, Martin [5 %] - JANECKÝ, Dominik [5 %]. Gesture Recognition System Based on Motion Capture Suit and LSTM Neural Network. In *MoSiCom 2023 : International Conference on Modelling, Simulation & Intelligent Computing. Dubai, UAE. December 7-9, 2023*. Piscataway : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-9341-5. V databáze: IEEE: 10458746 ; DOI: 10.1109/MoSiCom59118.2023.10458746 ; SCOPUS: 2-s2.0-85190160409.
- Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2
Ohlasy:
1. [1] LACKO, Ján. Immersive simulation of skydiving in wind tunnels: exploring virtual reality for training and experience enhancement. In: *Cogent Engineering*, 2025, Vol. 12, no. 1, art. no. 2490527. ISSN 2331-1916., Registrované v: SCOPUS, WOS
Ohlas: zahraničný
- AFC03 HAFFNER, Oto [55 %] - POTAPOV, Dmytro [5 %] - KUČERA, Erik [10 %] - BEŇO, Lukáš [10 %] - PAJPACH, Martin [10 %] - JANECKÝ, Dominik [10 %]. Augmentation of Handwritten Slovak Diacritical Letters Using GAN networks. In *CINS 2024 : 2nd International conference on computational intelligence & network systems. Dubai, UAE. November 28-29, 2024*. Danvers : IEEE, 2024, [8] s. ISBN 979-8-3315-0410-6. V databáze: DOI: 10.1109/CINS63881.2024.10864462 ; IEEE: 10864462 ; SCOPUS: 2-s2.0-85219544257.
- AFC04 Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2
JANECKÝ, Dominik [90 %] - KUČERA, Erik [5 %] - HAFFNER, Oto [5 %]. HoloLens 2 and virtual reality as a methods for managing phobias. In *2022 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj] : Proceedings ; 31st International Conference; 11-14 September 2022 Visegrád, Maďarsko*. 1. vydanie. Danvers, Massachusetts, USA : IEEE, 2022, [7] s. ISBN 978-1-6654-8775-7. V databáze: DOI: 10.1109/KI55792.2022.9925954 ; SCOPUS: 2-s2.0-85142016590 ; IEEE: 9925954.
- Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2
Ohlasy:
1. [1] ABDULLA, Shehab - GATZOULIS, Christos. An Exploration of Virtual Environments as Therapeutic Tools. In: *2024 Beyond Technology Summit on Informatics International Conference, BTS-12C 2024, 2024*, pp. 619-624. ISBN 979-833150857-9., Registrované v: SCOPUS
Ohlas: zahraničný
- AFC05 JANECKÝ, Dominik [80 %] - KUČERA, Erik [5 %] - HAFFNER, Oto [5 %] - KIŠŠ, Juraj [5 %] - PAJPACH, Martin [5 %]. Application For Interfacing 3D Engine Unity With Robot Operating System. In *MoSiCom 2023 : International Conference on Modelling, Simulation & Intelligent Computing. Dubai, UAE. December 7-9, 2023*. Piscataway : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-9341-5. V databáze: IEEE: 10458802 ; DOI: 10.1109/MoSiCom59118.2023.10458802 ; SCOPUS: 2-s2.0-85190095472.
- Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2
Ohlasy:
1. [1] FENG, Jiangang - LIN, Dan. Top-level design of AI monitoring system architecture based on multi-interactive metaverse strategy. In: *2024 7th International Conference on Computer Information Science and Application Technology, CISAT 2024, 2024*, pp. 660-667. ISBN 979-835037510-7., Registrované v: SCOPUS
Ohlas: zahraničný
- AFC06 KUČERA, Erik [75 %] - HAFFNER, Oto [5 %] - BEŇO, Lukáš [5 %] - PRIBÍŠ, Rudolf [5 %] - PAJPACH, Martin [5 %] - JANECKÝ, Dominik [5 %]. Monitoring and Control of Discrete-Event System Using Augmented Reality and Open-Source PLC. In *MoSiCom 2023 : International Conference on Modelling, Simulation & Intelligent Computing. Dubai, UAE. December 7-9, 2023*. Piscataway : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-9341-5. V databáze: IEEE: 10458771 ; DOI: 10.1109/MoSiCom59118.2023.10458771 ; SCOPUS: 2-s2.0-8519011724.
- Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2

- AFC07 KUČERA, Erik [80 %] - HAFFNER, Oto [5 %] - SHEVSKA, Myroslava [5 %] - JANECKÝ, Dominik [10 %]. Evaluation of Motion-Capture Suit Data and Gesture Recognition Using LSTM and GRU Neural Networks. In *Cybernetics & Informatics (K&I) 2025 : 32nd International IEEE conference. Mikulov, Czech Republic. February 2-5, 2025*. 1. vyd. Danvers : IEEE, 2025, S. 138-143. ISSN 2767-875X. ISBN 979-8-3315-4181-1. V databáze: DOI: 10.1109/KI64036.2025.10916444 ; IEEE: 10916444.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2
- AFC08 PAJPACH, Martin [70 %] - SEKERÁK, Ľuboš [5 %] - KUČERA, Erik [5 %] - HAFFNER, Oto [5 %] - PRIBÍŠ, Rudolf [5 %] - BEŇO, Lukáš [5 %] - JANECKÝ, Dominik [5 %]. Exspiro - mobile application for food sustainability. In *MoSiCom 2023 : International Conference on Modelling, Simulation & Intelligent Computing. Dubai, UAE. December 7-9, 2023*. Piscataway : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-9341-5. V databáze: IEEE: 10458770 ; DOI: 10.1109/MoSiCom59118.2023.10458770 ; SCOPUS: 2-s2.0-85190095883.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2
Ohlasy:
1. [1] SANTOS, Ezequiel - SEVIVAS, Cláudia - CARVALHO, Vítor. Managing Food Waste Through Gamification and Serious Games: A Systematic Literature Review. In: *Information (Switzerland)*, 2025, Vol. 16, no. 3, art. no. 246. ISSN 2078-2489., Registrované v: SCOPUS, WOS
Ohlas: zahraničný
- AFC09 PAJPACH, Martin [55 %] - KUČERA, Erik [10 %] - HAFFNER, Oto [10 %] - BEŇO, Lukáš [10 %] - JANECKÝ, Dominik [10 %] - VOJTKO, Dušan [5 %]. ARValidat - Application for checking the status of CAD assemblies in AR. In *CINS 2024 : 2nd International conference on computational intelligence & network systems. Dubai, UAE. November 28-29, 2024*. Danvers : IEEE, 2024, [7] s. ISBN 979-8-3315-0410-6. V databáze: DOI: 10.1109/CINS63881.2024.10864425 ; IEEE: 10864425 ; SCOPUS: 2-s2.0-85219581968.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2
- AFC10 PRIBÍŠ, Rudolf [60 %] - HAFFNER, Oto [5 %] - BEŇO, Lukáš [5 %] - JANECKÝ, Dominik [5 %] - KUČERA, Erik [5 %] - PAJPACH, Martin [5 %] - JURÍŠ, Adam [5 %] - HAMRÁK, Michal [5 %] - ZAJAC, Šimon [5 %]. Emerging Trends in Education For Industry 4.0 and 5.0 Engineers in Slovakia Using E-learning Web Applications. In *MoSiCom 2023 : International Conference on Modelling, Simulation & Intelligent Computing. Dubai, UAE. December 7-9, 2023*. Piscataway : IEEE, 2023, [6] s. ISBN 979-8-3503-9341-5. V databáze: IEEE: 10458852 ; DOI: 10.1109/MoSiCom59118.2023.10458852 ; SCOPUS: 2-s2.0-85190156145.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2

AfD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AfD01 JANECKÝ, Dominik [80 %] - KUČERA, Erik [20 %]. Využitie aplikácie virtuálnej reality ako príspevok pri zvládání fóbii. In *ŠVOČ 2021 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác. 21. apríl 2021*. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, S. 41-47. ISBN 978-80-227-51 04-9.
Typ výstupu: príspevok; Výstup: domáci; Kategória publikácie od 2022: V2
- AfD02 LESKOVSKÝ, Roman [30 %] - KUČERA, Erik [30 %] - HAFFNER, Oto [30 %] - JANECKÝ, Dominik [5 %] - LAPŠANSKÁ, Lea [5 %]. Innovative applications of virtual and augmented reality for industry and services. In *ELITECH '21 [elektronický zdroj] : 23th Conference of Doctoral Students, May 26, 2021*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, [7] s. ISBN 978-80-227-5098-1.
Výstup: domáci; Kategória publikácie od 2022: V2

AfK Postery zo zahraničných konferencií

- AfK01 JANECKÝ, Dominik [55 %] - KUČERA, Erik [10 %] - HAFFNER, Oto [10 %] - PAJPACH, Martin [10 %] - BEŇO, Lukáš [10 %] - JANÍK, Daniel [5 %]. Interactive Solar System Simulation: From Formation to Demise. In *CINS 2024 : 2nd International Conference on Computational Intelligence & Network Systems. Book of abstracts. Dubai, UAE. November 28-29, 2024*. Dubai : PITS Pilani Dubai Campus, 2024, [6] s.
Typ výstupu: poster z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: O2

AFK02 KUČERA, Erik [20 %] - HAFFNER, Oto [10 %] - BEŇO, Lukáš [10 %] - MELEKHOVA, Anna [40 %] - PAJPACH, Martin [10 %] - JANECKÝ, Dominik [10 %]. Processing of Motion-Capture Suit Data and Gesture Recognition for Mechatronic System Control. In *CINS 2024 : 2nd International Conference on Computational Intelligence & Network Systems. Book of abstracts. Dubai, UAE. November 28-29, 2024*. Dubai : PITS Pilani Dubai Campus, 2024, [6] s.
Typ výstupu: poster z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: O2

BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

BEF01 JANECKÝ, Dominik [60 %] - KUČERA, Erik [18 %] - HAFFNER, Oto [17 %] - KUŠNIRÁK, Kamil [5 %]. Virtual reality as a tool for managing phobias. In *ELITECH'22 [elektronický zdroj] : 24th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovakia. June 1, 2022*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2022, [8] s. ISBN 978-80-227-5192-6.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie od 2022: O2

BEF02 JANECKÝ, Dominik [90 %] - KUČERA, Erik [5 %] - HAFFNER, Oto [5 %]. Exposure therapy with virtual and mixed reality. In *ELITECH'23 [elektronický zdroj] : 25th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovakia. May 31, 2023*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023, [8] s. ISBN 978-80-227-5298-5.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie od 2022: O2

BEF03 JANECKÝ, Dominik [70 %] - KUČERA, Erik [15 %] - HAFFNER, Oto [15 %]. Exposure therapy using virtual and mixed reality. In *AI&VR : 1st International Workshop Artificial Intelligence & Virtual Reality 2023. Bratislava, Slovakia. June 27, 2023*. 1. ed. Bratislava : Slovak Chemical Library, 2023, S. 45-63. ISBN 978-80-8208-105-6.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie od 2022: O2

BFA Abstrakty odborných prác zo zahraničných podujatí (konferencie...)

BFA01 BEŇO, Lukáš [55 %] - KUČERA, Erik [10 %] - HAFFNER, Oto [10 %] - MEČÍR, Martin [5 %] - PAJPACH, Martin [10 %] - JANECKÝ, Dominik [10 %]. Transforming IoT with Scalable Serverless Architecture for Enhanced Data Collection. In *CINS 2024 : 2nd International Conference on Computational Intelligence & Network Systems. Book of abstracts. Dubai, UAE. November 28-29, 2024*. Dubai : PITS Pilani Dubai Campus, 2024, S. 12-12.

Typ výstupu: abstrakt z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: O2

BFA02 HAFFNER, Oto [55 %] - POTAPOV, Dmytro [5 %] - KUČERA, Erik [10 %] - BEŇO, Lukáš [10 %] - PAJPACH, Martin [10 %] - JANECKÝ, Dominik [10 %]. Augmentation of Handwritten Slovak Diacritical Letters Using GAN networks. In *CINS 2024 : 2nd International Conference on Computational Intelligence & Network Systems. Book of abstracts. Dubai, UAE. November 28-29, 2024*. Dubai : PITS Pilani Dubai Campus, 2024, S. 16-16.

Typ výstupu: abstrakt z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: O2

BFA03 PAJPACH, Martin [55 %] - KUČERA, Erik [10 %] - HAFFNER, Oto [10 %] - BEŇO, Lukáš [10 %] - JANECKÝ, Dominik [10 %] - VOJTKO, Dušan [5 %]. ARValidat - Application for checking the status of CAD assemblies in AR. In *CINS 2024 : 2nd International Conference on Computational Intelligence & Network Systems. Book of abstracts. Dubai, UAE. November 28-29, 2024*. Dubai : PITS Pilani Dubai Campus, 2024, S. 9-9.

Typ výstupu: abstrakt z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: O2

Štatistika: kategória publikačnej činnosti do 2021

ADC	Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch	2
ADF	Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch	1
AEC	Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách	1
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	10
AFD	Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách	2
AFK	Postery zo zahraničných konferencií	2
BEF	Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)	3
BFA	Abstrakty odborných prác zo zahraničných podujatí (konferencie...)	3
Súčet		24

Štatistika: kategória ohlasov od 2022

1 Citácia v publikácii registrovaná v citačných indexoch				6
	Zahraničné		6	
Súčet				6

Zoznam použitej literatúry

1. HUBINSKÝ, P.; TÖLGYESSY, M. *Metódy na riadenie mobilných robotických systémov pomocou gest*. s.l.: AT&P Journal. 2011. [Online] [Dátum: 15.1. 2022.]
https://www.researchgate.net/publication/269099575_Robot_Control_Using_Hand_Gesture_Recognition_Overview
2. DONG, Y.; LIU, J.; YAN, W. *Dynamic Hand Gesture Recognition Based on Signals From Specialized Data Glove and Deep Learning Algorithms*. s.l.: IEEE, 2021. Transactions on Instrumentation and Measurement, Print ISSN: 0018-9456. Electronic ISSN: 1557-9662. DOI: 10.1109/TIM.2021.3077967.
3. KURUVILLA, J.; ABIMANYU, M.; RISHI, R.; ARAVIND, M.; SHANANA, S. *Novel Technique of Gesture Recognition for Car Infotainment Control*. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2019. ISSN: 2278-3075 Retrieval Number: L34581081219/2019©BEIESP. DOI: 10.35940/ijitee.L3458.119119.
4. TÖLGYESSY, M.; DEKAN, M.; CHOVANEC, E. *Skeleton Tracking Accuracy and Precision Evaluation of Kinect V1, Kinect V2, and the Azure Kinect*. Special Issue Social Robotics and Human-Robot Interaction (HRI), 2021, DOI: 10.3390/app11125756.
5. TELLAECHÉ, A.I.; FIDALGO, I.A.; VÁZQUEZ, I.G.; SAIKIA, S. *Gesture-Based Human Machine Interaction Using RCNNs in Limited Computation Power Devices*. Special Issue Sensors in Intelligent Industrial Applications, 2021 DOI: 10.3390/s21248202.
6. NUZZI, C.; PASINETTI, S.; PAGANI, R.; DOCCHIO, F.; SANSONI, G. *Hand Gesture Recognition for Collaborative Workstations: A Smart Command System Prototype*. s.l.: Springer, 2019. International Conference on Image Analysis and Processing. Print ISBN 978-3-030-30753-0. Online ISBN 978-3-030-30754-7. DOI: 10.1007/978-3-030-30754-7_33.
7. CHICO, A.; PATRICIO, J.; CRUZ, J.; VÁSCONEZ, J.P.; BENALCÁZAR, M.E. *Hand Gesture Recognition and Tracking Control for a Virtual UR5 Robot Manipulator*. s.l.: IEEE, 2021. Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM). Electronic ISBN:978-1-6654-4141-4. Print on Demand (PoD) ISBN:978-1-6654-4142-1. DOI: 10.1109/ETCM53643 .2021.9590677.
8. VYSOCKÝ, A.; PASTOR, R.; NOVÁK, P. Aleš Vysocký, Robert Pastor & Petr Novák *Interaction with Collaborative Robot Using 2D and TOF Camera*. s.l.: Springer, 2019. Lecture Notes in Computer Science book series (LNISA, volume 11472). Print ISBN 978-3-030-14983-3. Online ISBN 978-3-030-14984-0. DOI: 10.1007/978-3-030-14984-0_35.
9. SHIGUEYUKI, T.; YIWEI, Z.; FANXING, M. *Hand Gesture Recognition System for In-car Device Control Based on Infrared Array Sensor*. *Electronic*. s.l.: IEEE, 2019 , 58th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). ISBN:978-4-9077-6467-8. USB ISBN:978-4-907764-66-1. Print on Demand (PoD) ISBN:978-1-7281-5035-2. DOI: 10.23919/SICE.2019.8859832.
10. GUO, L.; ZONGXING, L.; LIGANG, Y. *Human-Machine Interaction Sensing Technology Based on Hand Gesture Recognition: A Review*. s.l.: IEEE, 2021, IEEE Transactions on Human-Machine Systems. Print ISSN: 2168-2291. Electronic ISSN: 2168-2305. DOI: 10.1109/THMS.2021.3086003.
11. KOBZAREV, I.; ZHANG, R.; MOGHADDAM, F. M. *GestLLM: A Large Language Model Based Framework for Hand Gesture Recognition*, s.l.: arXiv preprint, 2025, arXiv:2501.07295, [Online] [Dátum: 12.5. 2025].
<https://arxiv.org/abs/2501.07295>

12. CHEN, R.; SHEK, A.; LIU, C. *Robust and Context-Aware Real-Time Collaborative Robot Handling via Dynamic Gesture Commands*, s.l.: arXiv preprint, 2023. arXiv:2304.06175., [Online] [Dátum: 12.5. 2025.]. <https://arxiv.org/abs/2304.06175>
13. HUSSAIN, S.; SAEED, K.; BAIMAGAMBETOV, A.; RAB, S.; SAAD, M. *Advancements in Gesture Recognition Techniques and Machine Learning for Enhanced Human-Robot Interaction: A Comprehensive Review*. s.l.: arXiv preprint, 2024. arXiv:2409.06503. [Online] [Dátum: 12.5. 2025.]. <https://arxiv.org/abs/2409.06503>
14. LIU, Y.; WANG, H.; ZHANG, X.; WU, J. *Computer Vision-Based Hand Gesture Recognition for Human-Robot Interaction: A Review*, Springer, 2023. In: Smart Industrial Systems and Applications, DOI: 10.1007/s40747-023-01173-6
15. WALUNJ, S.; MASHHADITAFRESHI, N.; PAHLEVANNEJAD, P.; WAGNER, A.; RUSKOWSKI, M. *Human-Robot Interaction Through Egocentric Hand Gesture Recognition*. Springer, 2025. In: Advances in Artificial Intelligence in Manufacturing II, Print ISBN: 978-3-031-86489-6. DOI: 10.1007/978-3-031-86489-6_14
16. KUČERA, E.; HAFFNER, O.; BEŇO, L.; MELEKHOVA, A.; PAJPACH, M.; JANECKÝ, D. *Processing of Motion-Capture Suit Data and Gesture Recognition for Mechatronic System Control*. s.l.: IEEE, 2024. Proceedings of the 2nd International Conference on Computational Intelligence and Network Systems (CINS 2024), Dubai, UAE. DOI: 10.13140/RG.2.2.21113.38241.
17. SIGETI, J. *Rozpoznávanie gest pre úlohy ovládania mechatronického systému*. 2023. Diplomová práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- Autor touto cestou uvádza využitie nasledovných nástrojov umelej inteligencie, ktoré boli použité na pomoc s prekladmi textu do slovenského jazyka a na gramatickú úpravu rukopisu. Tieto nástroje slúžili na zlepšenie jazykovej presnosti a zrozumiteľnosti textu, pričom bol zachovaný pôvodný zámer autora aj odborná úroveň práce.

Nástroje umelej inteligencie:
OpenAI (2025), ChatGPT 4o

Nástroj umelej inteligencie:
OpenAI (2025), ChatGPT 4o
Microsoft (2025), Copilot