

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Zuzana Kovariková

Autoreferát dizertačnej práce

**Robotizované pracovisko pre inteligentné zváranie
maloobjemovej výroby**

na získanie:

akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Robotika a kybernetika

v študijnom odbore:

Kybernetika

Miesto a dátum:

Bratislava, 2023

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Ústave robotiky a kybernetiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľka: Ing. Zuzana Kovariková
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav robotiky a kybernetiky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. František Duchoň, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav robotiky a kybernetiky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponent: prof. Ing. Michal Kelemen, PhD.
Technická univerzita Košice
Strojnícka fakulta
Katedra mechatroniky
Letná 9, 042 00 Košice

Oponent: prof. Ing. Maximilián Strémy, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Materiálovo technologická fakulta
Ústav výskumu progresívnych technológií
Ulica Jána Bottu 2781/25, 91 724 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný:.....

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 23.08.2023 o 10:00 v miestnosti:

.....
prof. Ing. Vladimír Kutíš, PhD.
Dekan Fakulty elektrotechniky
a informatiky STU v Bratislave

ANOTÁCIA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Kľúčové slová: robotizované zváranie, priemyselné roboty, robotické manipulátory, 2D laserové meranie parametrov zvarovej medzery, 3D laserové meranie pozície obrobkov, automatizované odoberanie súčastí robotmi, silovo-momentové riadenie pohybu robota, digitalizácia výroby, umelá inteligencia

Robotizované zváranie je v podmienkach veľkoobjemovej výroby úspešne vyriešené - napr. automobilový priemysel. Avšak neexistujú univerzálne robotizované pracoviská, schopné zvärať výrobky s vysokou variabilitou a v malých množstvách. Cieľom tejto práce je celkový návrh takéhoto pracoviska s viacerými robotmi, ktoré sa dokáže inteligentne prispôbiť na predložený výrobok, jeho model zvárania a jeho polohovanie pomocou iného robota.

Robotic welding in the terms of high volume production is successfully solved - e.g. in automotive industry. However, there are no universal robotic workplaces capable to weld products with high variability and in small volume. The aim of this work is to propose an overall concept of such workplace with several robots, which will be able to intelligently adapt to submitted product, its model of welding and positioning by other robot.

Obsah

Úvod.....	6
Tézy.....	7
1 Model prototypu inteligentného polohovacieho a zvaracieho pracoviska	8
1.1 Opis súčastí navrhnutého prototypu inteligentného polohovacieho a zvaracieho pracoviska.....	9
1.1.1 Automatizovaný rýchlo výmenný systém robotických chápadiel.....	10
1.1.2 Systém riadenia robotického polohovania súčastí od silovo-momentového snímača 12	
1.1.3 Systém robotizovaného zvarania typu TIG	13
1.1.4 Systém automatizovaného robotického odoberania voľne uložených súčastí z ich skladov pomocou 3D laserových snímačov	14
1.1.5 Systém automatickej korekcie zvarovej medzery a generovania parametrov zvaracej trajektórie s využitím 2D laserového skenera	15
1.1.6 Centrálny riadiaci systém, technologický počítačový systém a HMI systém	16
1.1.7 Databáza údajov a webový portál	17
2 Návrh a vývoj metód digitalizácie výroby a údržby robotizovaného polohovacieho a zvaracieho pracoviska s vysokou automatizovanou premenlivosťou výrobkov.....	18
3 Návrh adaptívnych algoritmov automatizovaného prestavenia robotizovaného zvaracieho pracoviska na báze umelej inteligencie	20
3.1.1 Výber podstatných vstupov pre získanie užitočných výstupov nástroja na báze umelej inteligencie	22
3.1.2 Kvalita ako prioritné kritérium úspešnosti nástroja umelej inteligencie.....	23
3.1.3 Návrh všeobecného nástroja umelej inteligencie pre generovanie optimálnej robotickej WPS	26
3.1.4 Návrh implementácie adaptívnych algoritmov automatizovaného prestavenia robotizovaného zvaracieho pracoviska na báze umelej inteligencie v prototype pracoviska pre inteligentné zvaranie maloobjemovej výroby	27

4 Verifikácia prototypu robotizovaného pracoviska pre inteligentné zváranie maloobjemovej výroby.....	28
Záver.....	29
Použitá literatúra	30
Publikované práce autorky	34

Úvod

Zváranie je procesom spájania materiálov, ktorého výsledným produktom je zvar. Zváranie je považované za jeden z najkomplexnejších výrobných technologických procesov - vyžadujúci vysokú úroveň zručností a poznatkov z viacerých vedných disciplín.

Zavedením priemyselných robotov do technológie zvárania pri polohovaní zváracích mechanizmov dochádza k významnej optimalizácii výrobného procesu z dôvodu eliminácie nepresnej a na chybu náchylnej ľudskej činnosti pri polohovaní zváracej hlavice, ako aj k zvyšovaniu efektivity zváracieho procesu.

Zavedenie zváracích robotov je výborne zvládnuté vo veľkosériovej výrobe, kde je zmena výrobného programu menej častá vzhľadom k počtu vyrobených kusov.

Cieľom tejto dizertačnej práce je návrh prototypu pracoviska robotizovaného zvárania, určeného pre inteligentné zváranie maloobjemovej výroby. Jeho pridanou hodnotu je využitie práve v aplikáciách vysoko-premenlivej a maloobjemovej výroby.

Vysoko-premenlivá výroba vyžaduje pre výrobu rôznych typov výrobkov časté prestavenie výrobných zariadení, k čomu je často potrebná činnosť vysokošpecializovaných odborníkov. Vzhľadom na nedostatok takýchto personálnych kapacít v malých a stredných podnikoch je časté váhanie investorov implementovať do výrobného procesu robotizované výrobné technológie, hoci je preukázaná ich vysoká efektivita vo výrobných procesoch vrátane robotizovaného zvárania.

Významnou charakteristikou opísaného prototypu pracoviska robotizovaného zvárania je jeho schopnosť automatickej adaptácie na rôzne typy výrobkov, čo pracovisko predurčuje na použitie v robotizovanom zváraní špecifickom pre malé a stredné podniky, ktoré sa vyznačujú produkciou rôznych typov výrobkov produkovaných v malých výrobných sériách.

Tézy

1. Vytvoriť model prototypu inteligentného robotizovaného polohovacieho a zvaracieho pracoviska.
2. Navrhnuť a vyvinuť metódy digitalizácie výroby a údržby robotizovaného polohovacieho a zvaracieho pracoviska s vysokou automatizovanou premenlivosťou výrobkov.
3. Navrhnuť adaptívne algoritmy automatizovaného prestavenia robotizovaného zvaracieho pracoviska na báze umelej inteligencie.
4. Verifikovať prototyp robotizovaného pracoviska pre inteligentné zvaranie maloobjemovej výroby.

1 Model prototypu inteligentného polohovacieho a zvaracieho pracoviska

Pre malosériovú výrobu je typická vysoká variabilita požiadaviek kladených na jej výstupný produkt. Z tohto dôvodu je pre dosiahnutie potrebnej pružnosti výrobných systémov v malosériovej výrobe charakteristickej vysokou variabilitou potrebná implementácia technológií s vysokým stupňom schopnosti automaticky sa prispôbiť na variabilné požiadavky kladené na tvar, rozmery, množstvo a kvalitu výrobku. Pokiaľ ide o malých výrobcov kovových konštrukcií špecifických technológií (napríklad nukleárne technológie), najdôležitejším cieľom je bezpečnosť a s ňou úzko súvisiaca kvalita zvarových spojov. Príklady takýchto variabilných produktov ako uvádza Kovariková et al. v [20] pre tieto špeciálne technológie sú znázornené na obrázku 1.1.



Obrázok 1.1 Ukážka variability výrobkov vyrábaných v malých sériách

V prípade automatizácie zvaracej techniky vo variabilnej výrobe sa vyžaduje dosiahnutie rovnakých schopností. Pri výrobe takýchto špecifických konštrukcií sú priority:

1. kvalita zvaru (priamy vplyv na bezpečnosť konkrétnej technológie),
2. zníženie potreby vysokošpecializovaných ľudských činností,
3. cyklový čas.

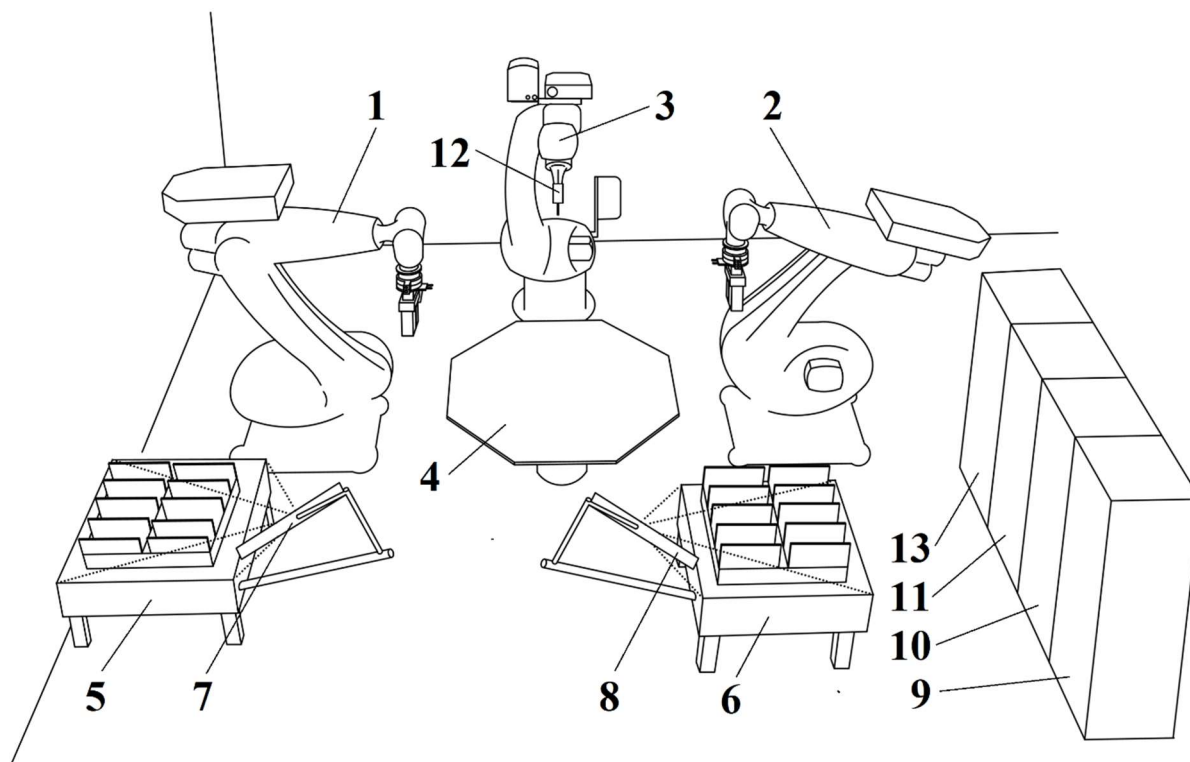
Nástroje umelej inteligencie je možné využiť na zvýšenie miery variability automatizovaného robotizovaného zvarovania a robotickej manipulácie dielov do zvaracej polohy ako aj počas zvarovania. Tak ako sa zvarač stáva schopným na základe skúseností získaných pri zvaraní, centrálny riadiaci systém automatizovaného zvaracieho pracoviska s implementovaným strojovým učením môže byť schopný samočinného nastavenia a dokonca optimalizácie procesu polohovania a zvarovania na základe digitalizovaných informácií o predchádzajúcich automatizovaných robotmi vykonávaných výrobných cykloch. Na to je potrebné digitalizovať dáta, o ktorých sa predpokladá, že budú mať vplyv na kvalitu a efektivitu robotického procesu. V prípade robotickej manipulácie a robotizovaného zvarovania je takouto informáciou napríklad priebeh zvaracieho prúdu a napätia, ako aj parametre geometrie zvarovej medzery. Dôležitým parametrom je aj charakteristika dávkovania plynu pre vytvorenie ochrannej atmosféry a priebeh dávkovania prídavného materiálu. Uvedené parametre bolo potrebné pripraviť v dostatočnom objeme do datasetov pre tréning neurónových sietí. Pri dostatočnej veľkosti datasetov o variabilných produktoch a vhodnej štruktúre neurónovej siete bude nástroj umelej inteligencie postupne schopný prispôbiť pracovisko na zvaranie úplne nového produktu.

1.1 Opis súčastí navrhnutého prototypu inteligentného polohovacieho a zvaracieho pracoviska

Kovaríková v mene kolektívu autorov v [21] uvádza, že robotický systém na adaptívne spájanie súčastí je realizovaný koordináciou spájacieho robota (3) s prvým robotickým manipulátorom (1), externým polohovadlom (4) a druhým robotickým manipulátorom (2), ktorými sú pomocou systému automatizovaného robotického odoberania polohované voľne uložené súčasti z ich prvého skladu (5) a z druhého skladu (6) do optimálnej spájacej pozície. Systém automatizovaného robotického odoberania voľne uložených súčastí riadi odoberanie na základe typu výrobku a na základe dát o polohách súčastí v skladoch získaných pomocou prvého 3D snímača (7), ktorým je snímaný priestor prvého skladu (5), a pomocou druhého 3D snímača (8), ktorým je snímaný priestor druhého skladu (6). Riadenie odoberaných súčastí realizuje centrálny riadiaci systém (13) na základe výstupov prvého odoberacieho počítača (9) a druhého odoberacieho počítača (10). Dosiahnutie optimálnej polohy spájaných súčastí zabezpečuje automatizovaný systém korekcií polôh robotov pomocou profilového snímača (12)

umiestneného na spájacom robote (3) a korekčného počítača (11) spojeného s centrálnym riadiacim systémom (13).

Model prototypu inteligentného zvaracieho a robotického pracoviska je znázornený na obr. 1.2.



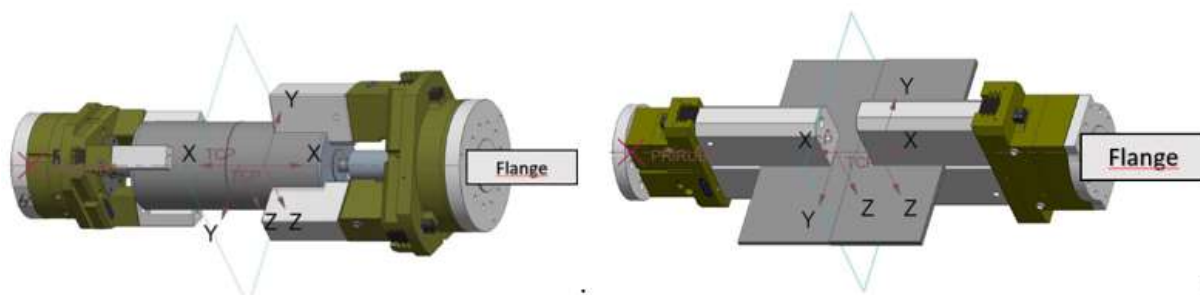
- | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 1 - prvý robotický manipulátor | 2 - druhý robotický manipulátor | 3 - spájací robot |
| 4 - externé polohovadlo | 5 - prvý sklad | 6 - druhý sklad |
| 7 - prvý 3D snímač | 8 - druhý 3D snímač | 9 - prvý odoberací PC |
| 10 - druhý odoberací PC | 11 - korekčný počítač | 12 - profilový snímač |
| | 13 - centrálny riadiaci systém | |

Obr. 1.2 Model navrhnutého prototypu inteligentného zvaracieho a robotického pracoviska

1.1.1 Automatizovaný rýchlo výmenný systém robotických chápadiel

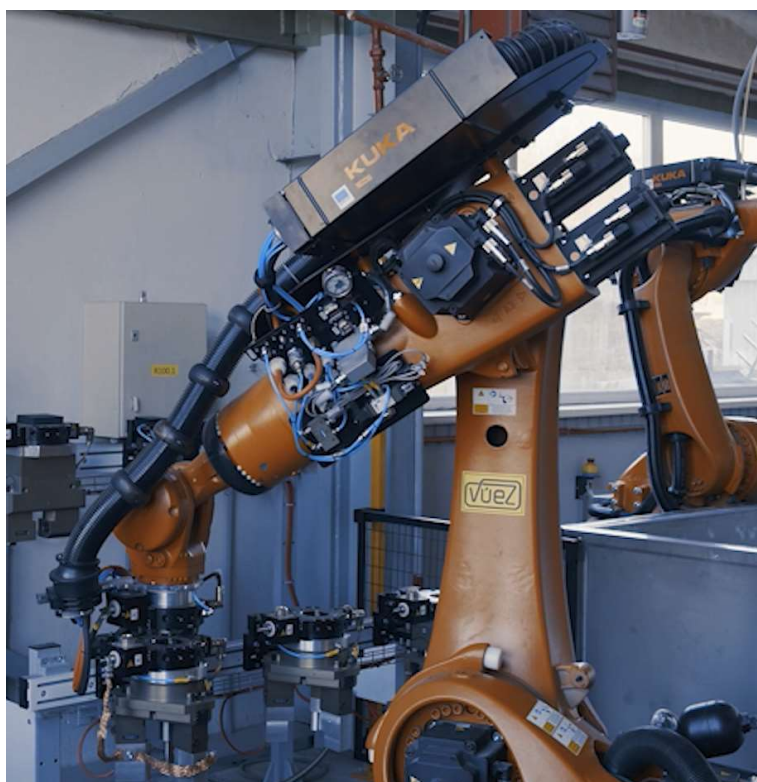
Pri robotizovanom zváraní malosériovej a vysoko variabilnej výroby je potrebné polohovať zvárané diely rôznych rozmerov a tvarov pomocou daných robotických manipulátorov. Pre robotické uchopenie, polohovanie a držanie dielov bol navrhnutý automatizovaný rýchlo-výmenný systém robotických chápadiel, ktorý umožňuje automatické prispôsobenie pracoviska

pre manipuláciu s dielcami rôznych veľkostí a tvarov, ako je znázornené na obrázku Obr.1.3.



Obr. 1.3 Držanie dielcov rôznych tvarov a veľkostí pomocou robotických chápadiel. Vľavo: držanie cylindrických objektov, Vpravo: držanie rovinných objektov

Fotografia z testovania automatického rýchlo-výmenného systému robotických chápadiel je zobrazená na obrázku Obr. 1.4.

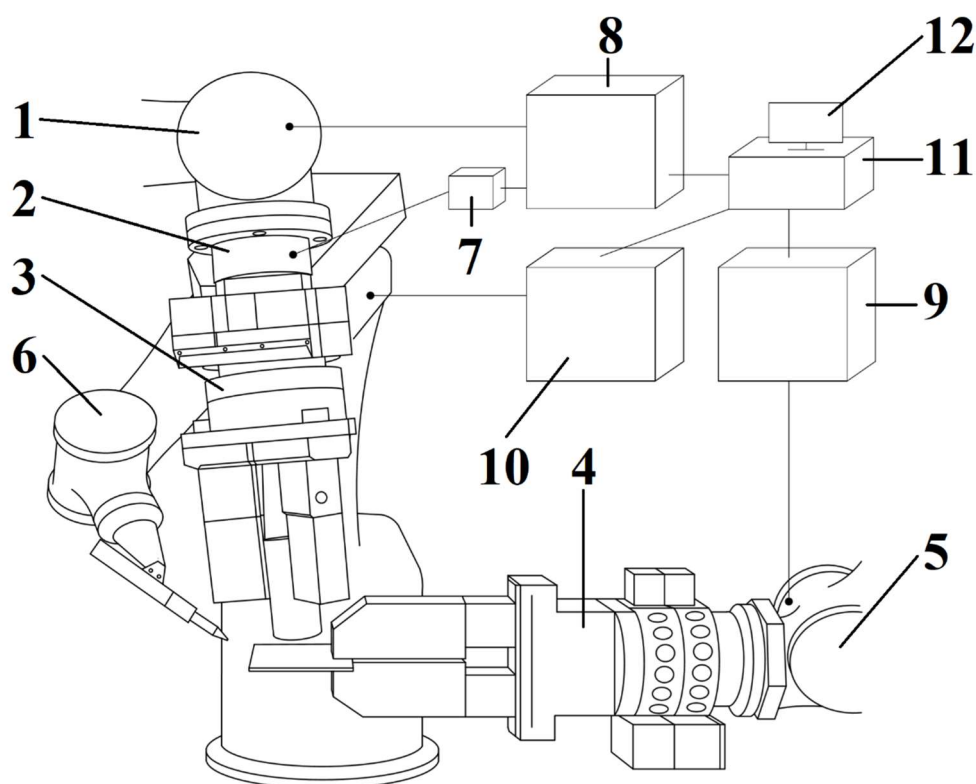


Obr. 1.4 Testovanie automatického rýchlo-výmenného systému robotických chápadiel vo fyzickom prototypu robotického pracoviska

1.1.2 Systém riadenia robotického polohovania súčastí od silovo-momentového snímača

Primárnou funkciou systému robotického polohovania zvaraných súčastí pomocou silovo-momentového snímača je umožniť robotické polohovanie zvaraných dielcov do optimálnej zvaracej pozície na základe dosiahnutia požadovaných vzájomne pôsobiacich síl a robotické držanie zvaraných dielcov s dodržaním predpísaného pôsobenia sily medzi nimi počas realizácie robotizovaného zvarania. Funkciou systému robotického polohovania zvaraných súčastí pomocou silovo-momentového snímača je aj meranie a evidencia časových priebehov síl pôsobiacich v priebehu robotickej manipulácie zvaraných dielcov, ako aj počas vykonávania robotizovaného zvaracieho procesu.

Princíp metódy robotického polohovania zvaraných dielcov na základe spätnej väzby od silovo-momentového snímača je znázornený na Obr. 1.5.



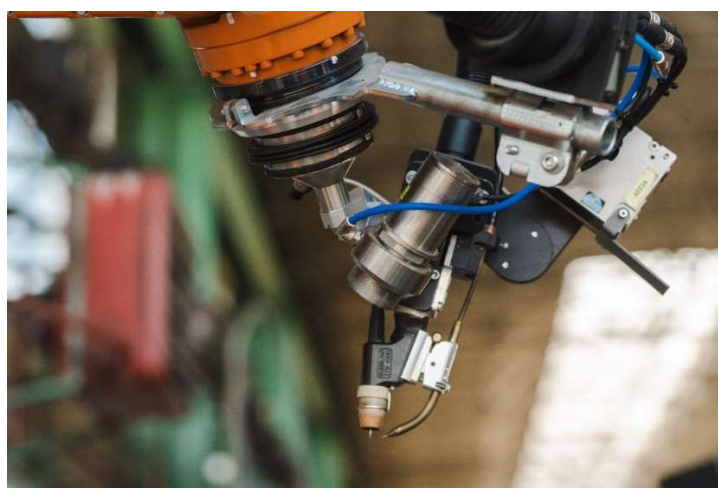
Obr. 1.5 Princíp metódy vzájomného robotického polohovania na základe spätnej väzby od silovo-momentového snímača

Kovaríková v mene kolektívu autorov v [23] uvádza, že systém robotického polohovania zvaraných súčastí pomocou silovo-momentového snímača vo svojej konštrukcii obsahuje riadiaci systém (8) robotického manipulátora polohovaného dielca, ktorý je elektricky

prepojený s prevodníkom (7) a s robotickým manipulátorom (1) polohovaného dielca, na konci ktorého je upevnený s prevodníkom (7) prepojený silovo-momentový snímač (2), za ktorým je nainštalované chápadlo (3) robotického manipulátora polohovaného dielca, a tiež obsahuje riadiaci systém (9) robotického manipulátora držaného dielca elektricky spojený s robotickým manipulátorom (5) držaného dielca s inštalovaným chápadlom (4) robotického manipulátora držaného dielca a tiež obsahuje monitor (12) pripojený k centrálnemu riadiacemu počítaču (11), ktorý je dátovo prepojený s riadiacim systémom (8) robotického manipulátora polohovaného dielca a s riadiacim systémom (9) robotického manipulátora držaného dielca, ako aj s riadiacim systémom (10) zváracieho robota elektricky prepojeným so zváracím robotom (6).

1.1.3 Systém robotizovaného zvarania typu TIG

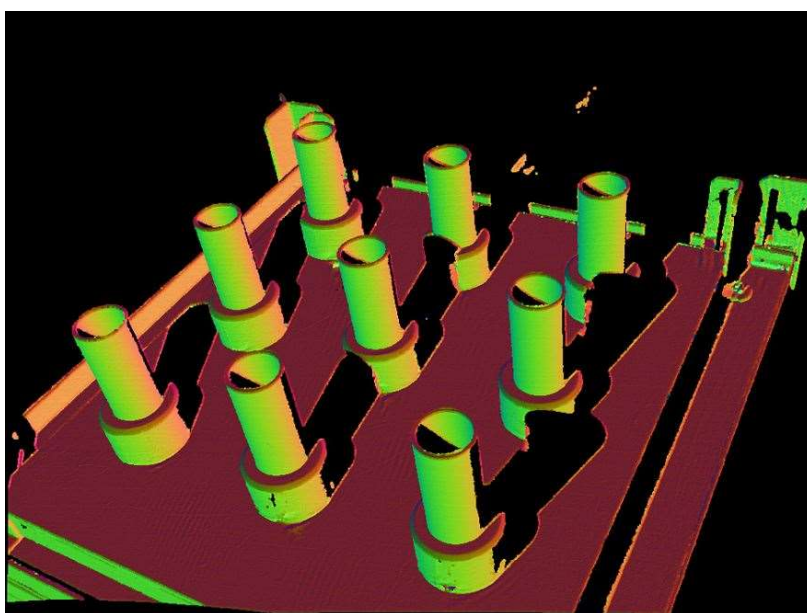
Robotický systém pre vykonávanie robotizovaného zvarania v navrhnutom prototypu inteligentného polohovacieho a zváracieho pracoviska pozostáva z priemyselného robotického manipulátora KUKA KR30-3 a zváracieho zariadenia pre zvaranie TIG metódou FRONIUS MW5000 JOB, ktoré sú vzájomne komunikačne prepojené prostredníctvom centrálného riadiaceho systému SIMATIC S7-1500. Detail robotickej zvárackej hubice z prototypu pracoviska je znázornený na Obr. 1.6. Na obrázku je vidieť prírubu robota s efektorom, ktorý obsahuje zváraciu hubicu, hrot wolfrámovej elektródy, podávač prídavného materiálu, infračervený teplomer a 2D laserový skener.



Obr. 1.6 Detail efektora zváracieho robota

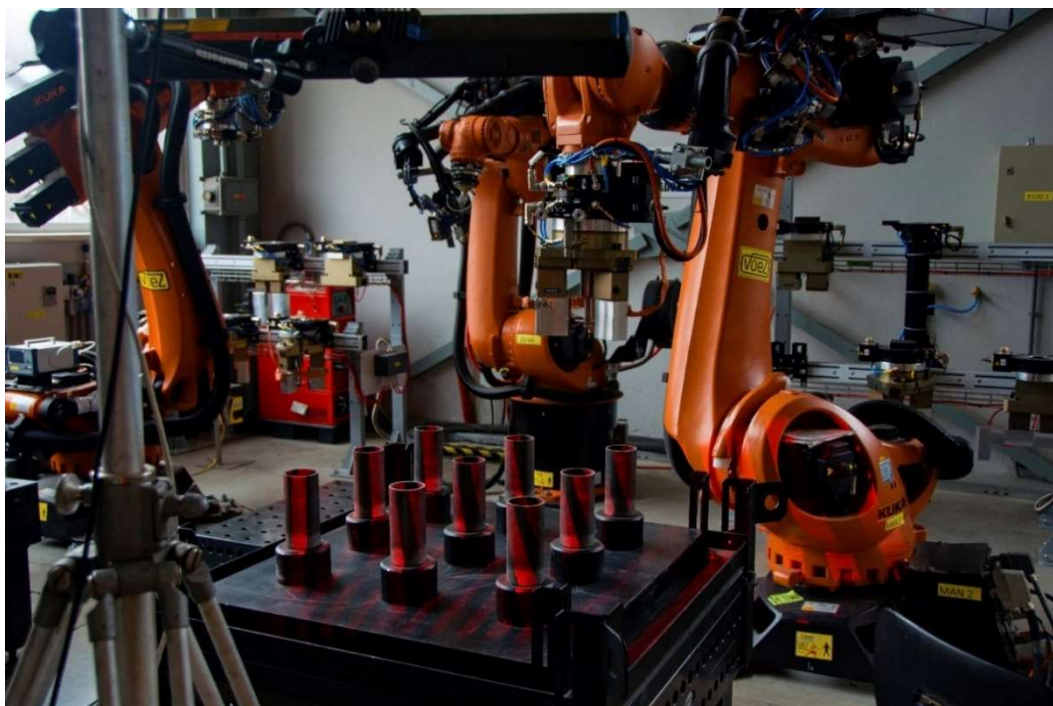
1.1.4 Systém automatizovaného robotického odoberania voľne uložených súčastí z ich skladov pomocou 3D laserových snímačov

Automatizované robotické odoberanie zvaraných dielcov je možné s využitím dvoch 3D laserových skenerov inštalovaných nad skladmi zvaraných dielcov. 3D laserové skenery sú dátovo prepojené s počítačmi vision systému, ktorý generuje požadované trajektórie pre oba robotické manipulátory vo fáze odoberania dielcov polohovaných zo skladov do zvaracej pozície. Počítače vision systému sú dva. Na obrázku 1.7. je znázornený point cloud získaný meraním pomocou vision systému PhoXi 3D scannerom.



Obr. 1.7 Mračno údajov z 3D laserového skenera nad sklami obrobkov cylindrického tvaru

Polohovanie robotických manipulátorov je koordinované centrálnym riadiacim systémom robotického pracoviska pre inteligentné zvaranie malovýroby, ktorý vo fáze automatického odobratia dielca prenáša riadenie na počítačový vision systém a synchronizuje vykonávanie nasledujúcich operácií s ohľadom na aktuálny stav pracoviska. Automatické robotické odoberanie dielov, ako uvádza Kovariková et al. v [25], testované priamo v robotickom pracovisku je znázornené na obrázku 1.8.

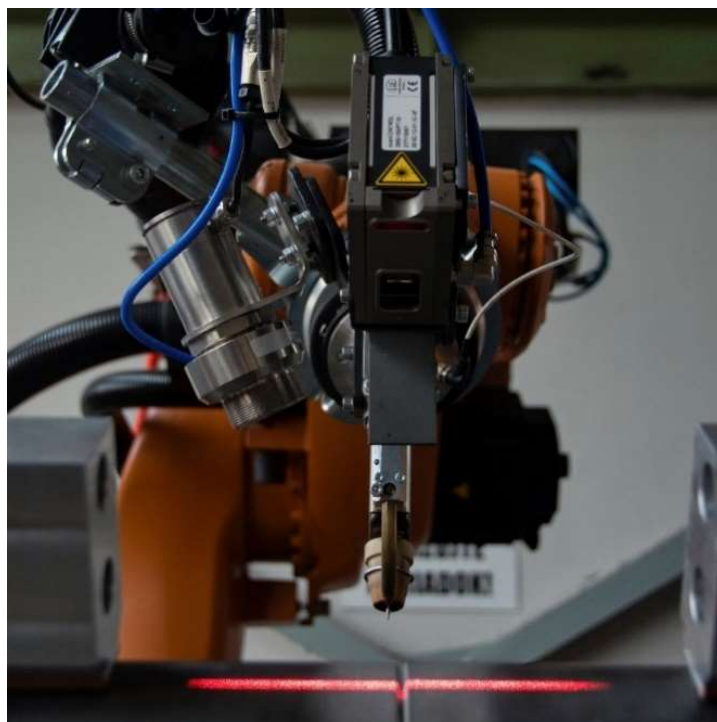


Obr. 1.8 Automatizované robotické odoberanie dielcov zo skladov výrobkov

1.1.5 Systém automatickej korekcie zvarovej medzery a generovania parametrov zvaracej trajektórie s využitím 2D laserového skenera

K meraniu nepresností zvarových medzier je využívaný 2D laserový skener, ktorý je umiestnený na zvaracom robote, ako je znázornené na obrázku 1.9. Skener má procesor, ktorý realizuje potrebné výpočty súvisiace s trianguláciou, čo znamená, že používateľ pracuje priamo so súradnicami meraných bodov. V rámci merania a detekcie zvarovej medzery bol navrhnutý algoritmus pre detekciu zvarovej medzery.

Zvarová medzera zistená na základe 2D laserových údajov poskytuje dostatok údajov na čiastočnú korekciu vzájomnej polohy zvarovaných dielov. Cieľom korekcií je dosiahnuť čo najväčšiu koaxiálnosť zvarovaných dielov a ideálnu zvarovú medzeru. Zvárané diely môžu byť v nesprávnej vzájomnej polohe kvôli chybám predkorekcie. To znamená, že prostredníctvom údajov z 2D laserového skenera je možné byť čo najbližšie k ideálnej polohe.



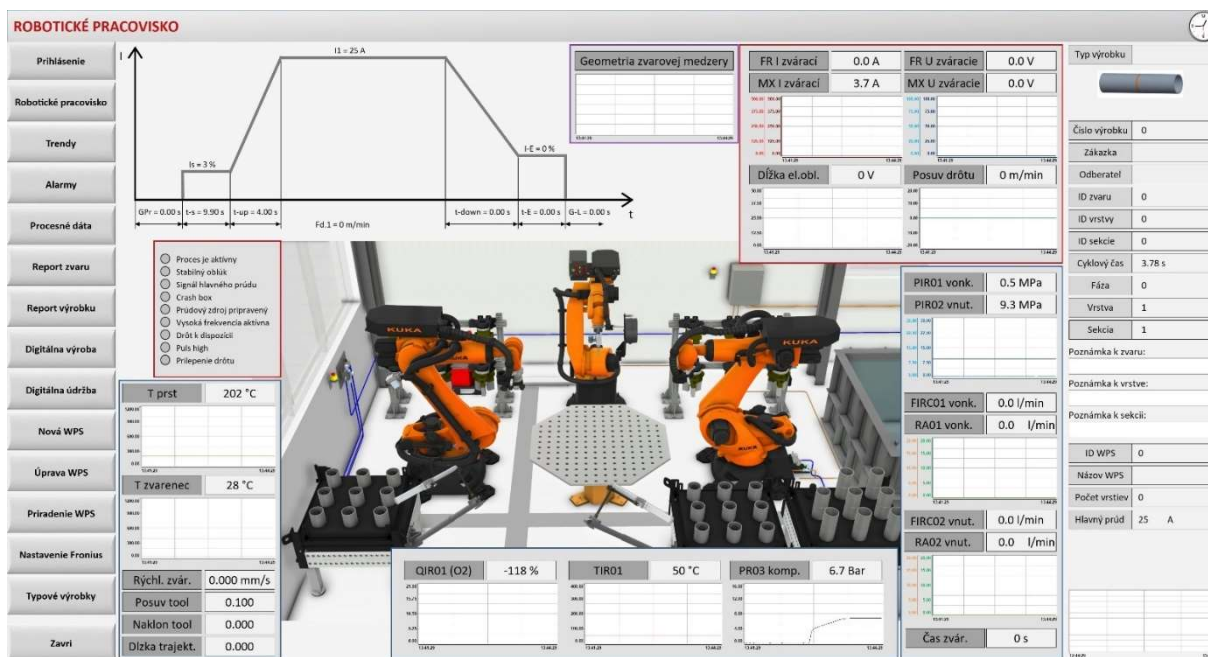
Obr. 1.9 Robotické meranie zvarovej medzery

1.1.6 Centrálny riadiaci systém, technologický počítačový systém a HMI systém

Koordináciu všetkých procesov potrebných pre realizáciu robotickej manipulácie a robotického zvarovania v navrhnutom prototype pracoviska realizuje riadiaci systém Simatic S7-1500 s potrebnými vstupno-výstupnými perifériami. Hlavnou funkciou centrálného riadiaceho systému je zabezpečiť vykonávanie navrhnutého algoritmu automatizovanej výroby.

Súčasťou navrhnutého prototypu polohovacieho a zvaracieho pracoviska je technologický počítačový systém, s pomocou ktorého je zabezpečená digitalizácia údajov a realizovaný aj automatický výpočet potrebných parametrov.

Súčasťou kyber-fyzikálneho nástroja robotickej manipulácie a robotizovaného zvarovania je aj HMI systém, ktorého hlavným účelom je v prehľadnej forme poskytnúť užívateľovi údaje, ktoré charakterizuje pracovisko v reálnom, ako aj z minulosti vybranom čase prostredníctvom aktuálnych i historických hodnôt stavových a procesných veličín. Z archivovaných údajov je možné rekonštruovať procesy, ktoré na pracovisku aktuálne bežia alebo v minulosti prebehli. Obrazovka pohľadu na digitálne dvojča robotickej manipulačnej a zvaracej technológie, určená pre prehliadanie procesu v reálnom čase, je zobrazené na Obr. 1.10.



Obr. 1.10. Pohľad na obrazovku digitálneho dvojčata technológie

1.1.7 Databáza údajov a webový portál

Archivácia digitalizovaných údajov v prototype polohovacieho a zväracieho pracoviska je navrhnutá s využitím databázy údajov. Databáza údajov DIROZ obsahuje údaje charakterizujúce uskutočnené zväracie procesy, požadované parametre zvarovania definované v robotických WPS ako aj evidenciu vyrobených výrobkov s väzbou na súvisiace požadované i procesné veličiny. Navrhnutým nástrojom pre zadávanie a poskytovanie informácií o prototype polohovacieho a zväracieho pracoviska je webový portál. Prostredníctvom webového portálu je možné definovať požadované parametre výroby ako napríklad voliť typ výrobku alebo nastaviť spôsob vykonania zvaru. Zároveň webový portál poskytuje prehľad o efektívnosti výroby a údržby na pracovisku ako aj detailné informácie o zväracom procese.

Riešenie tézy 1 obsahuje detailný opis modelu inteligentného polohovacieho a zväracieho pracoviska. Návrhu predchádza ukážka rôznych typov výrobkov, ktorých robotické zváranie kladie na robotický systém požiadavku vysokého stupňa automatického prispôsobenia sa na zváranie variabilných objektov. Uvedená je aj analýza rôznych metód manipulácie dielcov a ich zvarovania vrátane ich porovnania. Požiadavku automatického prestavenia pracoviska umožňujú splniť inteligentné súčasti robotickej zvärackej aplikácie, ktoré sú súčasťou návrhu modelu robotického pracoviska pre inteligentné zváranie maloobjemovej výroby.

2 Návrh a vývoj metód digitalizácie výroby a údržby robotizovaného polohovacieho a zváracieho pracoviska s vysokou automatizovanou premenlivosťou výrobkov

K efektívnej digitalizácii pracoviska robotickej manipulácie a robotizovaného zvárania bolo potrebné definovať súbor veličín, ktoré je potrebné digitalizovať pre optimalizáciu výrobného procesu. Tak robotická manipulácia s automatickým odoberaním dielcov na základe spätnej väzby od 3D laserových skenerov a ich robotické polohovanie do zváracieho pozície ako aj samotné robotizované zváranie sú z hľadiska počtu premenných pomerne komplikované priemyselné procesy. V konečnom návrhu prototypu polohovacieho a zváracieho pracoviska boli vybrané nasledovné súbory digitálne spracovávaných údajov:

1. 3D modely zváraných výrobkov realizované CAD nástrojmi (CREO, AUTOCAD)
2. Súbory robotických simulácií vytváraných v nástroji KUKA.SimPro
3. Súbory KRL pre riadenie trajektórií robotov.
4. Súbor procesných hodnôt robotizovaného zváracieho procesu
5. Súbor údajov z 3D laserových skenerov, ktoré snímajú stav skladov dielcov.
6. Digitálne údaje z FT senzora pre polohovanie zváraných obrobkov.
7. Konfigurácie robotických manipulátorov.
8. Aktuálne procesné hodnoty robotizovaného zváracieho procesu.
9. Súbor údajov snímaných 2D skenerom – meranie zvarovej medzery a kvality zvaru.
10. Súbory digitálnych údajov zváracieho napätia a prúdu z meracej ústredne.
11. Súbory z termovízných meraní.
12. Súbory termodynamických simulácií v prostredí Ansys.
13. Súbory údajov o kvalite zvarov.
14. Digitalizácia údajov o údržbe robotického zváracieho pracoviska.
15. Databáza MS SQL.
16. Súbory dát v HMI systéme.
17. Webový portál ako sprostredkovateľ digitálnych údajov.

Požiadavky na typ zváraného výrobku a detail konštrukcie dielcov definuje človek – konštruktér vo formáte súborov kompatibilných s vybraným CAD nástrojom. Vzniknuté CAD súbory sú umiestnené na FTP serveri IZVAR, ktorý je prepojený aj s 2D laserovým systémom merania zvarovej medzery a so systémom kontroly kvality. Tvorba robotických simulácií,

zadávanie robotických WPS zvaracím technologom a plán výroby sú vkladané do digitálneho dvojčaťa robotického pracoviska pre inteligentné zvaranie maloobjemovej výroby prostredníctvom webovej aplikácie. Webový server poskytuje aj stránky pre prehliadanie procesných, konštrukčných, technologických, kvalitatívnych a výkonnostných ukazovateľov.

Dáta sú v binárnom, textovom a číselnom formáte spracovávané a archivované v prostredí MS SQL servera, ktorý je prepojený aj s HMI systémom. HMI systém poskytuje monitoring výrobného procesu a stavu technológie a prehľad o požadovaných technologických parametroch, ktoré umožňuje aj zadávať. HMI systém komunikuje s centrálnym riadiacim systémom pracoviska realizovaným prostredníctvom PLC S7-1500, ktorý je dátovo prepojený s 2 robotickými manipulátormi, robotickou zvaračkou, zvaracím robotom, 2D laserovým skenerom, vision systémom a operátorskými panelmi. Na analógovej úrovni je centrálny riadiaci systém prepojený so súborom meraní procesných a stavových veličín

V rámci riešenia tézy 2 sú identifikované rôzne typy informácií o výrobe a údržbe manipulačného a zvaracieho robotického pracoviska. Okrem identifikácie dát sú navrhnuté aj metódy digitalizácie, ktoré boli vyvinuté a implementované do prototypu robotického pracoviska pre inteligentné zvaranie maloobjemovej výroby tak, aby bol dosiahnutý vysoký stupeň automatizovaného prestavovania pracoviska na variabilné výrobné požiadavky. V téze 2 je riešený aj návrh dátového toku digitalizovaných údajov a algoritmus automatizovaného vkladania real-time procesných veličín do dátového skladu, ktorý je potrebný pre vznik trénovacej a testovacej množiny údajov využívanej k natrénovaniu nástroja umelej inteligencie.

3 Návrh adaptívnych algoritmov automatizovaného prestavenia robotizovaného zvaracieho pracoviska na báze umelej inteligencie

Pre dosiahnutie automatickej adaptácie robotizovaného zvaracieho pracoviska na výrobu rôznych typov výrobkov je potrebné, aby pracovisko bolo schopné autonómne nastaviť požadované parametre technologického procesu robotizovaného zvarania bez zásahu operátora a to aj v prípade, ak vznikne požiadavka na robotizované zvaranie dielcov, ktoré sú pre toto pracovisko nové. Ide o také dielce, ktoré neobsahuje databáza už zrealizovaných robotizovaných zvarov. Požadované technologické parametre robotizovaného zvarania nie sú pracovisku dostupné implicitne v databáze zvarov. V takomto prípade pracovisko musí samé určiť požadované parametre zvarania, pričom je potrebné, aby bola dosiahnutá požadovaná kvalita nového výrobku. Pre automatickú adaptáciu robotizovaného zvaracieho pracoviska na výrobu rôznych typov výrobkov je možné využiť nástroje na báze umelej inteligencie.

K tvorbe nástroja na báze umelej inteligencie je možné využiť metódu zostavenia modelu neurónovej siete. V rámci prípravy údajov pre návrh nástroja na báze umelej inteligencie v tejto dizertačnej práci bol vytvorený informačný systém pre digitalizáciu zvarania, ktorý je zároveň sprostredkovateľom procesných veličín z procesu robotizovaného zvarania do databázy realizovanej štruktúrou v MS SQL serveri. Pre komfortné dolovanie dát z databázy DIROZ sú k dispozícii pohľady na vybrané dáta, ktoré vstupujú do procesu trénovania, testovania a validácie neurónovej siete. Ladenie modelu prebieha iteratívne.

Požadovaným výstupom nástroja na báze umelej inteligencie implementovaného v inteligentnom pracovisku robotickej manipulácie a robotizovaného zvarania je generovanie sady optimálnych parametrov potrebných k autonómnemu nastaveniu všetkých súčastí výrobnjej technológie, prostredníctvom ktorej je automaticky vyrobené potrebné množstvo produktov požadovanej kvality. V prípade, že automatické prestavenie zabezpečí výrobu variabilných výrobkov v požadovanej kvalite alebo kvalitnejších, možno hovoriť, že očakávaný výstup je užitočný. Príklad predpisu technologických parametrov robotickej manipulácie a robotizovaného zvarania je zobrazený vo formuláre robotickej WPS na Obr. 3.1.

Špecifikácia postupu zvarovania (WPS)

WPS_DIROZ_56_2022

Návrh zvarového spoja	Prevedenie zvarového spoja	Poznámka

Spôsob zvarovania:

Zvárací robot / Zváracie zariadenie	Metóda zvarovania EN ISO 4063		Hrúbka materiálu [mm]		Typ spoja
FRONIUS MagicWave 5000 JOB G/F	141		3.20		BW
Poloha zvarovania EN ISO 6947	Údaje o zvare	Materiál podloženia	Polarita	Sklon horáka [°]	Počet vrstiev
PA	3.2V	gb	DC-	0.00	1

Základný materiál:

Kvalita materiálu (označenie podľa EN 10027-1)		Materiálová skupina (podľa TNI CEN ISO/TR 15608)	Rozmery		Spôsob prípravy zvarových hrán:
			Hrúbka [mm]	Priemer [mm]	
1.	S235	1.1	3.20	70.00	úkos 60° , pero 1mm
2.	S235	1.1	3.20	70.00	

Prídavný materiál:

Označenie prídavného materiálu (podľa EN ISO 14341 - A)		Priemer drôtu [mm]	Ochranný plyn (podľa EN ISO 14175)		
podľa EN ISO 14341-A	G 35 2 C1 2Si/ G 38 3 M21 2Si		Druh ochrany	Značka	Označenie výrobcu
podľa výrobcu	OK-AUTROD 12.58	1.00	Priama	I1	ARGÓN 4.6
			Koreňová	I1	ARGÓN 4.6

Iné údaje:

Typ elektródy	Priemer elektródy[mm]	Uhol ihly [°]	Typ hubice	Priemer hubice [mm]
WL15	2.40	40	keramická 12/23x31	12.00

Predohrev, dohrev, tepelné spracovanie:

Teplota predohrevu [°C]	Medzihúsenková teplota [°C]	Teplota dohrevu [min]	Tepelné spracovanie
0.00	0.00	0.00	

Definícia húseníc a úsekov:

Vrstva	Sekcia	I_A [A]	U [V]	Rýchlosť zvarovania [mm/s]		Gpr [s]	I_s [%]	t_s [s]	t_up [s]
1	1	170.00	12.00	1.80		2.00	30.00	0.30	0.30
G_H [°]	Spt [s]	I_E [%]	t_E [s]	t_down [s]	G_L [s]	Balance [°]	HFt [s]	I_G [%]	F_P [Hz]
0.00	0.00	25.00	3.00	0.00	5.00	0.00	0.21	30.00	2.00
F_P01 [Hz]	dcY [%]	Fd_1 [m/min]	Fd_2 [%]	tAC [s]	dt1 [s]	dt2 [s]	Typ zvaru	Opis	
0.30	60.00	2.20	20.00	0.00	0.00	0.00	0		
Zváracia pozícia		Fdb [mm]	Vzd. ihly [mm]	Náklon ihly B [°]	Náklon ihly A [°]	Čas t1 [s]	Presah zvaru [°]	Zvarová medzera [mm]	
PA		15.00	3.00	0.00	5.00	0.50	15.00	1.00	
Priama ochrana prietok [l/min]		Koreňová ochrana prietok [l/min]			Aktuálna zváracia trajektória				
7.00		5.00			0.000				

Vrstva	Sekcia	I_A [A]	Fd_1 [m/min]	Aktuálna zváracia trajektória
1	2	170.00	2.20	350.000

Vrstva	Sekcia	I_A [A]	Fd_1 [m/min]	Aktuálna zváracia trajektória
1	3	150.00	0.00	365.000

Obr. 3.1 Špecifikácia postupu robotizovaného zvarovania č. 56_2022

3.1.1 Výber podstatných vstupov pre získanie užitočných výstupov nástroja na báze umelej inteligencie

Informácie z konštrukčnej dokumentácie zadávané priamo konštruktérom a technológom robotizovaného zvarovania bez potreby zásahu výrobného operátora – veľkosť a tvar výrobku, typ materiálu, geometria zvarovej medzery, hrúbka zvaraných objektov, požadovaný stupeň kvality zvaru sú zadávané prostredníctvom webového klienta prostredníctvom formulára zobrazeného na obrázku 3.2. Tieto údaje obsahujú definíciu požiadaviek na typ, množstvo a kvalitu zváraného produktu.

VŮEZ		Produkt Zvarenc TRKR70+TRKR70		Číslo produktu: 3-OTS-7682	
Informácie o produkte					
Poč.k.	Názov - Rozmer	Polotovár	Mat.konečný	Mat.východz	
200	TRKR 70x3,2 - 150	STN EN 10210-1 STN EN 10210-2	S275JOH		
T.O.	Čís. hmot.	Hr. hmot.	Číslo výkresu	Poz.	
	0.8			2	
Poč.k.	Názov - Rozmer	Polotovár	Mat.konečný	Mat.východz	
200	TRKR 70x3,2 - 150	STN EN 10210-1 STN EN 10210-2	S275JOH		
T.O.	Čís. hmot.	Hr. hmot.	Číslo výkresu	Poz.	
	0.8			1	

POZNÁMKY:

- MATERIÁL DODAT S MATERIÁLOVÝM ATESTOM 3.1 v ZMYSLE EN 10204
- NETOLEROVANÉ ROZMERY PODĽA STN EN 22768-1:1997-m, STN EN ISO 22081
- ZVÁRAŤ TECHNOLOGIOU 141 (TIG) v OCHRANNEJ ATMOSFERE INERTNEHO PLYNU
- PRÍPRAVA ZÁVROVÝCH PLÔCH v ZMYSLE STN EN ISO 9852-1

200	TRKR 70x3,2 - 150	STN EN 10210-1 STN EN 10210-2	S275JOH	0.8		2
200	TRKR 70x3,2 - 150	STN EN 10210-1 STN EN 10210-2	S275JOH	0.8		1

Názov projektu	Digitálna výrobná príprava (DVP)	Príprava	VŮEZ a.s. - Liptov	Partner	FID STU Bratislava
Meno	Výrobné Ing. Mladá	Ing. Štefka M.			
Technická	Ing. Chmelová				
Normatív	Ing. Chmelová				
Číslo	Ing. Kozáček				
Úroveň	Ing. Kozáček				
Číslo	03/2022				

Názov	ROBOTICKÝ V-ZVAR	3-OTS-7682
VŮEZ a.s.	TRKR70x3,2 + TRKR70x3,2	

Obr. 3.2 Formulár webového klienta pre zadávanie vstupných údajov typových výrobkov

Zadávaním údajov do formulára webového klienta dochádza k digitalizácii týchto údajov, ktoré sú následne použiteľné ako vstupné dáta pre nástroj umelej inteligencie. Prehľad a vysvetlenie významu a formátu vstupných údajov je zobrazený v Tabuľke 3.1.

P.č.	Názov parametra	Opis, príklad	Dátový typ
1	Názov	Identifikátor typu výrobku, TRKR70+TRKR70	Varchar
2	Hrúbka	Hrúbka zváraného materiálu, 3,2 mm	Decimal
3	Materiál	Označenie materiálu, S275JOH	Varchar
4	Kvalita materiálu	Označenie podľa EN 10027-1, S235	Varchar
5	Materiálová skupina	Označenie podľa TNI CEN ISO/TR15608, 1.1	Varchar
6	Dĺžka zvaru	Celková dĺžka zvaru v mm, 0,22	Decimal
7	Typ zvaru	Typ zvaru, TW, BW,...	Varchar
8	Úkos	Úkos zvarovej medzery v°, 60°	Decimal
9	Pero	Pero zvarovej medzery v mm, 1 mm	Decimal

Tabuľka 3.1 Význam a formát vstupných údajov pre AI nástroj

3.1.2 Kvalita ako prioritné kritérium úspešnosti nástroja umelej inteligencie

Nakoľko robotické pracovisko pre inteligentné zváranie maloobjemovej výroby je vyvíjané pre účel zvárania častí nukleárných technológií, je vysoký stupeň kvality zvarov významne vyššou prioritou ako napríklad nízky cyklový čas alebo nízka spotreba energie a materiálu. Z tohto dôvodu bola kvalita zvarov testovaná nedeštruktívnymi aj deštruktívnymi metódami ako je opísané v nasledovných kapitolách. V rámci tejto dizertačnej práce sú hodnoty parametrov kvality využité aj k natrénovaniu neurónovej siete pre optimalizáciu roboticky zváraných spojov. Vizualne testovanie pre hodnotenie kvality zvarov bolo v etape návrhu a verifikácie prototypu realizované človekom – kontrolórom kvality. K digitalizácii vyhodnotenia kontroly kvality vizuálnou metódou bol využitý webový nástroj, ukážka ktorého je znázornená na obrázku 3.3.

		PROTOKOL pre vizuálnu kontrolu zvarov				Číslo protokolu: DIROZ-VT-2023/94							
Informácie o skúšanom objekte													
Názov:	Vzorka č.94			Hodnotenie podľa:	STN EN ISO 5817								
Materiál:	S235JRH+N			Druh skúšky:	Priama	Rozsah [%]:	100						
Rozmery/typ zvaru:	TRKR 70x3,2-150			Typ zvaru:	BW								
Stav povrchu:	Očistený			Spôsob zvárania:	141								
Informácie o podmienkach kontroly													
Zdroj svetla:	Ručné svetlo			Osvetlenie [lx]:	580								
Luxmeter (typ):	Kimo Lx50	Výr. č.:	1P210189439	Platnosť kalibrácie:	29.4.2023								
Informácie o použitých meradlách a pomôckach													
Mierky (typ):	Meradlo na zvary - lastovička	Výr. č.:	V/350	Platnosť kalibrácie:	8.12.2023								
Meradlá (typ):	Posuvné meradlo	Výr. č.:	V/415 (2111706)	Platnosť kalibrácie:	7.6.2023								
Pomôcky:	Stáčací (zvinovací) 5-meter WURTH V/412												
Zoznam zistených chýb:													
P. č.	Č. zvaru, vrstvy:	Označenie a kód chyby:	Poloha chyby:	Veľkosť chyby:	Hodnotenie:								
1.	94. 1.	2025- (Koncový) Kráterový lunker	0	1	VYHOVUJE C								
2.	94. 1.	500- Chybny tvar vonkajšieho povrchu	200		VYHOVUJE B								
<table border="1"> <tr> <th>Fotka zvaru 1</th> <th>Fotka zvaru 2</th> <th>Fotka zvaru 3</th> </tr> <tr> <td>  </td> <td>  </td> <td></td> </tr> </table>								Fotka zvaru 1	Fotka zvaru 2	Fotka zvaru 3			
Fotka zvaru 1	Fotka zvaru 2	Fotka zvaru 3											
													

Obr. 3.3 Webový formulár výsledkov vyhodnotenia kvality zvaru

3.1.2.1 Kategorizácia stupňa kvality

Určenie kategórie kvality pre posudzovaný zvar je vykonané na základe zistených chýb. Podľa typu chyby a parametrov jej geometrie je zvar zaradený do príslušnej kategórie. Medzné hodnoty jednotlivých väd zvarových spojov pre dané úrovne kvality sú uvedené v norme STN EN ISO 5817:2014. Zistené chyby zadáva kontrolór kvality prostredníctvom webového nástroja do MS SQL databázy DIROZ, pričom výber údajov je možný v súlade s uvedenou normou. Pri vkladaní údajov je k dispozícii listbox, ktorý ponúka zoznam možných chýb zobrazený na Obr. 3.4, z ktorého kontrolór kvality vyberie príslušný typ chyby.

Operačný program: Integrovaná infraštruktúra		Bez chyby		TU, Bratislava	
Prijímateľ: VÚEZ, a.s.		100- Trhlina			
Názov projektu: Digitalizácia robotizovaného pracoviska		401/4011- Studený spoj (neúplné pretavenie)		Číslo protokolu: DIROZ-VT-2023/148	
		515- Chudobný koreň			
		4021- Neprevarený koreň			
Názov:	Vzorka č.148	402- Nedostatočný prievar/neprieva		EN ISO 5817	
Materiál:	S235JRH+N	5011- Súvislý zápal		▼ Rozsah [%]: 100	
Rozmery/typ zvaru:	TRKR 70x3,2-150	5012- Nesúvislý zápal		▼	
Stav povrchu:	Očistený	502 Tupý zvar- Prevýšený zvar			
		503 Kútový zvar- Prevýšený zvar			
Zdroj svetla:	Ručné svetlo	504- Pretečený koreň		kalibrácie: 29.4.2023	
Luxmeter (typ):	Kimo Lx50	512- Neúmerná asymetria kútového zvaru			
Informácie		5071 Plechy- Linárna nesúosovosť		nosť kalibrácie: 8.12.2023	
Mierky (typ):	Meradlo na zvary - lastovička	5072 Valcovité a duté profily- Linárna nesúosovosť		nosť kalibrácie: 7.6.2023	
Meradlá (typ):	Posuvné meradlo	2011÷2016- Porozita			
Pomôcky:	Stáčací (zvinovací) 5-meter WUF	2025- (Koncový)Kráterový lunke			
P. č.	Č. zvaru, vrstvy:	Označenie a	veľkosť chyby:	Hodnotenie:	
1.	148. 1 ▼	▼		VYHOVUJE B ▼	

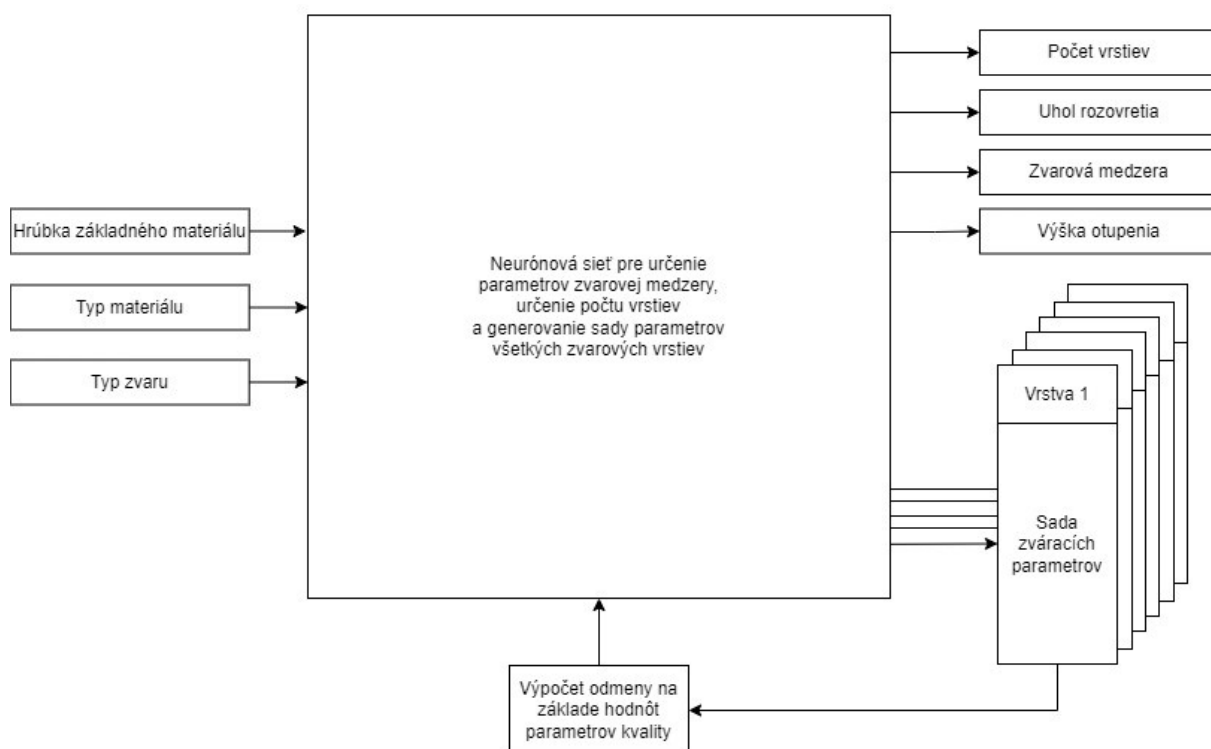
Obr. 3.4 Zoznam možných chýb zvaru

Po výbere typu chyby a zaevidovaní polohy a veľkosti chyby, zadáva v poslednom stĺpci hodnotenie a tým priradí zvaru do danej kategórie kvality. Kategórie sú:

- VYHOVUJE B (najlepší)
- VYHOVUJE C
- VYHOVUJE D
- NEVYHOVUJE (najhorší)

3.1.3 Návrh všeobecného nástroja umelej inteligencie pre generovanie optimálnej robotickej WPS

Štruktúra všeobecného nástroja umelej inteligencie pre generovanie optimálnej robotickej WPS je zobrazená na Obr. 3.5. Do štruktúry vstupujú parametre definujúce typ materiálu, z ktorého bude zvarenec vyrobený, typ zvaru a hrúbka základného materiálu. Z všeobecného nástroja umelej inteligencie, ktorého úlohou je plne zastúpiť ľudského technológa robotizovaného zvárania, vystupujú parametre počtu potrebných zvarových vrstiev, parametre určujúce zvarovú medzeru, ktorá je dosiahnutá robotickými manipulátormi polohujúcimi a počas zvárania držiakmi zvárané súčasti a sady zváracích parametrov jednotlivých zvarových vrstiev. Pre natrénovanie tejto neurónovej siete je potrebný veľký počet rôznorodých zvarencov, preto k natrénovaniu tejto komplexnej štruktúry bude možné pristúpiť až po vzniku dostatočných datasetov získaných digitalizáciou žiadaných a procesných parametrov získaných z prototypu robotického pracoviska pre inteligentné zváranie maloobjemovej výroby.



Obr. 3.5 Návrh štruktúry všeobecného nástroja umelej inteligencie pre generovanie optimálnej robotickej WPS vrátane určenia parametrov zvarovej medzery

3.1.4 Návrh implementácie adaptívnych algoritmov automatizovaného prestavenia robotizovaného zvaracieho pracoviska na báze umelej inteligencie v prototype pracoviska pre inteligentné zváranie maloobjemovej výroby

Implementácia adaptívnych algoritmov automatizovaného prestavenia robotizovaného zvaracieho pracoviska na báze umelej inteligencie pozostáva z nasledovných etáp:

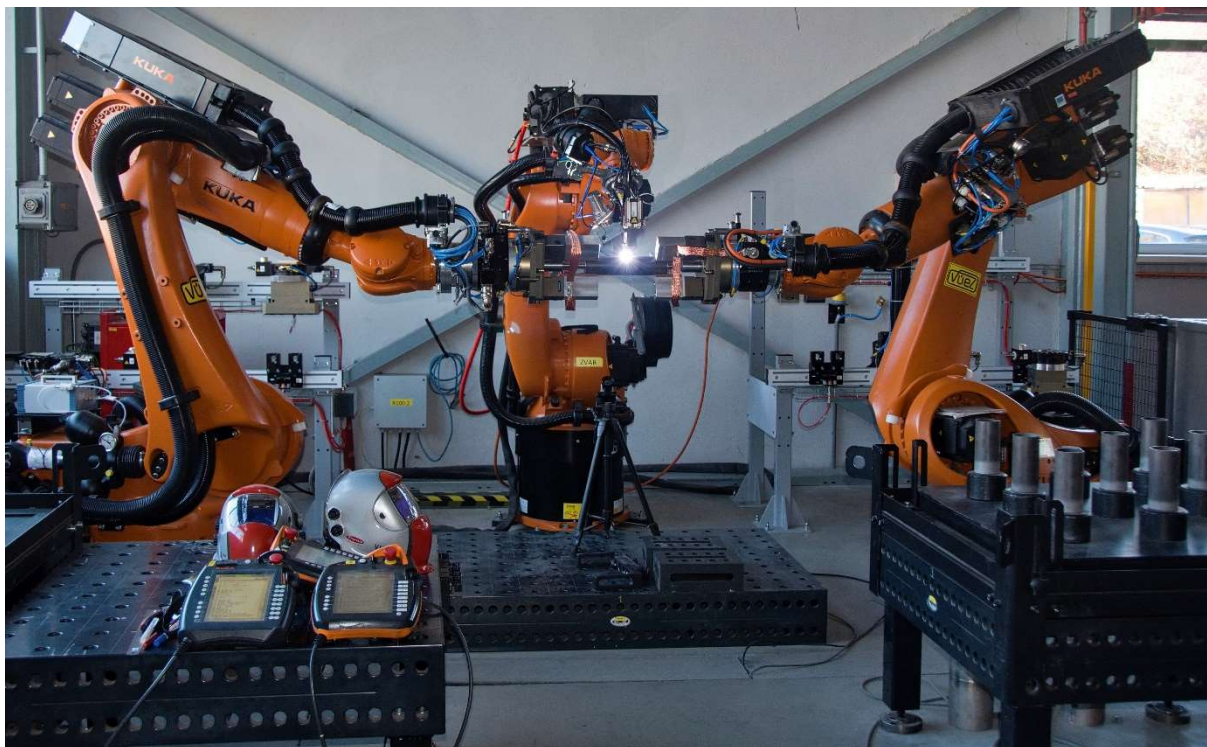
1. Implementácia nástrojov pre digitalizáciu údajov o procese robotizovaného zvárania.
2. Tvorba trénovacej množiny údajov.
3. Tvorba testovacej množiny údajov.
4. Trénovanie navrhnutých štruktúr AI.
5. Verifikácia návrhu v danej iterácii pre každú štruktúru.
6. Výber najlepšieho nástroja AI.
7. Adaptívne prestavovanie pracoviska implementovaným nástrojom na báze AI pri zmene typu výrobku.

Digitalizácia údajov je zrealizovaná prostredníctvom dátového skladu realizovaného v MS SQL serveri, monitorovacieho systému procesných veličín, webovej aplikácie pre zadávanie parametrov robotizovaného zvárania technologom, webovej aplikácie pre zadávanie parametrov z testovania kvality a v záverečnej etape aj generovaním výstupov nástrojom na báze AI. Tvorba testovacej a trénovacej množiny údajov je realizovaná prostredníctvom experimentov vyhotovením testovacích zvarov. Verifikácia údajov beží priamo v prototype pracoviska pre inteligentné zváranie maloobjemovej výroby vyhotovením verifikačných zvarov zrealizovaných na základe sady parametrov vygenerovanou aktuálne verifikovanou štruktúrou umelej neurónovej siete. Po verifikácii viacerých typov sietí je potrebné zhodnotiť ich efektivitu pri maximalizácii kritéria kvality a spotreby času, energie, materiálu a médií a povoliť generovanie žiadaných parametrov robotizovaného zvárania víťaznej neurónovej siete.

Riešenie tézy 3 obsahuje návrh adaptívnych algoritmov prestavenia robotizovaného zvaracieho pracoviska na báze umelej inteligencie. Súčasťou návrhu adaptívnych algoritmov bola identifikácia parametrov robotizovaného zvárania, ktoré majú významný dopad na kvalitu zvaracieho procesu ako aj tvorba nástrojov pre dolovanie procesných dát, parametrov kvality a parametrov špecifikácií zvaracieho procesu z centrálnej databázy údajov.

4 Verifikácia prototypu robotizovaného pracoviska pre inteligentné zváranie maloobjemovej výroby

Verifikácia robotizovaného pracoviska pre inteligentné zváranie maloobjemovej výroby bola realizovaná prostredníctvom prototypu kyber-fyzikálneho nástroja, ktorý je zobrazený na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Prototyp inteligentného zvaracieho a robotického pracoviska. [25]

Videozáznam z verifikácie prototypu robotického pracoviska pre inteligentné zváranie maloobjemovej výroby je dostupný na linku: <https://www.vuez.sk/sluzba/robotika-a-digitalizacia/galerie#lightbox-videogallery6> . Verifikácia funkčnosti prototypu riadiaceho systému robotického pracoviska pre inteligentné zváranie maloobjemovej výroby bola realizovaná v dvoch etapách. V prvej etape bola preukázaná realizovateľnosť robotickej manipulácie a robotizovaného zvárania v navrhnutom prototypu pracoviska. V druhej etape bola verifikovaná schopnosť prípravy tréningovej a testovacej množiny údajov, potrebných k natrénovaniu umelých neurónových sietí. Výsledky zaznamenané v databáze pracoviska preukázali požadovanú funkčnosť verifikovaného prototypu.

Záver

V tejto dizertačnej práci je opísaný návrh, algoritmy, simulácia, vývoj, testovanie a overovanie robotickej manipulácie a zvárania výrobkov na robotizovanom pracovisku pre inteligentné zváranie malosériovej výroby. Malovýroba sa vyznačuje vysokou mierou potreby úpravy pracoviska z dôvodu vysokej variability zváraných dielov a výsledných produktov. Manuálne nastavovanie človekom je časovo a personálne náročné. Z tohto dôvodu bolo cieľom navrhnuť polohovacie a zváracie pracovisko s vysokou mierou automatického prispôsobenia variabilným požiadavkám. Na dosiahnutie tohto cieľa bola navrhnutá implementácia robotických systémov, ktoré spolu spolupracujú a tiež niekoľko automatických podsystémov s inteligentnými senzormi. Implementované podsystémy bolo potrebné prepojiť s dátami prostredníctvom centrálného riadiaceho systému. Správna funkčnosť robotickej manipulácie a robotického zvárania bola preukázaná vykonaním skúšobného tupého zvaru dvoch valcových častí. Ako je vidieť na videu <https://youtu.be/uktqNrnMPKI>, odoberací subsystém odoberie diely, ktoré sa majú zvärať, a pred zváraním ich umiestni do požadovanej polohy. Časti určené na zváranie, ktoré držali roboty, sa spolu dotýkali pomocou snímača sily a krútiaceho momentu. Potom ich roboty presunuli do polohy na korekciu zvarovej medzery pomocou 2D laserového skenera. Údaje získané z 2D laserového skenera boli použité k optimalizácii zvarovej medzery. Uskutočňovanie korekcií pri takomto riešení pomocou dvoch manipulátorov je časovo menej náročné, pretože je jednoduché poslať robotovi príkaz, aby sa s uchopeným dielom pohol nejakým smerom, čo by pri statických držiakoch dielov nebolo realizovateľné. Pri statických svorkách sa navyše korekcia nedá vykonať pred každým zváraním a potreba korigovať vzájomnú polohu môže nastať až po viacerých poruchách za sebou. Pri tomto riešení je možné rýchlo skontrolovať vzájomnú polohu dielov a vykonať potrebnú korekciu. Po dosiahnutí požadovanej zvarovej medzery bolo spustené robotické zváranie so synchronným polohovaním zváraných dielov prvým a druhým robotickým manipulátorom. V priebehu testovania zváracieho procesu boli procesné premenné automaticky zaznamenávané systémom sledovania procesných premenných do databázy v prostredí MS SQL servera. Na základe uvedeného možno konštatovať, že v navrhovanom robotizovanom pracovisku pre inteligentné zváranie malovýroby je možné vykonávať automatické robotické odoberanie zváraných dielov rôznych typov zo skladov a dostatočne presné robotizované polohovanie dielov do zváracích polôh pred a počas zvárania ako aj realizovať samotné robotizované zváranie v požadovanej kvalite. K dnešnému dňu (6.7.2023) je v tréningovej sade digitalizovaných 185 zrealizovaných zvarov.

Použitá literatura

- [1] LOFVING, M. et al. Evaluation of flexible automation for small batch production. In *Procedia Manufacturing*. ScienceDirect, 2018. [online]. Vol. 25. pp.177-184. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.072>.
- [2] KUSUDA, Y. Honda develops robotized FSW technology to weld steel and aluminum and applied it to a mass-production vehicle. In *Industrial Robot An International Journal*. Emerald Group, 2013. [online]. Vol. 40. No 3. pp. 208-212. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1108/01439911311309889>. ISSN 0143-991x.
- [3] ILESANMI, D. et al. Application of the Fourth Industrial Revolution for High Volume Production in the Rail Car Industry. In *Mass Production Processes* ,IntechOpen, 2019, 212p, ISBN 978-1-78985-983-6.
- [4] LIU, Y. K., ZHANG, Y. M. Supervised learning of human welder behaviors for intelligent robotic welding. 2015, In *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. Vol. 14., p. 1532-1541, ISSN 1558-3783.
- [5] HALIM, N. N. A., SHARIFF, S. S. R., & ZAHARI, S. M. Modelling an Automobile Assembly Layout Plant Using Probabilistic Functions and Discrete Event Simulation. In *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Detroit* : 2020. [online]. No. 5. pp. 2726-2737. Dostupné na internete: <http://www.ieomsociety.org/detroit2020/papers/543.pdf>.
- [6] KAMPKER, A. et al. Modular Body Shop with Process-and Component-integrated Jig Features. In *ATZproduction worldwide*, 2019, 6 (1), 10-15, ISSN 2524-8812.
- [7] TAO, F. et al. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. In *IEEE Transactions on industrial informatics* , 2019, Vol. 15, no 4, 2405-2415, ISSN 1941-0050.
- [8] PIRES, J. N., LOUREIRO, A., BÖLMSJO, G. Welding Robots. In *Technology, System Issues and Applications*, London : Springer, 2006, ISBN 978-1-84628-191-4.

[9] SPONG, M. W., HUTCHINSON, S., VIDYASAGAR, M. *Robot Modeling and Control*. Wiley, 2005, 7 s, 8 s, 355 s, ISBN 978-0-471-64990-8.

[10] KAH P., et al. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. [online]. In *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2015. [online]. Vol. 10, no 13. Dostupné na internete: <https://ijmme.springeropen.com/articles/10.1186/s40712-015-0042-y>.

[11] SAVU, J.D., et al. *Robot Welding, IAB-34-13, Minimum Requirements for the Education, Training, Examination and Qualification*, Consortium to implement Project E+ 2014-1-RO01-KA202-00291. 2016. [online]. Dostupné na internete: www.futureweld.eu.

[12] BOLOGNA, F., et al. Automatic welding imperfections detection in a smart factory via 2-D laser scanner. In *Journal of Manufacturing Processes*, 2022. Vol. 73. p. 948–960. ISSN 1526-6125.

[13] CIBICIK, A., TINGELSTAD, L., EGELAND, O. Laser Scanning and Parametrization of Weld Grooves with Reflective Surfaces. In *Sensors*, 2021, Vol. 21(14). [online]. Dostupné na internete: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/14/4791>.

[14] MANORATHNA R.P., et al. Feature Extraction and Tracking of a Weld Joint for Adaptive Robotic Welding. In *International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision, Marina Bay Sands. Singapore*, 2014. [online]. Dostupné na internete: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7064515>. ISBN 978-1-4799-5199-4.

[15] BATH A.A., MOHAN, V. Goal-Directed Reasoning and Cooperation in Robots in Shared Workspaces: an Internal Simulation Based Neural Framework. In *Cognitive Computation*, 2018. Vol. 10. p. 558–576. [online]. Dostupné na internete: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12559-018-9553-1#article-info>.

[16] DUCHON, F., et al. Detection of welds in automated welding, Applied Mechanics and Materials . In *Scientific.Net*. Vol. 611, 2014. p 519-528. [online]. Dostupné na internete: <https://www.scientific.net/AMM.611.519>.

- [17] PFEIFER, N., BRIESE, CH. *Laser scanning – principles and applications*. Vienna University of Technology, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Austria, 2007. [online]. Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/profile/Zbigniew-Darzynkiewicz-2/publication/7063931_Laser_Scanning_Cytometry_Principles_and_Applications-An_Update/links/0f3175346ae16d8bd4000000/Laser-Scanning-Cytometry-Principles-and-Applications-An-Update.pdf>.
- [18] FERRO, R., SAJJAD, H., ORDONEZ, R.E.C. *Steps for Data Exchange between Real Environment and Virtual Simulation Environment*, ICCMS, 2021 Melbourne, VIC, Australia. [online]. Dostupné na internete: <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3474963.3474988>>. ISBN 978-1-4503-8979-2. p.180-184.
- [19] DONGHONG, D., et al. Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part. In *ELSEVIER : Computer-Aided Design*. ScienceDirect, Vol.73, 2016 p. 66-75. [online]. Dostupné na internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010448515001748>>.
- [20] KOVARÍKOVÁ, Z. et al. Prototyping an intelligent robotic welding workplace by a cyber-physic tool. In *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022 [online]. Vol. 125. Dostupné na internete: <<https://rdcu.be/c5iz3>>.
- [21] Úrad priemyselného vlastníctva Slovenskej republiky: *Robotický systém na adaptívne spájanie súčastí*. Majiteľ: VÚEZ, a.s. Pôvodca: Kovariková Zuzana, Porubský Martin, Nagy František, Labát Dušan, Bachorík Oliver, Prištiak Ján, Mäsiar Jozef, Duchoň František, Babinec Andrej, Dekan Martin, Chovanec Ľuboš, Trebul'a Marek, Kohút Miroslav, Dobiš Michal. Slovenská republika. Zapísaný úžitkový vzor, 9381. 2021-11-24.
- [22] *Priemyslové roboty KR QUANTEC*. KUKA Roboter GmbH, BA Augsburg. [online]. Dostupné na internete: <<https://www.kuka.com/sk-sk/produkty-a-slu%5c%beby/robotick%3%a9-syst%3%a9my/industrial-robots/kr-quantec>>.

[23] Úrad priemyselného vlastníctva Slovenskej republiky: *Systém robotického polohovania zváraných súčastí pomocou silovo-momentového snímača*. Majiteľ: VÚEZ, a.s. Pôvodca: Kovariková Zuzana, Duchoň František, Chovanec Ľuboš, Kohút Miroslav, Dobiš Michal, Nagy František, Labát Dušan, Porubský Martin. Slovenská republika. Zapísaný úžitkový vzor, 9578. 2021-12-17.

[24] *MagicWave 4000 / 5000 Job, Prúdový zdroj TIG. Návod na obsluhu*. Fronius International GmbH, Austria. SK 023-01072021. 168 s. [online]. Dostupné na internete: <www.fronius.com>.

[25] KOVARÍKOVÁ, Z. et al. Digital tools as part of a robotic system for adaptive manipulation and welding of objects. In *ACTA IMEKO*, 2022. [online]. Vol. 11, No 3, p. 1-8, ISSN 2221-870X. Dostupné na internete: <<https://acta.imeko.org/index.php/acta-imeko/article/view/IMEKO-ACTA-11%20%282022%29-03-11>>.

[26] Úrad priemyselného vlastníctva Slovenskej republiky: *Systém inteligentnej robotickej ultrazvukovej diagnostiky*. Majiteľ: VÚEZ, a.s. Pôvodca: Kovariková Zuzana, Porubský Martin, Nagy František, Labát Dušan, Bachorík Oliver, Duchoň František, Babinec Andrej, Chovanec Ľuboš, Dekan Martin, Štalmachová Eva. Slovenská republika. Zapísaný úžitkový vzor, 9375. 2021-11-10.

Publikované práce autorky

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

- V2_01 KOVARÍKOVÁ, Zuzana - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej - LABAT, Dušan. Digital tools in the post-COVID-19 age as a part of robotic system for adaptive joining of objects. In *ISMCR 2021 : Abstract Proceedings : International Symposium on Measurement and Control in Robotics. Virtual Conference. October 1, 2021*. Tokyo : ISMCR, 2021, S. 20-21.
Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: BFA
- V2_02 TREBUĽA, Marek - KOVARÍKOVÁ, Zuzana - DEKAN, Martin. Robotic position correction of weld parts using a 2D laser scanner. In *ELITECH'22 [elektronický zdroj] : 24th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovakia. June 1, 2022*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2022, [6] s. ISBN 978-80-227-5192-6.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_03 TREBUĽA, Marek - DEKAN, Martin - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej - NAGY, František - KOVARÍKOVÁ, Zuzana - LABÁT, Dušan. Automatizované meranie geometrie zvarovej medzery pomocou 2D laserového skenera. In *ŠVOČ 2021 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác. 21. apríl 2021*. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, S. 154-159. ISBN 978-80-227-51 04-9.
Typ výstupu: príspevok; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_04 TREBUĽA, Marek - DEKAN, Martin - KOVARÍKOVÁ, Zuzana - BABINEC, Andrej - NAGY, František - DUCHOŇ, František - LABÁT, Dušan. Robotic measurement of the weld gap geometry using a 2D laser scanner. In *ICMERR 2022 : 7th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research. Krakow, Poland. December 9-11, 2022*. Piscataway : IEEE, 2022, S. 94-101. ISBN 978-1-6654-9051-1. V databáze: DOI: 10.1109/ICMERR56497.2022.10097796 ; WOS: 000986705500017 ; IEEE: 10097796 ; SCOPUS: 2-s2.0-85156185717.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

- V3_01 KOVARÍKOVÁ, Zuzana - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej - LABÁT, Dušan. Digital tools as part of a robotic system for adaptive manipulation and welding of objects. In *Acta IMEKO*. Vol. 11, No. 3 (2022), s. 1-8. ISSN 2221-870X (2021: 0.224 - SJR). V databáze:

DOI: 10.21014/acta_imeko.v11i3.1271 ; SCOPUS: 2-s2.0-85142923559.

Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADM

- V3_02 KOVARÍKOVÁ, Zuzana - DUCHOŇ, František - TREBUĽA, Marek - NAGY, František - DEKAN, Martin - LABAT, Dušan - BABINEC, Andrej. Prototyping an intelligent robotic welding workplace by a cyber-physic tool. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 125, iss. 9-10 (2023), s. 4855-4882. ISSN 0268-3768 (2021: 3.563 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.924 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1007/s00170-023-10986-1 ; WOS: 000933965300005 ; SCOPUS: 2-s2.0-85147656500. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

D1 Dokument práv duševného vlastníctva

- D1_01 KOVARÍKOVÁ, Zuzana - PORUBSKÝ, Martin - NAGY, František - LABÁT, Dušan - BACHORÍK, Oliver - PRIŠTIAK, Ján - MÄSIAR, Jozef - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej - DEKAN, Martin - CHOVANEC, Ľuboš - TREBUĽA, Marek - KOHÚT, Miroslav - DOBIŠ, Michal. *Robotický systém na adaptívne spájanie súčastí : Úžitkový vzor č. 9381, Dátum o zápise ÚV : 24. 11. 2021, Vestník ÚPV SR č. 22/2021*. Banská Bystrica : Úrad priemyselného vlastníctva SR, 2021. 9 s. Dostupné na internete: <<https://wbr.indprop.gov.sk/WebRegistre/UzitkovyVzor/Detail/51-2021>>. Kategória publikácie do 2021: AGJ
- D1_02 KOVARÍKOVÁ, Zuzana - PORUBSKÝ, Martin - NAGY, František - LABÁT, Dušan - BACHORÍK, Oliver - PRIŠTIAK, Ján - MÄSIAR, Jozef - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej - DEKAN, Martin - CHOVANEC, Ľuboš - TREBUĽA, Marek - KOHÚT, Miroslav - DOBIŠ, Michal. *Robotický systém na adaptívne spájanie súčastí : Prihláška patentu č. 25-2021, Dátum o zápise : 28.7.2021, Vestník ÚPV SR č. 14/2021*. Banská Bystrica : Úrad priemyselného vlastníctva SR, 2021. 9 s. Dostupné na internete: <<https://wbr.indprop.gov.sk/WebRegistre/Patent/Detail/25-2021>>. Kategória publikácie do 2021: AGJ
- D1_03 KOVARÍKOVÁ, Zuzana - PORUBSKÝ, Martin - NAGY, František - LABÁT, Dušan - BACHORÍK, Oliver - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej - CHOVANEC, Ľuboš - ŠTALMACHOVÁ, Eva - DEKAN, Martin. *Systém inteligentnej robotickej ultrazvukovej diagnostiky : Úžitkový vzor č. 9375, Dátum o zápise ÚV : 10. 11. 2021, Vestník ÚPV SR č. 21/2021*. Banská Bystrica : Úrad priemyselného vlastníctva SR, 2021. 10 s. Dostupné na internete: <<https://wbr.indprop.gov.sk/WebRegistre/UzitkovyVzor/Detail/29-2021>>. Kategória publikácie do 2021: AGJ

- D1_04 KOVARÍKOVÁ, Zuzana - DUCHOŇ, František - CHO VANEC, Ľuboš - KOHÚT, Miroslav - DOBIŠ, Michal - NAGY, František - LABÁT, Dušan - PORUBSKÝ, Martin. *Systém robotického polohovania zvaraných súčastí pomocou silovo-momentového snímača* : Úžitkový vzor č. 9578, dátum zverejnenia prihlášky: 27.04.2022, Vestník ÚPV SR č.: 08/2022. Banská Bystrica : Úrad priemyselného vlastníctva SR, 2021. Dostupné na internete: <<https://wbr.indprop.gov.sk/WebRegistre/UzitkovyVzor/Detail/190-2021>>. Typ výstupu: prihláška úžitkového vzoru; Kategória publikácie do 2021: AGJ

I3 Iný výstup publikačnej činnosti z časopisu

- I3_01 GÉRER, Anton - DUCHOŇ, František - KOVARÍKOVÁ, Zuzana. Špičkové pracovisko robotického zvarania (1). In *ATP Journal*. Roč. 29, č. 2 (2022), s. 16-18. ISSN 1335-2237. Typ výstupu: články, ktoré nemožno zaradiť do kategórie V, O, P, U alebo D (rozhovor); Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: GII
- I3_02 GÉRER, Anton - DUCHOŇ, František - KOVARÍKOVÁ, Zuzana. Špičkové pracovisko robotického zvarania (2). In *ATP Journal*. Roč. 29, č. 3 (2022), s. 12-14. ISSN 1335-2237. Typ výstupu: články, ktoré nemožno zaradiť do kategórie V, O, P, U alebo D (rozhovor); Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: GII