IOSUD - UNIVERITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești

TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat

Conducerea IoT Cloud a Liniilor de Producție Mecatronice Asistate de Sisteme Robotice Cyber Fizice, în Contextul Industriei și Educației 4.0/5.0

Doctorand,

Ing. Georgian SIMION

Conducător științific, **Prof. univ. dr. ing. Adrian FILIPESCU**
Universitatea „Dunărea De Jos” din Galați

Seria I8: Ingineria Sistemelor Nr. 15

Galați

2026

IOSUD - UNIVERITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești

TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat

Conducerea IoT Cloud a Liniilor de Producție Mecatronice Asistate de Sisteme Robotice Cyber Fizice, în Contextul Industriei și Educației 4.0/5.0

Doctorand,

Ing. Georgian SIMION

Președinte:
Prof. univ. dr. ing. habil. Marian BARBU
Rector al Universității „Dunărea de Jos” din Galați

Conducător științific:
Prof. univ. dr. ing. Adrian FILIPESCU
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Referenți științifici:
Prof. univ. dr. ing. habil. Adrian BURLACU
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Prof. univ. dr. ing. habil. Ioan-Ștefan SACALĂ
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București

Conf. univ. dr. ing. habil. Iulia STAMATESCU
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București

Seria I8: Ingineria Sistemelor Nr. 15
Galați
2026

Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 Octombrie 2013 sunt:

Domeniul fundamental ȘTIINȚE INGINEREȘTI

Seria I 1: **Biotehnologii**
Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**
Seria I 3: **Inginerie electrică**
Seria I 4: **Inginerie industrială**
Seria I 5: **Ingineria materialelor**
Seria I 6: **Inginerie mecanică**
Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**
Seria I 8: **Ingineria sistemelor**
Seria I 9: **Inginerie și management în agricultură și dezvoltare rurală**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE SOCIALE

Seria E 1: **Economie**
Seria E 2: **Management**
Seria E 3: **Marketing**
Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**
Seria SJ: **Drept**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE UMANISTE

Seria U 1: **Filologie - Engleză**
Seria U 2: **Filologie - Română**
Seria U 3: **Istorie**
Seria U 4: **Filologie - Franceză**

Domeniul fundamental MATEMATICĂ ȘI ȘTIINȚE ALE NATURII

Seria C**:** **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE BIOLOGICE ȘI BIOMEDICALE

Seria M: **Medicină**
Seria F: **Farmacie**

Cuprins.

Introducere 1
Capitolul 1 5
Modelarea și conducerea sistemelor robotice cyber-fizice pentru deservirea liniilor mecatronice de producție 5
1.1. Modelarea și conducerea robotului mobil cu roți motoare PeopleBot 6
1.2. Modelarea și conducerea manipulatorului robotic Cyton 6
1.3. Modelarea și conducerea manipulatorului robotic industrial ABB 7
1.4. Caracterizarea sistemelor robotice cyber-fizice 7
1.8. Concluzii 8
Capitolul 2. 8
Modelarea și conducerea VSCS în MCPRS-uri pentru linii mecatronice de producție 8
2.1. Sisteme servoing vizuale 8
2.2. Concluzii 10
Capitolul 3 11
Conducerea IoT-Cloud pentru FCPRS cu Digital Twin și abordare Industrie 4.0/5.0 11
3.1. Structura hardware A/D/R FCPRS 11
3.2. Arhitectura de conducere și monitorizare IoT-Cloud pentru A/D/R FCPRS 12
3.3. Concluzii 14
Capitolul 4 15
Conducerea IoT-Cloud și abordare DT pentru P/R/S MPS deservit de MCPRS 15
4.1. Arhitectura hardware P/R/S MPS deservit de MCPRS 15
4.2. Componenta reală pentru tehnologiile P/R/S ale produselor pe MPS asistat de MCPRS-uri 16
4.3. Concluzii 17
Capitolul 5 18
Conducerea IoT-Cloud pentru A/D/R MPL asistată de CPRS-uri duale 18
5.1. Arhitectura hardware A/D/R MPL asistată de CPRS-uri duale 19
5.2. Concluzii 20
Capitolul 6 21
Concluzii și contribuții științifice 21
6.1. Concluzii 21
6.2. Rezultate și contribuții științifice 22
6.3. Direcții de cercetare viitoare 23
6.4. Diseminarea rezultatelor 23
Bibliografie 26

Listă figuri.

FIGURA 1. DIMENSIUNILE ȘI VEDERILE DE POZIȚIE ALE PEOPLEBOT WMR. 6
FIGURA 2. (A) CYTON RM 1500, (B) PARAMETRII GEOMETRICI ȘI CONVERSIA MODELULUI CINEMATIC DK-IK. 6
FIGURA 3. RAZA DE FUNCȚIONARE ABB IRM IRB 120 DIN FIȘA DE SPECIFICAȚII: (A) RAZA DE ACȚIUNE, [27], (B) RAZA DE ACȚIUNE ÎN PLAN ORIZONTAL, [27] (C) 6-DOF ABB 120 IRM. 7
FIGURA 4. FCPRS, MAGAZIILE DE DEPOZITARE COMPONENTE, VIDEO-CAMERELE IFM. 9
FIGURA 5. CONFIGURAȚIILE SISTEMELOR SERVOING VIZUALE: (A) EYE-TO-HAND, (B) EYE-IN-HAND. 9
FIGURA 6. BUCLA DE CONDUCERE PENTRU ARHITECTURA PBVSC. 10
FIGURA 7. BUCLA DE CONDUCERE PENTRU ARHITECTURA IBVSC. 10
FIGURA 8. DISPOZITIVELE IOT-EDGE ȘI TOPOLOGIA DE COMUNICAȚIE LAN/WAN. 12
FIGURA 9. (A) FLUXUL ÎN NODE-RED PENTRU ACHIZIȚIA DE DATE ȘI (B) AFIȘAREA IMAGINILOR DE LA VIDEO-CAMERELE PENTRU, (B1) BAZE, (B2) CILINDRI METALICI ȘI DE PLASTIC, (B3) CORPURI, CAPACE CU MARGINI TRIUNGHIULARE ȘI ROTUNDE. 13
FIGURA 10. (A) FLUXUL ÎN NODE-RED PENTRU MEMORAREA ȘI (B) AFIȘAREA MĂRIMILOR ELECTRICE(CURENT, TENSIUNE, PUTERE) ȘI VALORI INSTANTANEE ȘI PE ORIZONT DE TIMP. 13
FIGURA 11. ACHIZIȚIA DE DATE ÎN FORMAT CSV (STÂNGA) ȘI SALVAREA DATELOR ÎN FIȘIERE CSV ÎN WINSCP (DREAPTA). 14
FIGURA 12. DISPOZITIVELE IOT CARE UTILIZEAZĂ CONEXIUNILE PROFIBUS DP, PROFINET ȘI LAN/WAN ETHERNET. 16
FIGURA 13. ARHITECTURA DE CONDUCERE A MCPRS: (A) PEOPLEBOT WMR, (B) CYTON RM, (C) MVSCS. 17
FIGURA 14. INFRASTRUCTURA DE COMUNICAȚIE ȘI CALCULUL DE FRONTIERĂ (EDGE-COMPUTING)...19
FIGURA 15. A/D/R MPL ASISTATĂ DE MCPRS, ARHITECTURA GLOBALĂ DE MONITORIZARE ȘI CONDUCERE. 20

Notații și abrevieri.

Acronim	Definition (Definiție)
A/D ML	Assembly/Disassembly Mechatronics Line (Linie Mecatronică de Asamblare/Dezasamblare Hera & Horstmann);
A/D/R FCPRS	Assembly/Disassembly/Replacement Fixed Cyber-Physical Robotic System (Sistem Robotic Cyber-Fizic pentru Asamblare/Dezasamblare/Înlocuire)
ARIA	Advanced Robotics Interface for Applications (Interfață Roboți ActivMedia pentru Aplicații);
A/D/R MPL	Assembly/Disassembly/Repair Mechatronics Production Line (Linie Mecatronică de Producție pentru Asamblare/Dezasamblare/Reparare)
AI	Artificial Intelligence (Inteligență Artificială)
AIbCV	Artificial Intelligence based Computer Vision (Vedere Computerizată bazată pe Inteligență Artificială);
AR	Augmented Reality (Realitate Augmentată)
API	Application Programing Interface (Interfață pentru Programarea Aplicațiilor)
CC	Cloud Computing (Prelucrare de date în Cloud)
CPRS	Cyber Physical Robotic System (Sistem Robotic Cyber-Fizic)
CSV	Comma Separated Value (Valoare separată prin virgulă)
CV	Computer Vision (Vedere Computerizată)
DDNS	Dynamic Data Distruibution Service (Serviciu Dinamic de Distribuire Date)
DDS	Data Distribution Service (Serviciu de Distribuire Date)
D-H	Denavit-Hartenberg
DK	Direct Kinematics (Cinematică Directă)
DoF	Degree of Freedom (Grad de Libertate)
DT	Digital Twin (Geamăn Digital)
DT-TTSMC	Discrete Time-Trajectory Tracking Sliding Mode Control (Conducerea Sliding Mode la Urmărirea Traiectoriei, cu Timp Discret)
DW	Driving Wheel (Roată Motoare)
EIH	Eye-in-hand (Ochi-în-Mână)
EMI	Electromagnetic interference (Interferență Electromagnetică)
ETH	Eye-to-hand (Ochi-la-Mână)
FCPRS	Fixed Cyber Physical Robotic System (Sistem Robotic Cyber-Fizic Fix)
FVSCS	Fixed Visual Servoing Control System (Sistem Servoing Vizual Fix)
FW	Free Wheel (Roată Liberă)
GUI	Graphical User Interface (Interfață Grafică Utilizator)
HMI	Human Machine Interface (Interfață Om-Mașină)
HVSC	Hybrid Visual Servoing Control (Sistem Servoing Vizual Hibrid)
IBVSC	Image Based Visual Servoing Control (Sistem Servoing Vizual Bazat pe Imagine)
IK	Inverse Kinematics (Cinematică Inversă)
IMU	Inertial Measuring Unit (Unitate de măsură Inerțială)
I/O	Input/Output (Intrări/Ieșiri)
IoT	Internet of Things (Internetul lucrurilor)
IIoT	Industrial Internet of Things (Internetul Industrial al lucrurilor)
IRM	Industrial Robotic Manipulator (Manipulator Robotic Industrial)
JSON	JavaScript Object Notation (Denumire Obiect JavaScript)
LAN	Local Area Network (Rețea Locală)
PROFINET	Process Field Network (Rețea pentru Procese Distribuite)
MCPRS	Mobile Cyber Physical Robotic System (Sistem Robotic Cyber-Fizic Mobil)
MPI	Multi-Point Interface (Interfață Multi-Punct)
MPL	Mechatronics Production Line (Linie Mecatronică de Producție)
MPS	Modular Production System (Sistem de Producție Modular)
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport (Transport prin Telemetrie de Mesaje în Coadă)
MVSCS	Mobile Visual Servoing Control System (Sistem Servoing Vizual Mobil)
OPC-UA	Open Platform Communications-Unified Architecture (Platformă Deschisă de Comunicație-Arhitectură Unificată)

PBVSC	**Position Based Visual Servoing Control (Sistem Servoing Vizual Bazat pe Poziție)**
PCL	**Point Cloud Library (Bibliotecă în Cloud pentru Detecție Obiecte)**
PLC	**Programmable Logic Controller (Automat Programabil)**
PN	**Petri Networks (Rețele Petri)**
P/R/S	**Processing/Reprocessing/Scrapping (Procesare/Reprocesare/Rejectare)**
P/R/S MPS	**Processing/Reprocessing/Scrapping Mechatronics Production System (Sistem de Producție Modular pentru Procesare/Reprocesare/Rejectare)**
PROFIBUS DP	**Process Field Bus Decentralized Peripherals (Magistrală Procese Distribuite – Periferie Distribuită)**
RFI	**Radio-Frequency Interference (Interferență Radio-Frecvență)**
RISC	**Reduced Risk Set Computer (Mulțime de Instrucțiuni cu Risc Redus)**
RM	**Robotic Manipulator (Manipulator Robotic)**
ROI	**Region of Interest (Regiune de Interes)**
ROS2	**Robots Operating System 2 (Sistem de Operare pentru Roboți versiunea 2)**
SCADA	**Supervisory Control and Data Acquisition (Conducere Supervizată și Achiziții de Date)**
SMC	**Sliding Mode Control (Conducere cu Mod Alunecător)**
SSH	**Secure Shell Protocol (Protocol Shell Securizat)**
STEM	**Science, Technology, Engineering and Mathematics (Știință, Technologii, Inginerie și Matematici)**
STPN	**Synchronized Timed Petri Nets (Rețele Petri Temporizate și Sincronizate)**
TPN	**Timed Petri Nets (Rețele Petri Temporizate)**
TTSMC	**Trajectory Tracking Sliding Mode Control (Conducere cu Mod Alunecător bazată pe Urmărirea Traiectoriei)**
UDS	**Universal Device Server (Server Universal Dispozitive)**
URDF	**Unified Robot Description Format (Format Unificat de Descriere a Roboților)**
USD	**Universal Scene Description (Descriere Universală a Mediului de Lucru)**
VM	**Virtual Machine (Mașină Virtuală)**
VNC	**Virtual Networking Computing (Rețea Virtuală de Calcul)**
VPN	**Virtual Private Network (Rețea Privată Virtuală)**
VPS	**Virtual Private Server (Server Privat Virtual)**
VPU	**Video Processing Unit (Unitate de Procesare Video)**
VR	**Virtual Reality (Realitate Virtuală)**
VSCS	**Visual Servoing Control System (Sistem Servoing Vizual)**
WMR	**Wheeled Mobile Robot (Robot Mobil cu Roți)**
WH	**Warehouse (Magazie)**
WP	**Workpiece (Piesă de Lucru)**
WS	**Workstation (Stație de Lucru)**
WinSCP	**Windows Secure Copy (Copie Windows Securizată)**

Introducere

Teza de doctorat intitulată „**Conducerea IoT-Cloud a liniilor de producție mecatronice asistate de sisteme robotice cyber-fizice, în contextul Industriei și Educației 4.0/5.0**” prezintă dezvoltarea unor arhitecturi integrate pentru conducerea locală și la distanță a sistemelor inteligente de fabricație, bazate pe concepte IoT, Cloud, Digital Twin, inteligență artificială și sisteme robotice cyber-fizice fixe și mobile. Cercetările sunt orientate către implementarea principiilor producției circulare și sustenabile, prin integrarea operațiilor de asamblare, dezasamblare, reparare, procesare, reprocesare, recuperare și reutilizare a componentelor în cadrul unor sisteme de producție inteligente.

În contextul transformărilor digitale specifice Industriei 4.0 și evoluției către paradigma Industrie 5.0, sunt investigate metode de modelare, monitorizare și conducere distribuită a unor tehnologii de fabricație, utilizând infrastructuri IoT-Cloud, Digital Twin, interfețe HMI/SCADA avansate, realitate augmentată și virtuală, sisteme de comunicații și agenți de inteligență artificială pentru optimizarea proceselor de producție.

Totodată, teza evidențiază rolul acestor tehnologii în dezvoltarea unor platforme educaționale și de cercetare specifice Educației 4.0/5.0, capabile să integreze într-un mediu unitar concepte din robotică, automatizare, comunicații industriale, inteligență artificială și securitate cibernetică.

Pornind de la stadiul actual, în teză sunt tratate concepte privind conducerea locală și la distanță (IoT și Cloud) a unor tehnologii de fabricație, asamblare/dezasamblare și prelucrare/reprelucrare, utilizând instrumente moderne de achiziții de date, sisteme de comunicație, metode de conducere și optimizare cu agenți de AI, după cum urmează:

- Fabricația circulară și producția durabilă;
- Asamblarea, dezasamblarea, prelucrarea, reprelucrarea, recuperarea, reutilizarea și/sau revalorificarea componentelor și produselor;
- Optimizarea tehnologiilor de fabricație prin implicarea agenților de AI;
- Integrarea conceptelor Digital Twin, Industrie și Educație 4.0/5.0 în tehnologiile de fabricație;
- Implicațiile conceptelor Industrie 4.0/5.0 în Educație 4.0/5.0;
- Cyber-securitatea structurilor de conducere a proceselor de fabricație bazate pe IoT, IIoT și Cloud.

1. Producție circulară și fabricație sustenabilă

Liniile modulare de producție destinate asamblării/dezasamblării și prelucrării/reprelucrării, asistate de sisteme robotice cyber-fizice, sunt proiectate pentru a fundamenta principiile economiei circulare și ale fabricației sustenabile. În contrast cu paradigmele liniare tradiționale, care presupun eliminarea produselor neconforme, arhitecturile propuse în această teză facilitează reintegrarea acestora în fluxul tehnologic prin operațiuni de dezasamblare, reprocesare, recuperare și reutilizare. Astfel, subansamblele respinse calitativ sunt reevaluate și redirecționate către depozite intermediare, de unde sunt reintroduse în ciclul de fabricație.

Această abordare minimizează pierderile materiale, diminuează volumul deșeurilor și optimizează eficiența utilizării resurselor. Obiectivul central al acestor sisteme constă în integrarea funcțiilor de producție și recondiționare într-un mediu operațional unitar. Această convergență permite liniilor de fabricație să opereze ca sisteme în buclă închisă, extinzând managementul ciclului de viață al produsului dincolo de faza inițială și substituind casarea cu strategii active de recuperare și revalorificare.

2. Reprocesarea și recuperarea componentelor

Integrarea operațiunilor de dezasamblare, reprocesare și recuperare transformă liniile de producție în platforme industriale reziliente și sustenabile. În cadrul acestei arhitecturi, componentele identificate neconforme calitativ sunt clasificate și stocate temporar, în vederea reintroducerii lor în procedurile de recondiționare și corecție dimensională sau funcțională. Pentru a menține eficiența, aceste proceduri de corecție sunt proiectate să ruleze automatizat, fără a perturba fluxurile principale de fabricație. Această cerință impune implementarea unor arhitecturi robotizate complexe, denumite în teză sisteme robotice cyber-fizice fixe și mobile.

Pe parcursul operațiunilor de recondiționare, aceste sisteme gestionează manipularea și transferul intralogistic al produselor între stațiile de lucru, facilitând reintroducerea lor ulterioară în fluxul tehnologic validat. În situațiile în care un produs conține subansamble iremediabil defecte, procesul de recuperare presupune înlocuirea selectivă a acestora cu entități conforme, anterior reintroducerii produsului în ciclul principal.

Această capacitate operațională conferă sistemului un nivel superior de flexibilitate și sustenabilitate. Prin facilitarea recuperării și înlocuirii selective a componentelor, sistemul minimizează pierderile materiale, garantând simultan standardele de calitate și funcționalitate. Suplimentar, utilizarea integrată a sistemelor robotice cyber-fizice fixe și mobile asigură o execuție autonomă a tehnologiilor de recuperare, minimizând intervenția umană și permițând reconfigurarea dinamică a taskurilor de producție în timp real.

3. Integrarea paradigmelor Educație 4.0 și 5.0

Liniile mecatronice de producție industriale sau de laborator, asistate de sisteme robotice cyber-fizice fixe și mobile, prezintă valențe educaționale și posibilități de cercetare. Platformele de laborator asistate de sisteme robotice cyber-fizice pot fi concepute ca sisteme inteligente de fabricație cu implicații majore în educația și practica inginerească avansată.

Astfel de sisteme oferă un mediu integrat de automatizare, achiziții și comunicații date, transformări digitale (Digital Twin), conducere locală și la distanță prin IoT și Cloud, interfețe utilizator, inteligență artificială, mentenanță, reziliență, robustețe și securitate cibernetică, toate centrate pe utilizatorul uman.

Din perspectiva Educației 4.0, sistemele oferă un mediu experimental care integrează robotică, automatizare, sisteme cyber-fizice, Digital Twins și instrumente de inteligență artificială. În cadrul conceptelor specifice Educației 4.0, sistemele de laborator permit studenților și cercetătorilor să interacționeze cu tehnologii industriale moderne, caracteristice mediilor Industriei 4.0, [1]:

- sisteme cyber-fizice de producție hibride, prin integrarea liniilor mecatronice de producție și a sistemelor robotic cyber-fizic mobil;
- tehnologii Digital Twin, pentru sincronizarea mediului fizic cu cel virtual;
- rețele de comunicație industrială și arhitecturi de conducere bazate pe automate programabile (PLC);
- sisteme de supraveghere și conducere de tip SCADA și interfețe om-mașină (HMI);
- Interfețe grafice Node-RED pentru planificarea taskurilor prin elemente de realitate augmentată;
- medii de simulare bazate pe Rețele Petri Hibride Sincronizate (SHPN);
- Sisteme robotice mobile dotate cu algoritmi de servoing vizual.

Prin interacțiunea cu aceste tehnologii, studenții dobândesc experiență practică în proiectarea și analizarea sistemelor complexe de automatizare. Platforma de laborator le permite explorarea ciclului de viață complet al sistemelor inteligente de fabricație, de la modelarea și simularea sistemului până la implementarea și conducerea în timp real.

Această abordare promovează învățarea bazată pe probleme și experiențe, principiu fundamental al Educației 4.0. Dincolo de componenta tehnologică specifică Educației 4.0, sistemul contribuie și la conceptul emergent de Educație 5.0, care pune accent pe inovație centrată pe om, sustenabilitate și colaborare interdisciplinară. Prin integrarea operațiilor de recuperare, reutilizare și reprocesare a componentelor, studenții pot analiza modul în care sistemele de producție moderne pot reduce deșeurile și îmbunătăți utilizarea resurselor. Platformele susțin, totodată, învățarea interdisciplinară, combinând cunoștințe din mai multe domenii, inclusiv:

- inginerie robotică și automatizare;
- sisteme de conducere și inteligență artificială;
- informatică industrială și rețele de comunicație;
- sisteme de fabricație și producție sustenabilă.

4. Impactul educațional al sistemelor mecatronice de laborator bazate pe tehnologia Digital Twin

Arhitectura de tip Digital Twin, implementată la nivelul liniilor de producție asistate de sisteme robotice cyber-fizice fixe și mobile, generează beneficii majore în educația STEM.

Sincronizarea infrastructurii fizice cu mediul virtual de simulare oferă utilizatorilor capacitatea de a analiza comportamentul complex al sistemelor din perspective operaționale multiple. Integrarea interfețelor de realitate augmentată și virtuală facilitează vizualizarea fluxurilor tehnologice, evaluarea dinamicii de sistem și înțelegerea mecanismelor de sincronizare dintre procesele de fabricație cu evenimente discrete și intervențiile entităților robotice colaborative.

În plan analitic, utilizarea SHPN constituie un instrument matematic riguros pentru modelarea și simularea dinamicii sistemelor cu stări discrete și continue. În consecință, aceste platforme de laborator funcționează drept ecosisteme educaționale integrale pentru fabricația inteligentă, validând demersurile didactice și cercetarea avansată în domeniile automatizărilor, roboticii și inteligenței artificiale.

5. Proiectarea interfețelor ergonomice HMI-SCADA

Dezvoltarea interfețelor de monitorizare și conducere (HMI-SCADA) pentru linii de producție asistate de sisteme robotice cyber-fizice și integrate în arhitecturi Digital Twin necesită o abordare centrată pe operator, fundamentată pe principii solide de ergonomie cognitivă. Proiectarea sistemelor de conducere locală și la distanță (bazate pe IoT și Cloud) impune implementarea unor mecanisme de feedback multidimensionale care să garanteze atât eficiența operațională, cât și siguranța proceselor. Sistemele HMI moderne trebuie să integreze vizualizări 3D și reprezentări virtuale sincronizate, oferind operatorului o înțelegere intuitivă a stării sistemului. În acest context, interfețele trebuie să faciliteze interacțiuni complexe, precum manipularea taskurilor prin drag-and-drop în medii virtuale sau monitorizarea dinamică prin realitatea augmentată, menținând în același timp o structură vizuală coerentă, cu simbolistică unificată și scheme de culori accesibile. Siguranța este prioritară, motiv pentru care funcțiile critice (ex: opriri de urgență, intervenții manuale) necesită acces rapid, confirmat prin feedback auditiv, vizual sau haptic, eliminând ambiguitățile în situații de stres operațional.

6. Cadrul instituțional și activitatea de cercetare

Activitatea de cercetare aferentă tezei, incluzând fundamentarea teoretică, proiectarea arhitecturilor de conducere și implementarea algoritmilor avansați pentru conducerea sistemelor robotice, a beneficiat de suportul logistic și financiar al proiectului complex **UEFISCDI CIDSACTEH (PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0290)**. Proiectul, intitulat „Conducerea inteligentă și distribuită a 3 sisteme autonome complexe integrate în tehnologii emergente către asistare personală medico-socială și deservire de linii de fabricație flexibilă de precizie”, a fost coordonat de Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, în cadrul unui consorțiu format cu Universitatea „Valahia” din Târgoviște, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București și Universitatea din Craiova. Integrarea în calitate de tânăr cercetător în echipa instituției coordonatoare, a asigurat o sinergie completă și o aliniere integrală a tematicii tezei cu obiectivele științifice și direcțiile de dezvoltare ale proiectului.

7. Obiectivele stabilite și îndeplinite

Cercetarea desfășurată a vizat îndeplinirea următoarelor obiective fundamentale:

OB.1. Dezvoltarea modelelor cinematice pentru roboți mobili, manipulatoare robotice și integrarea acestora în arhitecturi de comunicație și sincronizare destinate conducerii locale și la distanță a liniilor mecatronice de producție.

OB.2. Proiectarea, implementarea și validarea experimentală a sistemelor servoing vizuale fixe (eye-to-hand) și mobile (eye-in-hand) pentru poziționarea și manipularea de precizie a produselor și a componentelor în operații de preluare și plasare.

OB.3. Dezvoltarea și implementarea modelelor și arhitecturilor de conducere Digital Twin pentru sisteme robotice cyber-fizice fixe și mobile utilizate în aplicații de fabricație inteligentă.

OB.4. Modelarea analitică, simularea și conducerea fluxurilor tehnologice implementate pe linii mecatronice de laborator, utilizând metode și tehnologii Digital Twin.

OB.5. Elaborarea unor arhitecturi de conducere ierarhizate (multinivel) pentru sistemele de fabricație flexibilă circulară (incluzând asamblarea, reprocesarea și revalorificarea), fundamentate pe infrastructuri IoT-Cloud și Digital Twin, în concordanță cu paradigmele Industrie 4.0/5.0 și Educație 4.0/5.0.
OB.6. Dezvoltarea și validarea unor soluții de conducere locală și la distanță pentru linii mecatronice de producție asistate de sisteme robotice cyber-fizice fixe și mobile, prin integrarea infrastructurilor de comunicație, achiziția și prelucrarea datelor, interfețelor grafice orientate către utilizator, dispozitivelor încorporate și aplicațiilor software dedicate.

8. Prezentarea conținutului tezei

Teza de doctorat este structurată în șase capitole, care abordează progresiv modelarea, conducerea și integrarea sistemelor robotice cyber-fizice în arhitecturi de fabricație inteligente, bazate pe concepte IoT-Cloud, Digital Twin și Industrie/Educație 4.0/5.0:

- **În Capitolul 1,** se prezintă fundamentele teoretice și experimentale care stau la baza modelării, integrării și conducerii sistemelor robotice utilizate în cadrul cercetării. Capitolul analizează structura cinematică și caracteristicile funcționale ale robotului mobil PeopleBot, ale manipulatorului robotic Cyton și ale robotului industrial ABB, evidențiind rolul acestora în realizarea sistemelor robotice cyber-fizice fixe și mobile. Sunt dezvoltate arhitecturi de integrare ale acestor sisteme în linii mecatronice de producție destinate operațiilor de asamblare, dezasamblare, reparare, procesare și reprocesare. De asemenea, sunt prezentate infrastructurile de comunicație industrială și mecanismele de sincronizare bazate pe protocolul MODBUS TCP, utilizate pentru schimbul de date, conducerea locală și distribuită a proceselor de fabricație, [AS.7].

- **În Capitolul 2,** se prezintă arhitecturile de servoing vizuale dezvoltate pentru sistemele robotice cyber-fizice utilizate în cadrul tehnologiilor de fabricație analizate. Sunt studiate metodele de servoing vizual bazate pe imagine, pe poziție și structurile hibride, fiind detaliate modelarea prin momente ale imaginii, formularea matricei de interacțiune și legile de conducere implementate pentru poziționarea și manipularea de precizie. Capitolul include dezvoltarea și validarea experimentală a sistemelor de servoing vizual fixe de tip *eye-to-hand* și mobile de tip *eye-in-hand*, integrate în operații de asamblare, dezasamblare, reparare, procesare și reprocesare, demonstrând îmbunătățirea performanțelor de localizare, orientare și manipulare a produselor și a componentelor în cadrul sistemelor de producție asistate de sisteme robotice cyber-fizice, [AS.2], [2], [3].

- **În Capitolul 3,** se prezintă tehnologiile digitale avansate bazate pe IoT-Cloud, Digital Twin și realitate augmentată/virtuală utilizate pentru conducerea și monitorizarea sistemelor robotice cyber-fizice fixe echipate cu manipulatoare robotice industriale, în contextul conceptelor Industrie și Educație 4.0/5.0. Sunt dezvoltate componentele virtuale ale sistemelor fizice, incluzând modele digitale 3D, aplicațiile de realitate augmentată și mediile de realitate virtuală destinate vizualizării, simulării și monitorizării în timp real a tehnologiilor de asamblare, dezasamblare și înlocuire de componente. Capitolul prezintă arhitectura de conducere și monitorizare bazată pe IoT-Cloud, în rețele locale și prin acces securizat la distanță prin VPN, analizând protocoalele de comunicație și sincronizare, mecanismele de securizare a transferului de date, precum și metodele de achiziție, prelucrare și vizualizare a informațiilor în interfețe web și cloud dedicate conducerii proceselor de fabricație, [AS.4].

- **În Capitolul 4,** se prezintă abordarea Digital Twin a arhitecturii de conducere IoT-Cloud pentru sisteme modulare de producție destinate operațiilor de procesare, reprocesare și rejectare, asistate de sisteme robotice cyber-fizice mobile. Sunt definite ipotezele de lucru privind tipurile de produse procesate, fluxurile tehnologice asociate, criteriile de evaluare a calității și metodologiile utilizate pentru detecția, clasificarea și rejectarea produselor neconforme. Sunt dezvoltate strategii de optimizare a fluxurilor de producție și de gestionare a produselor care necesită reprocesare. Capitolul descrie componenta virtuală a tehnologiilor de procesare, reprocesare și rejectare, realizată prin modele Digital Twin sincronizate cu sistemele fizice, și mediile de realitate virtuală utilizate pentru simularea, planificarea și

validarea scenariilor de producție, prin intermediul rețelelor Petri sincronizate, temporizate discrete (STPN), și hibride (SHPN, discrete și continue). Sunt prezentate interfețele HMI dezvoltate pentru monitorizarea și conducerea proceselor, cu accent pe accesibilitate, ergonomie și interacțiunea eficientă dintre operator și sistemul de fabricație, [AS.1].

- **În Capitolul 5,** sunt dezvoltate și implementate arhitecturi Digital Twin pentru linii mecatronice de producție destinate operațiilor de asamblare, dezasamblare și reparare, asistate de sisteme robotice cyber-fizice fixe și mobile. Sunt definite ipotezele de proiectare privind structura și performanțele hardware ale sistemului, tehnologiile de producție multifuncționale utilizate, capacitățile operaționale ale liniilor, tipurile de produse și componente gestionate, criteriile și logica de evaluare a calității. Capitolul prezintă dezvoltarea componentelor virtuale ale sistemului, incluzând modele Digital Twin, aplicații de realitate augmentată și medii de realitate virtuală sincronizate cu procesele fizice (STPN și SHPN). Sunt descrise metodele de simulare, monitorizare și conducere a tehnologiilor de asamblare, dezasamblare și reparare, și instrumentele utilizate pentru planificarea și validarea scenariilor de producție. În final, sunt analizate principiile și conceptele specifice Industriei și Educației 4.0/5.0, evidențiindu-se contribuția acestora la creșterea flexibilității, interoperabilității și sustenabilității sistemelor moderne de fabricație, [AP.4], [AS.3].

- **În Capitolul 6,** sunt sintetizate rezultatele obținute pe parcursul cercetării, și sunt evidențiate contribuțiile originale la dezvoltarea arhitecturilor de conducere IoT-Cloud și Digital Twin, pentru sisteme de producție mecatronice asistate de sisteme robotice cyber-fizice. Sunt analizate performanțele soluțiilor dezvoltate, gradul de realizare al obiectivelor stabilite și aplicabilitatea rezultatelor în domeniul sistemelor inteligente de fabricație, în contextul Industriei și Educației 4.0/5.0. Capitolul include, direcțiile viitoare de cercetare privind integrarea agenților de inteligență artificială, al sistemelor autonome, al tehnologiilor avansate de analiză și optimizare a datelor, și a noilor paradigme asociate Industriei 5.0 și Educației 5.0 în conducerea sistemelor de producție cyber-fizice. Totodată, sunt prezentate activitățile de diseminare a rezultatelor cercetării, concretizate prin publicarea a 20 de lucrări științifice, dintre care 8 articole în reviste indexate ISI Web of Science Core Collection, clasificate în zona Q2 conform indicatorului AIS (Article Influence Score) din Journal Citation Reports 2025, fiind prim autor la două, 12 lucrări publicate în volumele unor manifestări științifice internaționale, dintre care 9 indexate ISI Web of Science, toate beneficiind de identificator DOI. Aceste rezultate confirmă relevanța științifică și aplicativă a cercetărilor realizate și contribuția lor în dezvoltarea domeniului sistemelor inteligente de fabricație asistate de sisteme robotice cyber-fizice.

Prin conținutul celor șase capitole, teza realizează o abordare unitară a conducerii IoT-Cloud și Digital Twin a liniilor de producție mecatronice asistate de sisteme robotice cyber-fizice fixe și mobile, demonstrând posibilitatea implementării unor tehnologii de fabricație inteligente, sustenabile și centrate pe utilizator, în concordanță cu cerințele actuale și viitoare ale Industriei și Educației 4.0/5.0.

Capitolul 1

Modelarea și conducerea sistemelor robotice cyber-fizice pentru deservirea liniilor mecatronice de producție

Capitolul 1 stabilește fundamentele hardware și software ale sistemelor robotice cyber-fizice (CPRS) utilizate în această teză, structurate pe trei niveluri. Sunt prezentate modele cinematice și algoritmi de conducere pentru cele trei platforme robotice: robotul mobil cu roți motoare (WMR) PeopleBot, manipulatorul robotic (RM) Cyton 1500 și manipulatorul robotic industrial (IRM) ABB IRB 120. Sunt definite și caracterizate conceptele CPRS, sistemele robotice cyber-fizice fixe (FCPRS) și sistemele robotic cyber-fizice mobile (MCPRS). Sunt descrise sistemele integrate de producție, sisteme robotice cyber-fizice fixe de asamblare/dezasamblare/înlocuire (A/D/R FCPRS), linii mecatronice de producție de asamblare/dezasamblare/reparare (A/D/R MPL) și sisteme modulare de producție pentru procesare/reprocesare/rejectare (P/R/S MPS), cu arhitecturile hardware și protocoalele de

comunicație și sincronizare MODBUS TCP bidirecționale. În ultima secțiune a capitolului sunt sintetizate concluziile.

1.1. Modelarea și conducerea robotului mobil cu roți motoare PeopleBot

1. Descriere hardware. Platforma mobilă, sau robotul mobil cu roți (WMR) reprezintă componenta care transportă piesele între stațiile de lucru (WS). Dimensiunile și vederile de poziție sunt ilustrate în Figura 1.

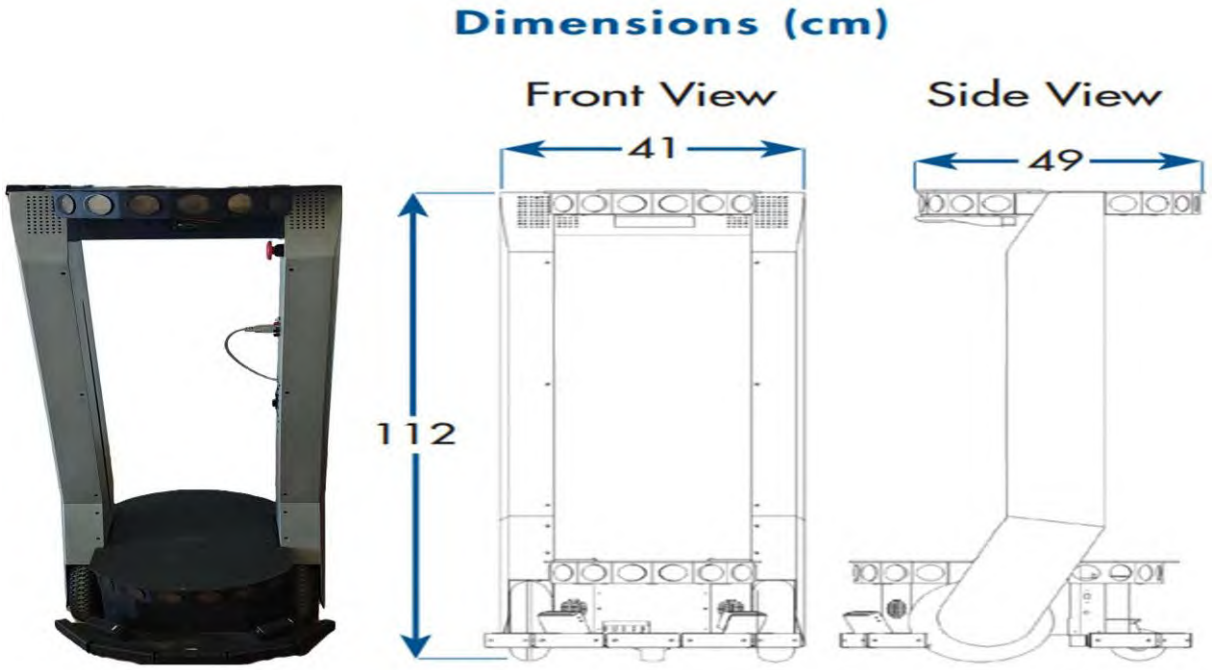


Figura 1. Dimensiunile și vederile de poziție ale PeopleBot WMR.

1.2. Modelarea și conducerea manipulatorului robotic Cyton

1. Descriere hardware RM Cyton Gamma 1500. Cyton RM a fost programat de compania Robai cu software bazat pe interfața de programare a aplicațiilor (API) Actin de la compania Energid, condus prin cinematica directă și inversă pentru diverse aplicații de poziționare fixă, operații de preluare și plasare de obiecte, [19]. Cyton RM este amplasat pe PeopleBot, în vederea ajungerii la depozitele liniilor mecatronice de producție. Cyton RM este prezentat în Figura 2(a). O formă simplificată a conversiei cinematicii din directă în inversă și vice-versa este prezentată în Figura 2(b).

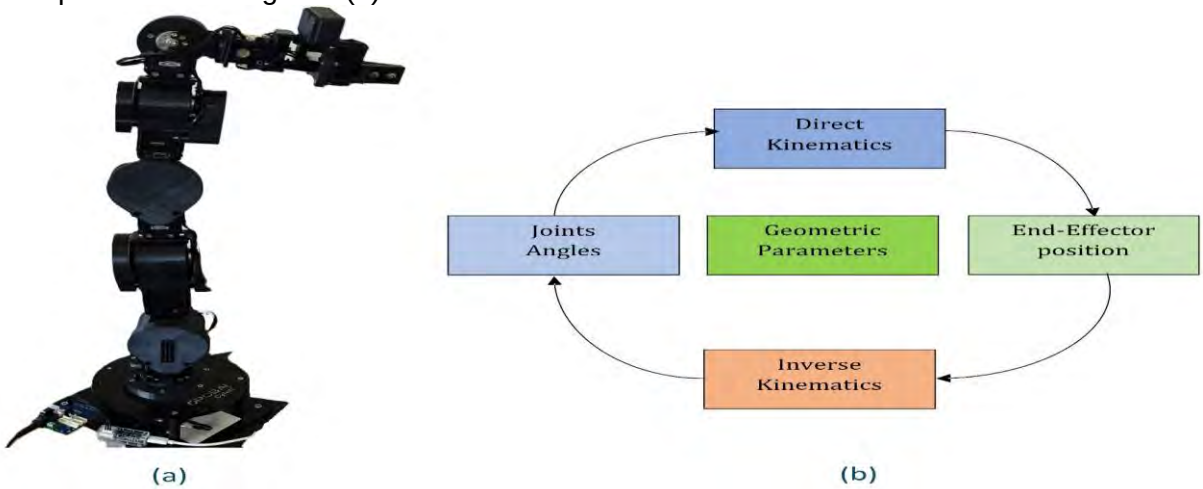


Figura 2. (a) Cyton RM 1500, (b) Parametrii geometrici și conversia modelului cinematic DK-IK.

Cyton RM are 7 grade de libertate (DoF), oferă o manipulare robustă și precisă pentru o gamă largă de aplicații, proiectat pentru reproducerea mișcărilor brațului uman. Comparativ cu mișcările unui braț uman care are două articulații pentru umăr, una pentru cot și trei pentru încheietură, Cyton RM utilizează trei axe pentru umăr, două pentru cot și două pentru încheietură, ce permite atingerea unui punct prin mai multe ipostaze.

1.3. Modelarea și conducerea manipulatorului robotic industrial ABB

1. Descriere hardware IRM ABB. ABB IRM IRB 120 este utilizat ca parte a configurației din mediul A/D/R FCPRS, pentru a executa și gestiona taskuri multiple de automatizare a tehnologiilor de asamblare, dezasamblare și înlocuire de cilindri, afișat în Figura 3 (c). Aceasta este unul dintre cei mai mici roboți industriali cu 6 DoF de la ABB Robotics, compact cu o greutate de 25 kg, o capacitate de sarcină de 3 kg și o rază de acțiune de 580 mm prezentat cu specificațiile din manual în Figura 3(a), (b) [26].

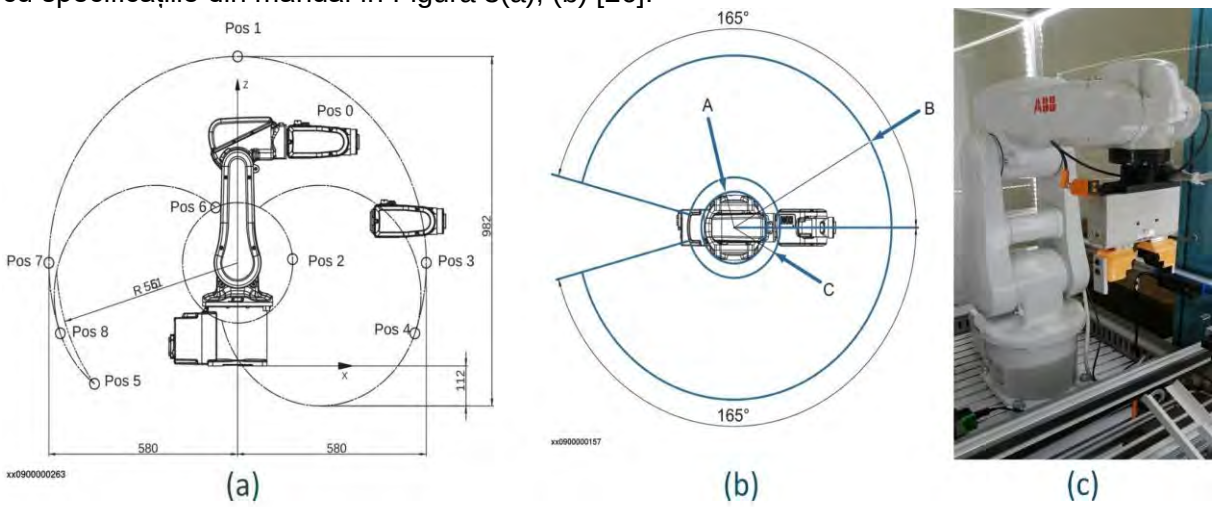


Figura 3. Raza de funcționare ABB IRM IRB 120 din fișa de specificații: (a) raza de acțiune, [27], (b) raza de acțiune în plan orizontal, [27] (c) 6-DoF ABB 120 IRM.

1.4. Caracterizarea sistemelor robotice cyber-fizice

Componentele robotice prezentate în subcapitolele anterioare, PeopleBot WMR, Cyton RM și ABB IRM, nu operează ca sisteme independente, ci sunt integrate într-o arhitectură unificată de tip CPRS. Înțelegerea conceptului CPRS și a variantelor sale, FCPRS și MCPRS, este esențială pentru contextualizarea rolului fiecărei componente în cadrul liniilor de producție mecatronice descrise în subcapitolele anterioare.

1. Conceptul CPRS. CPRS-urile reprezintă o clasă modernă în ingineria sistemelor, caracterizată prin integrarea strânsă dintre procesele fizice și dispozitive computaționale de conducere și comunicație. Aceste sisteme sunt proiectate pentru monitorizarea, analizarea și conducerea tehnologiilor din lumea reală prin intermediul unor mecanisme de feedback în timp real, utilizând diverși senzori și unități de procesare distribuite, [39].

2. Conceptul FCPRS. În cadrul CPRS-urilor, o categorie distinctă este prezentată de FCPRS-uri. Ele sunt caracterizate prin integrarea IRM-urilor și echipamentelor auxiliare într-o infrastructură staționară, destinată operațiilor de asamblare, procesare sau manipulare, [42]. Spre deosebire de MCPRS-uri, FCPRS-urile operează într-un spațiu de lucru bine definit, fiind integrat în linii de producție mecatronice sau celule robotizate. Aceste sisteme sunt optimizate pentru execuția repetitivă și precisă a taskurilor, beneficiază de condiții controlate de operare și stabilitate ridicată a configurației.

3. Conceptul MCPRS. . În cadrul CPRS-urilor, o categorie complementară sistemelor fixe este reprezentată de sistemele mobile, denumite MCPRS, care sunt caracterizate prin integrarea WMR, RM și sisteme de percepție într-o arhitectură unificată, destinată realizării

unor operații de manipulare, transport și interacțiune în medii dinamice, [AS.7], [43], [44]. Spre deosebire de stabilitatea staționară a FCPRS, MCPRS operează în spații de lucru dinamice, fiind capabile să se deplaseze între diferite zone ale sistemului de producție. Aceste sisteme sunt optimizate pentru flexibilitate și adaptabilitate, care permit executarea diverselor taskuri în condiții de operare oscilante.

1.8. Concluzii

În acest capitol au fost prezintate fundamentele hardware, software și modelare ale celor două CPRS-uri utilizate (FCPRS/MCPRS), structurate pe trei niveluri: componente robotice individuale, concepte arhitecturale CPRS și sisteme integrate de producție.. La nivelul arhitectural, se definește și caracterizează conceptele CPRS, FCPRS și MCPRS și direcțiile de dezvoltare orientate spre arhitecturi distribuite ROS2 și ecosisteme IoT-Cloud. La nivelul sistemelor integrate, se descriu FCPRS-ul, MPL-ul și MPS-ul, cu arhitecturile hardware, structurile de comunicație și protocoalele de sincronizare bidirecțională MODBUS TCP între PLC-ul master S7-1200 și MCPRS. Obiectivul principal îndeplinit în acest capitol este [OB.1], iar diseminarea rezultatelor s-a realizat în [AS.7], [AS.8] și [AW.6].

Capitolul 2.

Modelarea și conducerea VSCS în MCPRS-uri pentru linii mecatronice de producție

În acest capitol sunt prezentate sistemele servoing vizuale utilizate pentru conducerea vizuală a Cyton RM în cadrul MCPRS. Sunt introduse arhitecturile VSCS (PBVSC, IBVSC, Hibrid) cu legea de conducere proporțională. Se derivează modelul bazat pe momentele imaginii, cu matricea de interacțiune și proprietăți de invarianță, sunt prezentate implementările și validările experimentale ale FVSCS-ului și MVSCS-ului pe liniile de producție MPS și MPL, respectiv pe FCPRS. În ultima secțiune sunt sintetizate concluziile.

2.1. Sisteme servoing vizuale

1. Sisteme servoing vizuale. Sistemele servoing vizuale (VSCS) reprezintă o arie de cercetare avansată în conducerea roboților, definită prin utilizarea informației vizuale furnizată de unul sau mai mulți senzori vizuali pentru a închide bucla de reglare a mișcării unui sistem robotic, [3], [47], [48]**.** În cadrul A/D/R FCPRS, aceasta funcționează astfel:

- Începerea detecției componentelor și a cantității (numărul maxim fiind 3) printr-un index pentru fiecare componentă în parte (Figura 4);
- Dacă este detectată cel puțin o componentă (cu excepția cilindrilor, caz în care poate funcționa și cu doi cilindri din același material), se poate realiza o asamblare;
- Piesele și video--camerele sunt mereu în aceleași locații statice, traiectoriile pe care ABB IRM trebuie să le execute sunt predefinite pentru fiecare depozit în parte, singura modificare ce apare fiind dată de numărul de piese;
- Deși se pot introduce manual numărul de componente, este foarte importantă considerarea unor erori, cel mai des umane, spre exemplu dacă se scrie că sunt 2 componente când de fapt sunt 3. Această eroare ar duce la ignorarea unei componente, ceea ce ar rezulta într-o asamblare eronată, fără setările de siguranță ale IRM-ului ABB (când se detectează o presiune aplicată gripper-ului mai mare decât ar trebui, se oprește forțat automat) ar putea exista chiar daune fizice, prin defectarea gripper-ului.

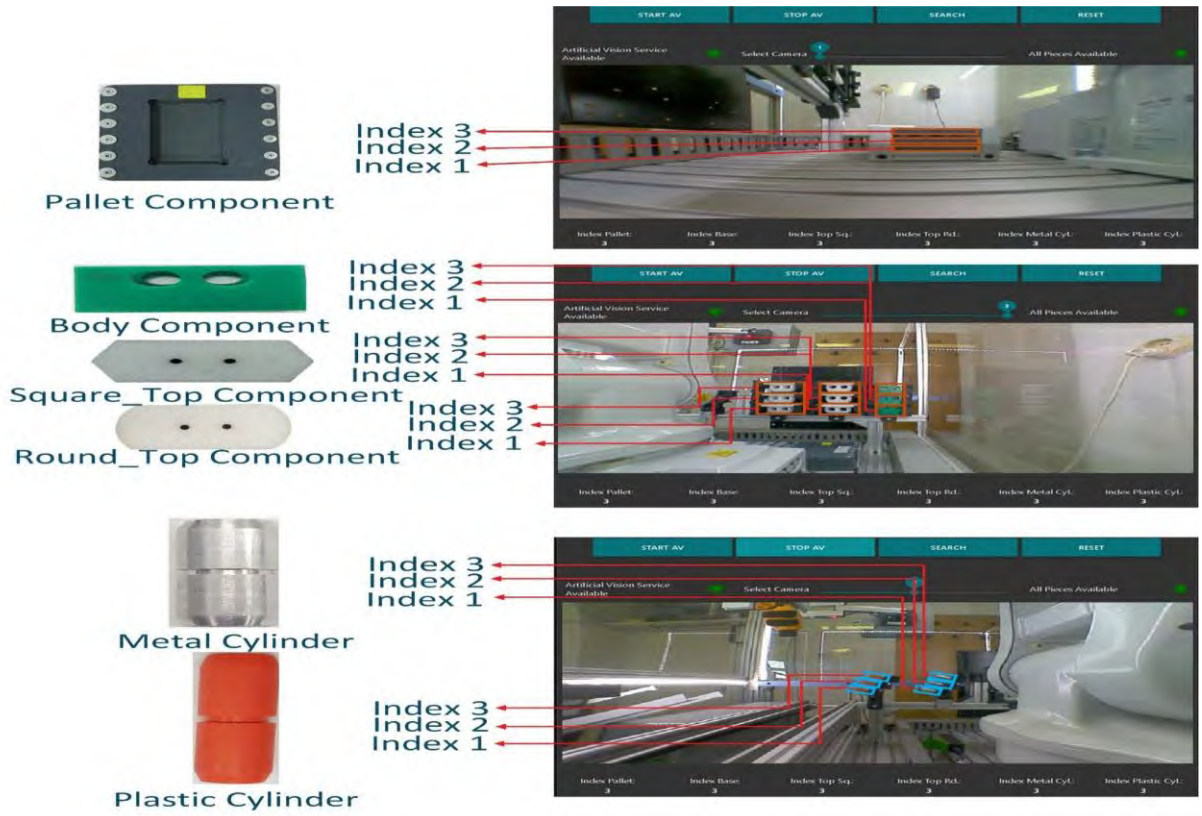


Figura 4. FCPRS, magaziile de depozitare componente, video-camerele IFM.

În contextul MCPRS-urilor care asistă FCPRS, MPL sau MPS, VSCS consideră un rol critic, asigurând precizia de poziționare necesară operațiilor de preluare și plasare a WP. Atât configurația EIH cât și ETH au fost utilizate, prezentate în Figura 5:



Figura 5. Configurațiile sistemelor servoing vizuale: (a) eye-to-hand, (b) eye-in-hand.

2. Arhitectura PBVSC. Arhitectura de tip PBVSC se bazează pe conducerea 3D, unde informațiile despre imagine sunt folosite la determinarea poziției țintei, luând în calcul poziția video-camerei. Eroarea dintre poziția actuală și cea dorită este definită în spațiul cartezian al RM-ului, [52]. Utilizând Figura 6 ca referință, eroarea e este rezultatul diferenței dintre trăsăturile dorite v_c^* și cele curente v_c, care este utilizat în regulatorul bazat pe poziție pentru calculul vitezei RM-ului. Primul task este realizarea și menținerea unei viteze constante între obiect și end-efectorul RM-ului, având nevoie doar de observarea evoluției țintei obiectului pentru secvența de servoing.

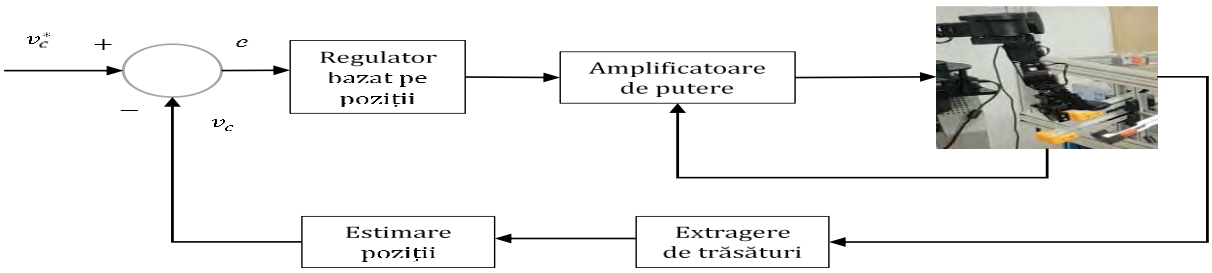


Figura 6. Bucla de conducere pentru arhitectura PBVSC.

3. Arhitectura IBVSC. Sistemele IBVSC utilizează informații din imagini 2D în conducerea RM-ului, strategia de conducere reprezintă o metodă de a minimiza eroarea dintre parametri extrași și cei de referință. Arhitectura IBVSC implică calcularea matricei jacobian sau matricea de interacțiune. În cazul acestei arhitecturi, eroarea este mapată direct în planul imaginii 2D, evitând necesitatea utilizării unui model 3D al WP-ului, [53]. Diagrama de funcționare este prezentată în Figura 7. Vectorul trăsăturilor de referință f^* este generat atunci când robotul este deplasat într-o poziție dorita, iar coordonatele pozițiilor din imagine sunt memorate. Estimarea matricei jacobian impune cunoașterea parametrilor intrinseci și extrinseci ai video-camerei, care reprezintă maparea rigidă dintre spațiul de lucru și cadrul video-camerei.

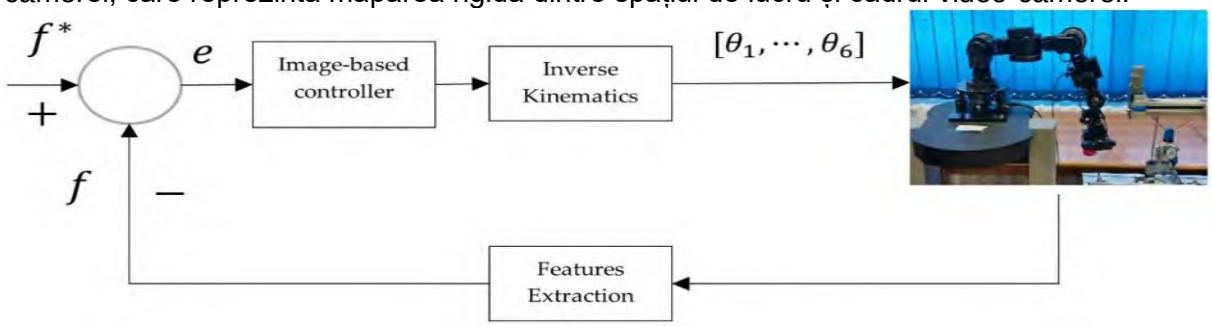


Figura 7. Bucla de conducere pentru arhitectura IBVSC.

4. Arhitectura Hibridă. O arhitectură hibridă, HVSC, a fost propusă pentru combinarea celor două arhitecturi PBVSC și IBVSC, considerând avantajele fiecăreia și compensând dezavantajele. În ambele VSCS, senzorul vizual folosit pentru extragerea informațiilor vizuale despre mediul de lucru poate fi configurat atât EIH, când mișcarea robotului induce și mișcarea video-camerei cât și ETH, unde este observat atât WP-ul, cât și mișcarea RM dintr-un punct fix. Arhitectura hibridă utilizează informații 3D ca și în cazul PBVSC pentru conducerea translației, în timp ce informațiile 2D din imagine ca în cazul IBVSC, sunt folosite pentru conducerea orientării. Această separare asigură o traiectorie condusă în spațiu cartezian și robustețe față de erorile de calibrare a video-camerei, [55].

Metodele hibride au fost concepute pentru eliminarea limitărilor arhitecturii PBVSC din punct de vedere al robusteții și a descrierii modelelor necesare implementării fizice, în special în cazul unui DT. În cadrul MCPRS utilizat pe P/R/S MPS, au fost implementate ambele configurații EIH montat pe Cyton RM, și ETH montate pe ultima WS. Această abordare combină avantajele ambelor arhitecturi, ce permite atât urmărirea robustă pentru WP cu IBVSC cât și navigarea precisă a MCPRS în spațiul de lucru cu PBVSC.

2.2. Concluzii

Capitolul 2 a prezentat arhitectura, implementarea și validarea experimentală a VSCS-uri integrate în MCPRS pentru asistarea a două linii mecatronice complementare: P/R/S MPS și A/D/R MPL. A fost stabilit fundamentul teoretic al VSCS prin prezentarea celor trei arhitecturi de conducere vizuală, PBVSC, IBVSC și Hibridă, și prin derivarea legii de conducere proporționale bazate pe momentele imaginii.

Vectorul de trăsături vizuale f_m , definit prin momentele brute $m_{i,j}$ și momentele centrate $\mu_{i,j}$, a fost ales datorită invarianței la translație, rotație și scalare, și a stabilității numerice superioare a matricei de interacțiune L_{f_m} față de trăsăturile punctiforme clasice.

Extracția acestor momente necesită o prelucrare preliminară a imaginilor, implementată prin conversia RGB la HSV pentru segmentare bazată pe culoare, detecție contur Canny Edge, și aproximare poligonală Ramer-Douglas-Peucker pentru reducerea complexității computaționale la 30 fps. Punctul de plecare al cercetării l-a constituit analiza sistemului FVSCS bazat pe video-camere fixe ETH, cu lege de conducere proporțională și jacobian de dimensiune 6×5.

Limitările identificate, necesitatea calibrării precise a video-camerelor fixe și rata de procesare redusă la 15 fps, au motivat dezvoltarea sistemului MVSCS propus în cadrul tezei. MVSCS EIH, implementat pe Cyton RM cu 7 DoF, a eliminat dependența de video-camerele fixe externe prin montarea senzorului vizual direct pe end-efectorul manipulatorului.

Legea de conducere proporțională, cu pseudo-inversa jacobianului J_r^+ de dimensiune 6×7, a fost aplicată în buclă închisă la 30 fps, cu comunicație prin memorie partajată.

Validarea experimentală în timp real a demonstrat că:

- Pe P/R/S MPS: precizia finală este sub 10 mm la preluare și sub 5 mm la plasare;
- Pe A/D/R MPL: preluarea și plasarea autonomă a cilindrilor de pe toboganele de evacuare ale A/D/R FCPRS, cu deviații de ±5-8 mm;

Obiectivul principal atins în acest capitol este OB.2, iar diseminarea rezultatelor s-a realizat în [AS.2], [AS.5], [AS.10], [AW.4] și [AW.5

Capitolul 3

Conducerea IoT-Cloud pentru FCPRS cu Digital Twin și abordare Industrie 4.0/5.0

Capitolul prezintă arhitectura completă a sistemului robotic cyber-fizic fix A/D/R FCPRS pentru asamblarea, dezasamblarea și înlocuirea componentelor utilizând ABB IRM. Este detaliată infrastructura hardware pe cinci niveluri ierarhice (proces fizic, conducere locală, supraveghere distribuită, coordonare inteligentă, management cloud), este prezentată componenta virtuală Digital Twin, arhitectura de comunicație IoT-Cloud și sunt documentate interfețele de monitorizare și conducere (HMI local/la distanță, SCADA Node-RED). În ultima secțiune sunt sintetizate concluziile.

3.1. Structura hardware A/D/R FCPRS

1 Componente Hardware IoT Edge și Rețealistică LAN/WAN. Dispozitivele IoT edge ale FCPRS-ului sunt conectate în rețeaua locală (LAN), fiecare cu adresă IP unică și rol funcțional specific în Figura 8:

- Router Wi-Fi TP-Link Archer: (192.168.0.10) (1) - management rețea locală, gateway WAN, server DHCP;
- Siemens CM 1242-5 (2.1): Modul de comunicație utilizat pentru conexiunea dintre PLC Siemens S7-1214C și PROFIBUS DP pentru A/D ML;
- PLC Siemens S7-1214C DC (2.2): unitate centrală de conducere, interfață SCADA, comunicare PROFINET;
- Switch SIMATIC XB005 (2.3) interconectare dispozitive la nivelul de control (5 porturi):
  - P1: SINAMICS V90 (driver banda transportoare);
  - P2: HMI Display local A/D/R (192.168.0.11);
  - P3: HMI KTP 700 (192.168.0.4);
  - P4: ABB IRC5C Controller (192.168.125.1 - service, 192.168.0.3 - I/O interface);
  - P5: TP-Link Archer Router;
- NVIDIA Jetson Nano (3): calculator încorporat cu server VNC pentru conexiune la distanță, acces la toate dispozitivele, browser web pentru interfața Node-RED, mediu Docker cu imagini pentru management camere IFM și developare;
- ABB Touch Pendant (192.168.0.3) (4A): interfață operare manuală robot, sincronizare cu HMI;
- ABB IRC5C Controler (192.168.0.2) (4B): conducere robot industrial IRM ABB, programare în Robot Studio, comunicare cu PLC pentru procese A/D/R;

- IRM ABB (192.168.125.1) (4C) – execută operațiile configurate pe HMI SCADA, schimbă date cu PLC-ul prin PROFINET, programat în RobotStudio; server VNC pe Teach Pendant pentru acces și programare la distanță;
- VPU OVP 800 (192.168.0.69) (5): gestionează 3 camere IFM O3R, algoritmul detecției pieselor, server WebSocket pentru Node-RED și ROS2 Humble;
- Camere 3D IFM O3R (3 unități):
  - Port 1 (OVP800): detecție depozit baze W1;
  - Port 2 și 4 (OVP800): detecție cilindri metalic și plastic W4, W5;
  - Port 3 și 5 (OVP800): detecție corpuri și capace W2, $W3_{Rd}$, $W3_{Sq}$;
- HMI KTP 700 (192.168.0.4) (6): interfață locală de conducere a FCPRS, schimb date cu PLC-ul, afișare status operații A/D/R în timp real, programat în TIA Portal V17;
- IoT2050 (192.168.0.102) (7): sistem SCADA la distanță, schimbă date cu PLC-ul master, transmite fluxuri video de la camerele IFM, stochează date energetice, poate replica interfețele KTP 700; adresă IP dedicată în LAN-Ethernet;
- SIEMENS SINAMICS V90 (8): unitate de conducere a benzii transportoare, schimbă date cu PLC-ul master, condus prin driver-ul atașat la P1 al XB005;
- Display local A/D/R (192.168.0.11) (9): utilizat pentru vizualizarea în timp real a datelor de pe FCPRS.

Topologia rețelei este structurată pe trei niveluri de comunicare:

- LAN-PROFINET (culoare roșu în diagrame): conectează PLC-ul SIEMENS S7-1214C la modulul de comunicație SIMATIC CM 1242-5 pentru protocol PROFIBUS DP slave;
- LAN-Ethernet (culoare verde): interconectează dispozitivele de control și monitorizare locală (HMI, ABB Controller, OVP800, SINAMICS V90) prin switch-ul SCALANCE XB005;
- WAN-Ethernet (culoare verde): asigură conectivitatea la Internet prin routerul TP-Link Archer.

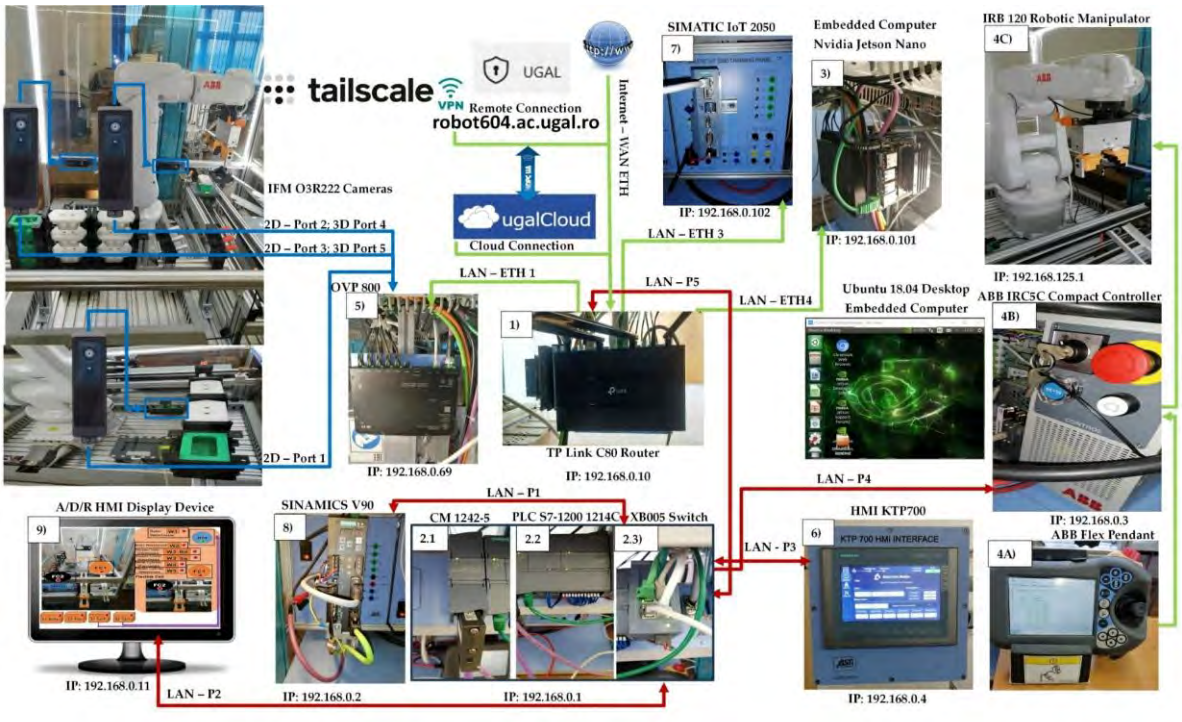


Figura 8. Dispozitivele IoT-Edge și topologia de comunicație LAN/WAN.

3.2. Arhitectura de conducere și monitorizare IoT-Cloud pentru A/D/R FCPRS

1 Fluxul Node-RED pentru achiziția și prelucrara de imagini cu camere IFM. Fluxul Node-RED elaborat în Figura 9(a) vizualizează depozitele cu componente actualizând numărul componentelor din fiecare depozit după efectuarea manipulării componentelor de către IRM ABB, prin procesarea imaginilor în dispozitivul OVP800. Imaginile captate de camerele IFM O3R și procesate în VPU permit identificarea:

- Depozitului W1 cu baze Figura 9 (b1);
- Depozitelor W4 (cilindri metalici) și W5 (cilindri plastici) - vizualizate simultan Figura 9(b2);
- Depozitelor W2 (corpuri), W3_Sq (capace pătrate Top_sq) și W3_Rd (capace rotunde Top_rd) - vizualizate în aceeași imagine Figura 9(b3).

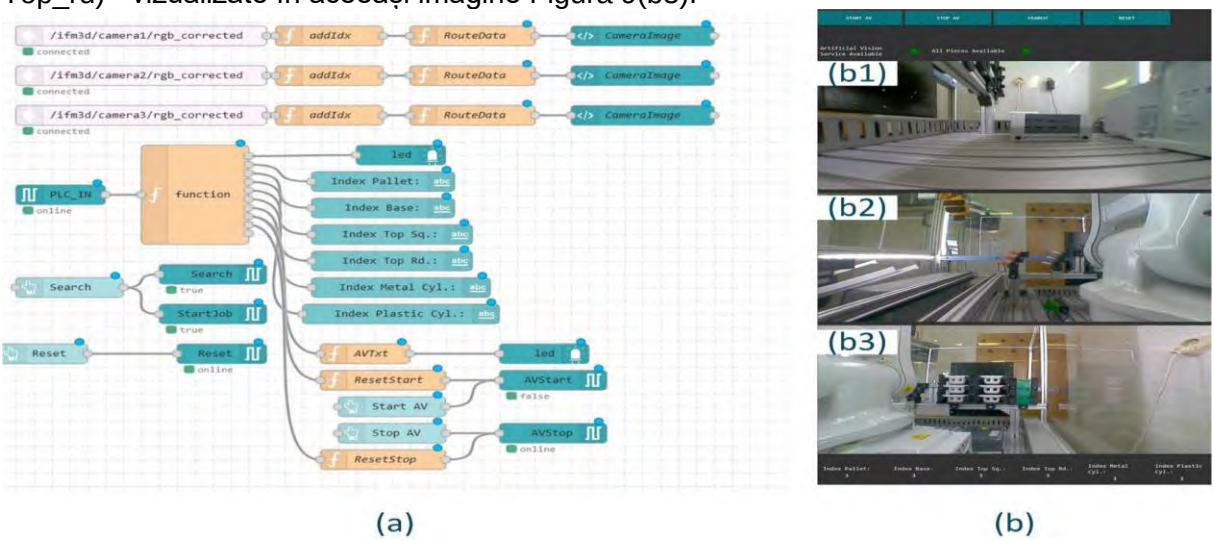


Figura 9. (a) Fluxul în Node-RED pentru achiziția de date și (b) afișarea imaginilor de la video-camerele pentru, (b1) baze, (b2) cilindri metalici și de plastic, (b3) corpuri, capace cu margini triunghiulare și rotunde.

2 Stocarea și analiza datelor electrice cu IoT2050. Prin dispozitivul de comunicație specializat IoT2050, se achiziționează date electrice instantanee și pe interval temporal (curent, tensiune, putere activă) de la senzori montați pe:

- alimentarea principală a celulei (AC 230V/16A);
- motoarele IRM ABB (6 axe servo);
- motorul benzii transportoare (SINAMICS V90);
- alimentarea PLC și perifericele 24VDC.

Notă practică privind comunicația wireless: întrucât comunicația este wireless, viteza poate să nu fie optimă, provocând înghețarea ferestrei VNC. Din acest motiv, pentru creșterea vitezei de comunicație, se recomandă conectarea prin cablu Ethernet la switch-ul Siemens Simatic SCALANCE XB005, pe ultimul port disponibil, LAN P2, cu setarea unei adrese IP statice pe PC-ul local.

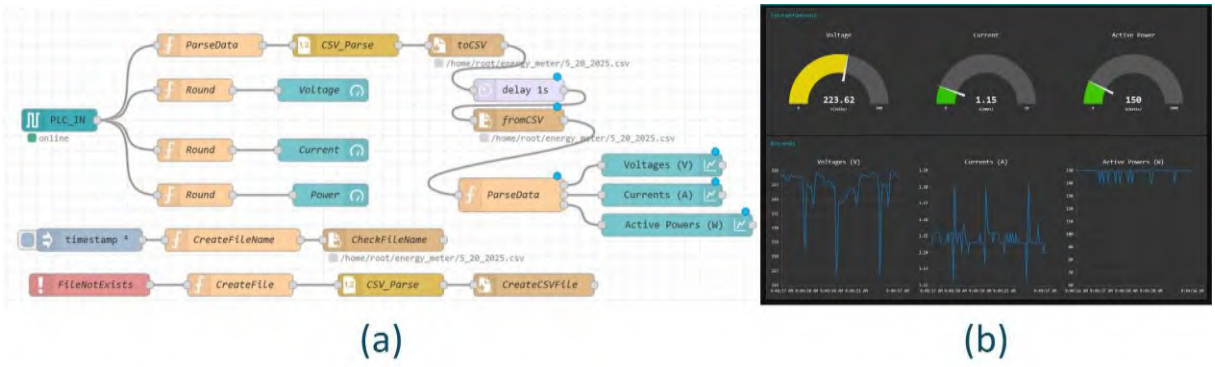


Figura 10. (a) Fluxul în Node-RED pentru memorarea și (b) afișarea mărimilor electrice(curent, tensiune, putere) și valori instantanee și pe orizont de timp.

Datele electrice achiziționate din sistemul robotic includ:

- Consumul de putere: din motoarele articulațiilor IRM ABB și motorul benzii transportoare;
- Curentul motor: monitorizat în timp real pentru detecție anomalii și uzură mecanică;
- Nivelurile de tensiune: din driverele articulațiilor, utile pentru diagnosticare;
- Date achiziționate în timp: serii temporale stocate în MongoDB 8.0 pentru analiză trend și antrenarea algoritmilor de mentenanță predictivă.

Acestea sunt salvate în IOT2050 ca fișiere CSV și pot fi vizualizate prin WinSCP în Figura 11.

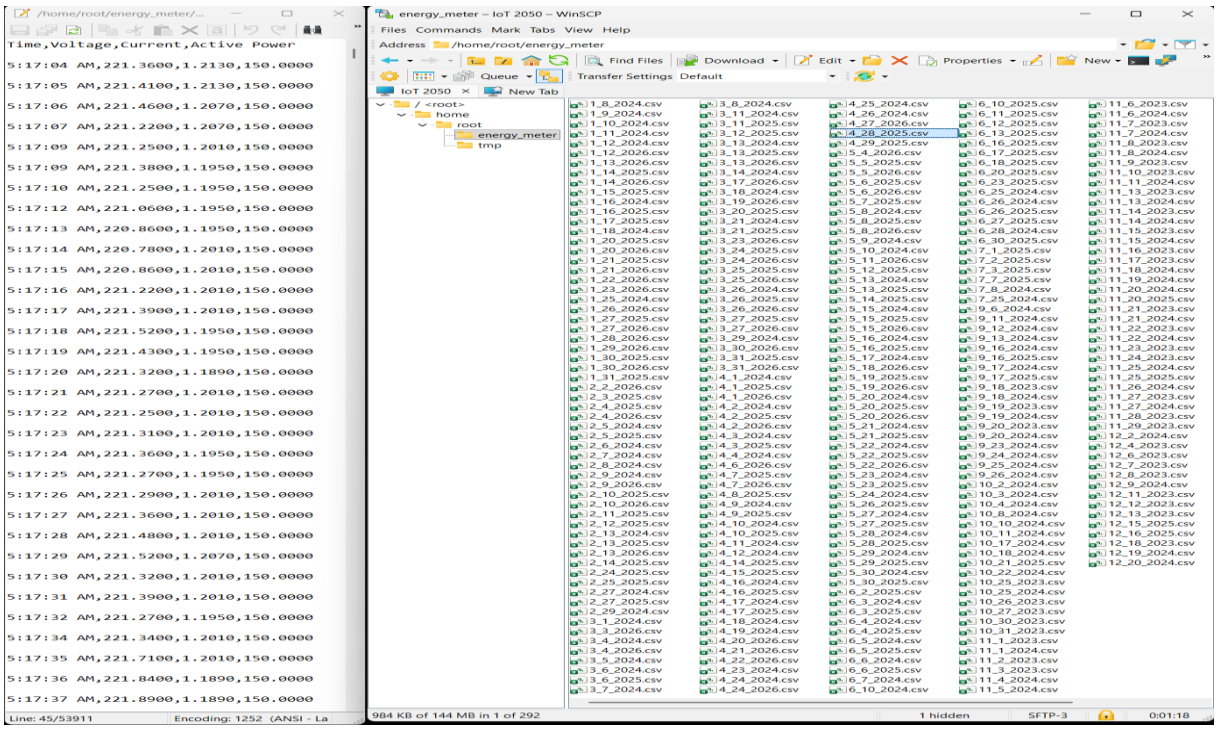


Figura 11. Achiziția de date în format CSV (stânga) și salvarea datelor în fișiere CSV în WinSCP (dreapta).

3.3. Concluzii

Acest Capitol a prezentat arhitectura completă a A/D/R FCPRS pentru asamblarea, dezasamblarea și înlocuirea cilindrilor utilizând ABB IRM, structurată pe cinci niveluri ierarhice, care reflectă principiile CPRS industriale moderne și asigură separarea clară a responsabilităților între subsisteme. Arhitectura organizează componentele hardware și software în niveluri funcționale distincte:

- Nivelul 1 (procesul fizic) cuprinde ABB IRM cu controlerul IRC5C și sistemul de transport pe bandă Siemens SINAMICS V90;
- Nivelul 2 (conducerea locală) integrează PLC-ul Siemens S7-1214C ca master și interfața operator HMI SIMATIC KTP 700 pentru conducere locală;
- Nivelul 3 (monitorizare distribuită) implementează sistemul SCADA Node-RED pe platforma IoT2050 cu interfață web pentru monitorizare în timp real a parametrilor PLC-ului, stării robotului și video de la video-camerele IFM;
- Nivelul 4 (coordonarea inteligentă) utilizează Nvidia Jetson Nano cu ROS2 Humble pentru sincronizare prin topic-uri MQTT și servicii ROS2, precum și VPU OVP 800 pentru procesare vizuală avansată;
- Nivelul 5 (managementul cloud) asigură arhivarea datelor de producție în stocarea cloud și integrarea cu platforma OwnCloud instituțională files.ugal.ro. Această stratificare permite modularitatea, depanarea simplificată, și scalabilitatea prin adăugarea componentelor pe niveluri existente fără reconfigurarea completă a sistemului. Componenta virtuală a A/D/R FCPRS implementează conceptul DT la trei niveluri complementare:
    - DT Online prin Siemens NX Mechatronics Concept Designer cu sincronizare în timp real OPC-UA între PLC și modelul virtual pentru Virtual Commissioning, permițând testarea programelor PLC pe replica digitală înainte de executare pe hardware fizic și reducând riscul coliziunilor sau comportament nedorit;
    - DT Offline prin funcționalitatea Siemens NX Replay pentru analiză post-execuție a traiectoriilor robotului prin importarea log-urilor pozițiilor articulațiilor, utilizat pentru detecția coliziunilor, optimizarea timpilor de ciclu și identificarea cauzelor incidentelor;
    - DT Extended Reality prin interfețe Node-RED AR/VR pentru vizualizarea parametrilor SCADA în Realitate Augmentată și modelare comportament discret-continuu prin STPN în VR.
    - Obiectivele principale atinse în acest capitol sunt OB.2 și OB.4. Diseminarea rezultatelor s-a realizat în [AS.4], [AS.6], [AS.7], [AW.1], [AW.2], [AW.3], [AP.2] și [AP.3].

Capitolul 4

Conducerea IoT-Cloud și abordare DT pentru P/R/S MPS deservit de MCPRS

Acest capitol extinde arhitectura P/R/S MPS prin asistența MCPRS, unde provocările de comunicație wireless, autonomia de navigare și sincronizarea WMR-RM introduc elemente de complexitate suplimentare față de FCPRS-ul din capitolul anterior. Sunt prezentate arhitectura hardware P/R/S MPS cu infrastructura de comunicație și conducere distribuită, formalizarea ipotezelor operaționale; dezvoltarea componentei virtuale Digital Twin prin modele SHPN simulate în Sirphyco și implementate în Node-RED, descrierea componentei reale, SCADA, buclele de conducere și sincronizarea în timp real. Sunt discutate considerațiile Industriei 4.0/5.0, HMI-ul și securitate cibernetică, iar în ultima secțiune sunt sintetizate concluziile specifice capitolului.

4.1. Arhitectura hardware P/R/S MPS deservit de MCPRS

1. Dispozitivele IoT Edge, rețelele de comunicație și funcționalitățile lor. În Figura 12 sunt prezentate dispozitivele conectate la PROFIBUS și rețelele locale (LAN PROFINET și Ethernet), fiecare dispozitiv având propria adresă IP unică. Fiecare WS din MPS este condusă de un PLC dedicat Siemens S7-300, care funcționează ca PLC slave, cu rolul de a fi responsabil pentru operațiunile din WS respectivă, de a comunica cu PLC-ul master prin PROFIBUS, facilitând conducerea sincronizată în timp real a taskurilor individuale ale stațiilor, și de a trimite statusul, actualizările și finalizarea taskurilor către PLC-ul master, permițând luarea deciziilor centralizate.Principalele dispozitive și funcționalitățile lor în cadrul arhitecturii sistemului sunt:

- (1) Router-ul Wi-Fi are rolul de a gestiona rețeaua Wi-Fi, asigurând conectivitatea LAN Profinet, LAN Ethernet și WAN Ethernet la cloud UGAL files prin Internet;
- (2.1) Modulul de comunicații SIMATIC CM 1242-5, atașat la PLC S7-1214, este utilizat pentru conectarea PLC-urilor SIMATIC S7-300 la Profibus (modul slave DP);
- (2.2) Siemens PLC 1214C DC, ca unitate principală de conducere a masterului și HMI, permite tuturor celorlalte dispozitive să comunice cu acesta și gestionează toate semnalele (de la senzori sau din comunicații) și variabilele interne utilizate de sistemul SCADA local și la distanță;
- (2.3) Adaptorul de comunicație XB005 Switch, atașat la PLC S7-1214, este utilizat pentru conectarea prin LAN PROFINET a dispozitivelor la porturile digitale
- (3) Calculatorul integrat NVIDIA Jetson Nano are un server VNC, iar VNC Viewer este activat pentru conexiunea la distanță. Jetson Nano are acces la toate celelalte dispozitive și la browserele web pentru interfața Node-RED;
- (4) SIEMENS IoT2050 este utilizat ca sistem SCADA la distanță pentru a trimite/recepționa date de la/la PLC;
- (5.1) Dispozitivul de afișare HMI local SCADA MPS-MCPRS monitorizează și conduce MCPRS și interacțiunea sa cu stațiile de lucru MPS, precum și WS4 și WS1 prin semnale de sincronizare;
- (5.2) Dispozitivul de afișare HMI local SCADA MPS-MPS monitorizează și conduce stațiile de lucru MPS și interacțiunea lor cu MCPRS, în special cu WS4 și WS1 prin semnale de sincronizare;
- (6) PLC-uri slave dedicate SIEMENS S7-300, câte unul pentru fiecare WS;
- (7) MCPRS, utilizat în asistarea MPS prin preluarea, manipularea, transportarea și deplasarea WP de pe WS4 la WS1.

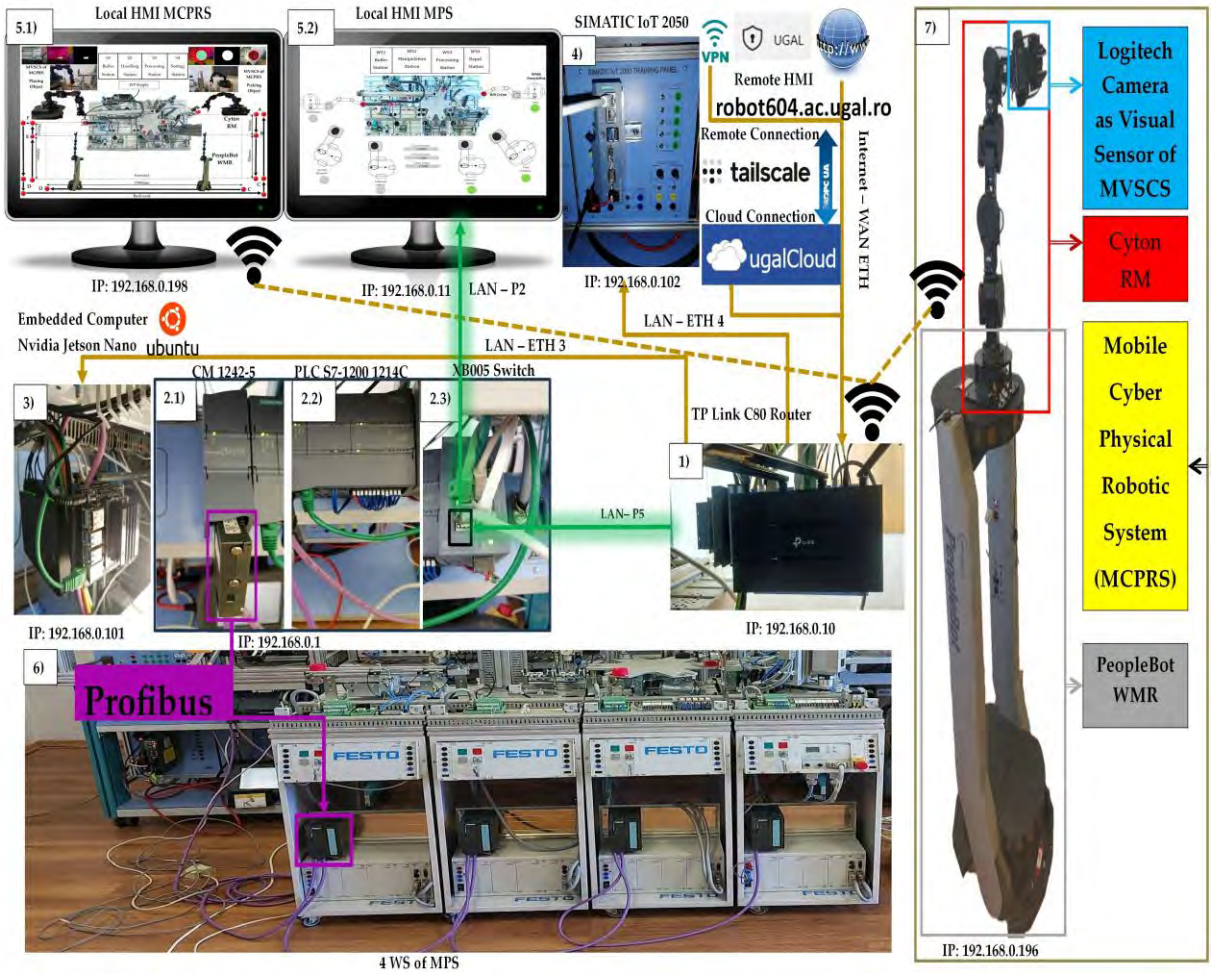


Figura 12. Dispozitivele IoT care utilizează conexiunile PROFIBUS DP, PROFINET și LAN/WAN Ethernet.

4.2. Componenta reală pentru tehnologiile P/R/S ale produselor pe MPS asistat de MCPRS-uri

1 Conducerea în timp real al MCPRS-ului. Sistemul de conducere pentru MCPRS utilizează trei bucle de conducere ierarhice care asigură funcționarea eficientă a componentelor sale cheie: WMR PeopleBot, RM Cyton și MVSCS. Aceste bucle coordonează sarcini precum transportul, manipularea și ghidarea vizuală în timp real printr-o combinație de interacțiuni locale și la distanță cu tablourile de bord PC-HMI și sistemul SCADA.

- A) Prima buclă de conducere (PeopleBot WMR) conduce traiectoria WMR PeopleBot pentru mișcare înainte și înapoi între WS4 și WS1. Metoda de conducere este DT-TTSMC. Comunicarea utilizează biblioteca ARIA Mobile Robots pentru executarea comenzilor, care comunică wireless cu PC-HMI la distanță sau local prin sistemul SCADA;
- B) A doua buclă de conducere (sincronizarea comenzilor Cyton RM și PLC) gestionează sincronizarea comenzilor dintre PLC-ul Master Siemens S7-1200 și RM Cyton. Metoda de conducere este IK, iar comunicarea utilizează standardul USB, comunicând stabil prin fir. Comenzile sunt transmise wireless între PC-HMI-MCPRS și Cyton RM;
- C) A treia buclă de conducere (MVSCS pentru precizia efectorului) conduce mișcarea MVSCS pentru a îmbunătăți precizia sarcinilor de preluare și plasare efectuate de efectorii manipulatorului Cyton RM. Metoda de conducere este metoda momentelor imaginii care procesează datele de imagine în timp real pentru a ghida efectorul în poziționare precisă. Această conducere utilizează comunicarea wireless între PC-HMI-MCPRS și MVSCS, bazată pe evenimente transmise în timp real pentru ajustarea poziției dinamice.

Rolul de coordonare dintre SCADA HMI-MCPRS constă în funcționarea PC-HMI-MCPRS ca un server SCADA pentru a sincroniza datele din toate cele trei bucle de conducere, pentru a se coordona între WMR PeopleBot, RM Cyton și MVSCS și pentru a transmite comenzi wireless către PLC-urile Siemens slave ale MPS pentru integrarea cu activitățile WS. SCADA

extinde monitorizarea și conducerea la distanță prin conexiuni VPN bazate pe Tailscale și cloud, facilitând luarea deciziilor în timp real și sarcini de supraveghere. Integrarea cyber-fizică a MCPRS constă într-o combinație între elemente fizice, WMR, RM, MVSCS și procese de calcul, SCADA, HMI-uri și comunicare wireless. Caracteristicile de tip IoT au în comun o arhitectură IoT de bază, cu o interfață între straturile de calcul și cele fizice și valorifică feedback-ul în timp real de la sistemele integrate pentru conducere adaptivă. Avantajele acestei arhitecturi de conducere în timp real includ următoarele:

- Precizia oferită de DT-TTSMC asigură urmărirea precisă a traiectoriei și o funcționare lină;
- Flexibilitate datorită comunicării wireless și a buclelor de conducere modulare ce permite ajustări rapide la fluxurile de lucru dinamice;
- Scalabilitate prin integrarea protocoalelor SCADA și IoT permite integrarea unor sisteme mai complexe.
- Monitorizarea ușor de utilizat prin HMI-MCPRS ce oferă interfețe intuitive pentru utilizatorii locali și la distanță, pentru a monitoriza și conduce eficient operațiunile sistemului.

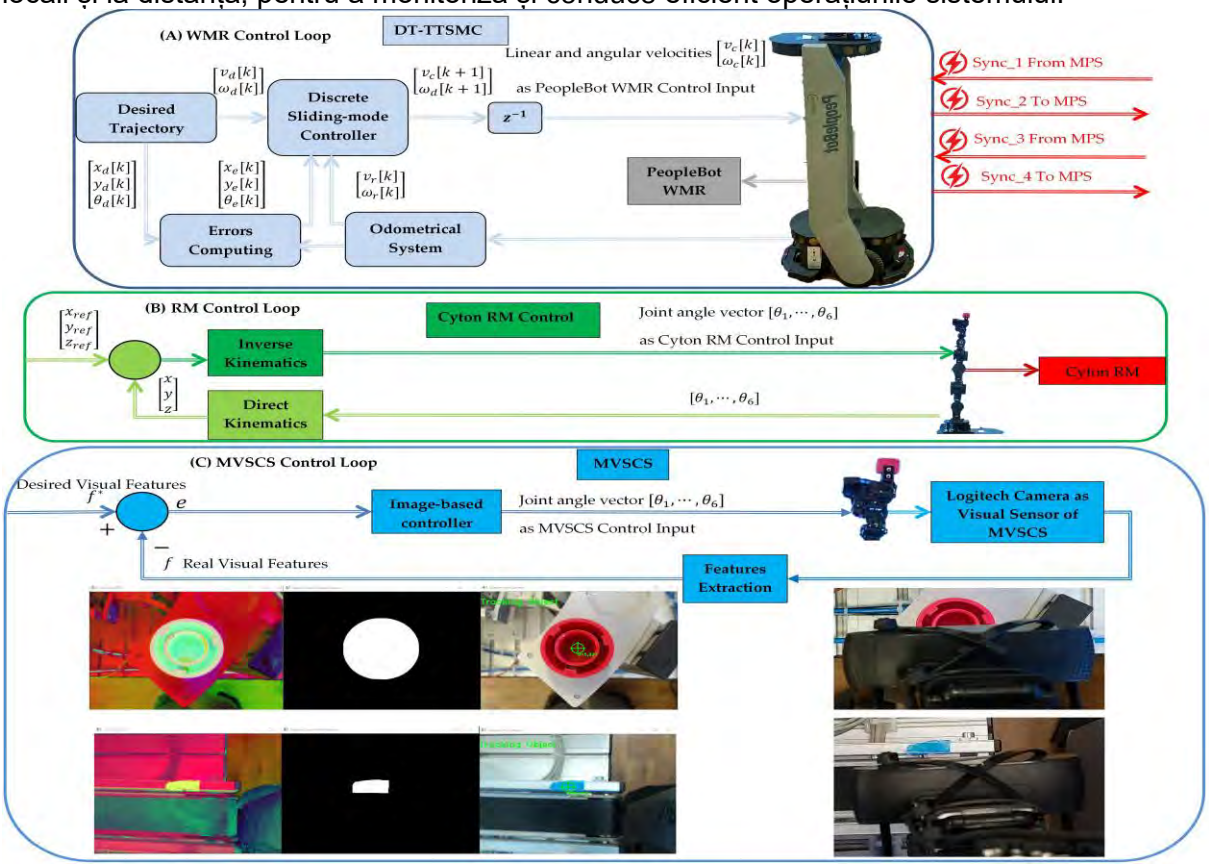


Figura 13. Arhitectura de conducere a MCPRS: (a) PeopleBot WMR, (b) Cyton RM, (c) MVSCS.

Arhitectura de conducere în timp real prezentată în această secțiune a evoluat semnificativ față de sistemele predecesoare. Secțiunea următoare documentează această evoluție prin compararea experimentală a arhitecturii FVSCS cu camere fixe și MVSCS eye-in-hand, cuantificând avantajele sistemului implementat în cadrul acestei teze.

4.3. Concluzii

Acest capitol a prezentat o arhitectură complexă pentru conducerea IoT-Cloud a unui MPS asistat de MCPRS. Abordarea propusă integrează componente hardware cu componente software avansate (modele SHPN pentru planificare și sincronizare, replică digitală virtuală, sisteme SCADA pentru monitorizare în timp real). Arhitectura propusă se distinge prin structura pe mai multe niveluri: nivel fizic, nivel de comunicație, nivel de conducere, nivel de supraveghere , nivel și nivel cloud. Principalele contribuții științifice originale ale acestui capitol includ:

- Arhitectura IoT-Cloud multinivel pentru conducerea MPS asistat de MCPRS: Integrarea într-o arhitectură coerentă a componentelor fizice (MPS, MCPRS, WMR, VSCS), virtuale

(SHPN, DT) și cloud (monitorizare la distanță, analiză big data) pentru procesare, reprocesare și rejectare inteligentă a produselor. Arhitectura propusă permite trecerea ușoară între operare automată, semi-automată și teleoperare, adaptându-se la diferite scenarii industriale și educaționale;

- Metodologia SHPN pentru modelare, validare și sincronizare a operațiilor P/R/S: Utilizarea SHPN pentru modelarea formală a întregului flux de lucru P/R/S, incluzând decizii probabilistice (șanse de rejectare/reprocesare bazate pe date istorice), comportament hibrid (comutări între moduri discrete de operare și dinamici continue de deplasare WMR) și sincronizare multi-agent (coordonare WMR-MPS mediată de cloud). Modelele SHPN permit analiza și optimizarea offline a performanței sistemului înainte de implementarea fizică, reducând riscurile și costurile;
- Protocol de sincronizare MCPRS-MPS bazat pe semnale SCADA și comunicație Ethernet: Dezvoltarea unui protocol robust de sincronizare între PLC-urile slave al MPS și controlerul MCPRS prin semnale digitale bidirecționale transmise prin interfața SCADA. Protocolul asigură operare în siguranță (evitarea coliziunilor, detecția blocajelor) și eficientă (minimizarea timpilor de așteptare) chiar și în condiții de latență variabilă în rețeaua Ethernet;
- Principii de design HMI pentru sistemele Industrie 4.0/5.0 cu integrare AR și interfață bazată pe voce: Formularea unui set complet de principii de design pentru interfețele om-mașină în contextul industrial modern, incluzând: codare semantică a culorilor (albastru=mișcare, verde=normal, galben=avertizare, roșu=alarmă) cu suport pentru deficiențe cromatice, butoane tactile mari pentru panouri industriale touch, comenzi vocale activate prin cuvinte cheie pentru operatori ocupați manual, AR pe MVSCS pentru ghidare vizuală îmbunătățită și arhitectură HMI dual (HMI-MPS pentru stații fixe, HMI-MCPRS pentru MCPRS) cu vizualizări 3D sincronizate;
- Platformă educațională pentru Industria 4.0 bazată pe Digital Twin și simulare SHPN: Demonstrarea utilizării platformei MPS-MCPRS ca instrument educațional pentru pregătirea studenților și a inginerilor în competențele Industriei 4.0/5.0. Studenții pot construi și simula propriile modele SHPN pentru scenarii P/R/S modificate, pot experimenta cu strategii alternative de planificare și pot compara performanța virtuală cu cea reală, dezvoltând astfel abilități de gândire sistemică și de proiectare. Arhitectura și metodologia prezentate în acest capitol au aplicabilitate largă în multiple domenii industriale și educaționale
- Industria prelucrătoare și asamblare: MPS cu capacități de reprocesare și rejectare inteligentă sunt esențiale în fabricile moderne care urmăresc obiective de calitate și pierderi diminuate. Capacitatea de a detecta automat produsele defecte, de a decide pe bază de criterii programabile dacă sunt recuperabile prin reprocesare și de a executa transportul automat către stațiile corespunzătoare reduce semnificativ costurile cu deșeurile și crește rata de producție conformă.
- Educație și formare profesională în Industria 4.0/5.0: Platforma MPS-MCPRS servește ca laborator complet pentru predarea conceptelor avansate de CPRS, IIoT, conducere cloud și colaborare om-robot. Studenții pot experimenta cu toate straturile tehnologice (de la programarea PLC la modelarea SHPN la dezvoltarea HMI) și pot înțelege provocările reale ale integrării acestor tehnologii. Capacitățile de simulare virtuală și teleoperare permit scenarii de învățare la distanță.

Obiectivele principale atinse ale acestui capitol sunt OB.2, OB.3 și OB.6. Diseminarea rezultatelor s-a realizat în [AS.1], [AS.2], [AS.9], [AS.10] și [AP.1].

Capitolul 5

Conducerea IoT-Cloud pentru A/D/R MPL asistată de CPRS-uri duale

Acest capitol extinde substanțial complexitatea liniilor mecatronice de producție prin introducerea sistemului A/D/R MPL, o arhitectură CPRS dual care integrează simultan componenta fixă A/D/R FCPRS și componenta mobilă MCPRS pe o linie de producție cu șapte stații (WS1-WS7), adăugând logica de calitate bun/defect/reparabil pentru trei tipuri de piese (WP1, WP2, WPX) și sincronizarea distribuită prin PROFIBUS DP între PLC master și șase

PLC-uri slave, demonstrând scalabilitatea arhitecturii IoT-Cloud și a formalismului SHPN de la un sistem modular singular la o linie de producție mecatronică completă, [AS.3], [AS.8].

5.1. Arhitectura hardware A/D/R MPL asistată de CPRS-uri duale

1 Infrastructura edge computing și comunicație. Pentru a susține integrarea cyber-fizică și operarea/monitorizarea la distanță, sistemul utilizează componentele deja existente în A/D/R FCPRS, extinzând capabilitățile pe A/D ML printr-o conexiune Profibus de la PLC-ul master S7-1200 la primul PLC slave S7-300 de pe WS1, Așadar, plecând de la A/D/R FCPRS, s-a făcut extensia în Figura 14 cu A/D ML ce conține 6 PLC-uri slave S7-300, cel principal fiind cel de pe WS4 unde se află și QT, iar ultimul PLC se ocupă atât de WS6 cât și de WS7 unde este plasat și HMI-ul TP177. Asistarea cu MCPRS se face în cazul operațiilor de dezasamblare și reparare.

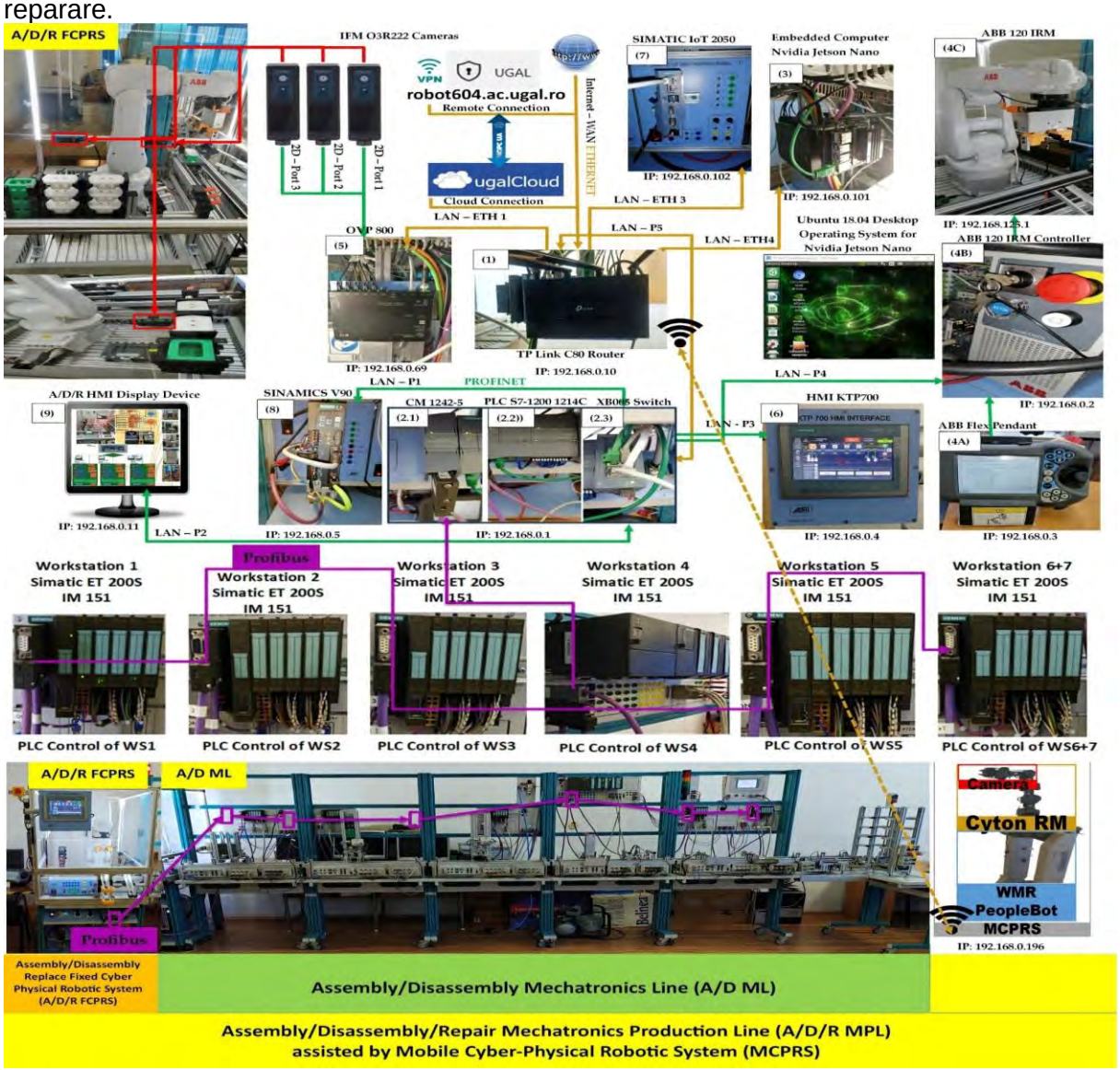


Figura 14. Infrastructura de comunicație și calculul de frontieră (edge-computing).

Această arhitectură stratificată, prezentată în Figura 15, asigură integrarea scalabilă a componentelor de automatizare industrială cu serviciile FCPRS și bazate pe cloud, permițând funcționalități avansate precum monitorizarea la distanță, sincronizarea DT și managementul inteligent al producției.

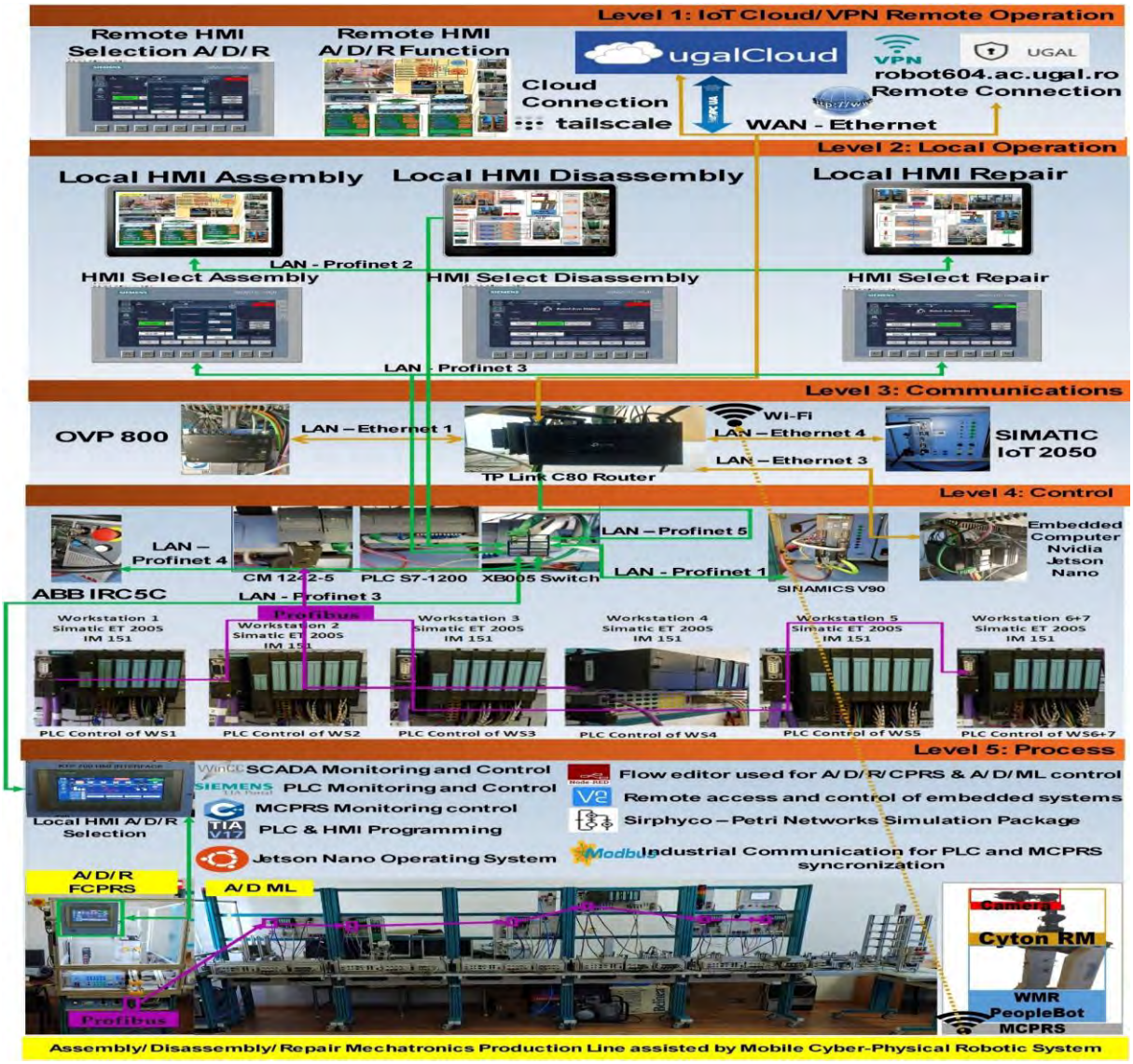


Figura 15. A/D/R MPL asistată de MCPRS, arhitectura globală de monitorizare și conducere.

5.2. Concluzii

Acest capitol reprezintă cea mai complexă contribuție a tezei, prezentând şi validând arhitectura CPRS dual a liniei de producție mecatronice A/D/R MPL, care integrează simultan A/D/R FCPRS (ABB IRM), linia mecanică A/D ML cu şapte stații (WS1-WS7) şi MCPRS.

Logica de calitate bun/defect/reparabil determină fluxul operațional: WPX cu doi cilindri metalici este clasificat bun (stocat în WH_L); WPX cu doi cilindri plastici este defect (dezasamblat total în FCPRS); WPX mixt (un metalic, un plastic) este reparabil (cilindrul plastic este înlocuit în FCPRS de ABB IRM, componenta extrasă este transportată de MCPRS la WH4 pentru reutilizare). Această logică implementează principiile fabricației circulare şi ale Industriei 5.0.

Formalismul SHPN extins acoperă toate cele trei tipuri de operații (STPN_A / SHPN_D / SHPN_R & CPN_D / CPN_ R), validate prin comparare cu semnalele de monitorizare PLC în timp real şi simulate în Sirphyco. Sincronizarea distribuită PROFIBUS-DP între PLC master S7-1214C şi şase PLC-uri slave S7-300 demonstrează scalabilitatea formalismului de la CPRS la linii de producție complete. Obiectivele principale atinse ale acestui capitol sunt OB.3, OB.4 și OB.6.

Diseminarea rezultatelor s-a realizat în [AS.3], [AS.5], [AS.8], [AW.4], [AW.5] și [AP.4].

Capitolul 6

Concluzii și contribuții științifice

6.1. Concluzii

Cercetările dezvoltate în cadrul prezentei teze au avut ca obiectiv principal proiectarea, modelarea, implementarea și validarea unor arhitecturi avansate de conducere IoT-Cloud și Digital Twin pentru linii de producție mecatronice asistate de sisteme robotice cyber-fizice fixe și mobile, în contextul transformărilor digitale specifice Industriei și Educației 4.0/5.0.

Abordarea propusă răspunde cerințelor actuale privind dezvoltarea sistemelor inteligente de fabricație flexibilă, capabile să integreze într-o structură unitară operații de asamblare, dezasamblare, reparare, procesare, reprocesare, recuperare și reutilizare a produselor și componentelor. Sistemele dezvoltate permit extinderea conceptelor clasice de fabricație prin introducerea unor mecanisme de producție circulară și sustenabilă, în care produsele necorespunzătoare calitativ nu sunt eliminate, ci sunt reintegrate în ciclul de fabricație prin tehnologii dedicate de recuperare și recondiționare.

Soluțiile propuse au fost implementate și validate pe platforme experimentale de laborator alcătuite din linii mecatronice de producție și sisteme robotice cyber-fizice mobile. Aceste structuri reprezintă modele relevante pentru aplicații industriale reale, în special pentru sistemele moderne de asamblare din industria constructoare de automobile, unde flexibilitatea, adaptabilitatea și optimizarea resurselor constituie cerințe esențiale.

Un element de noutate al cercetării îl constituie extinderea arhitecturilor clasice de producție, bazate pe manipulatoare robotice fixe, către sisteme robotice cyber-fizice mobile echipate cu manipulatoare robotice. Ele permit deservirea dinamică a mai multor stații de lucru, transportul autonom al produselor și componentelor, precum și executarea operațiilor de recuperare, reprocesare și reintegrare în fluxul de fabricație. Prin această abordare se obține o creștere a flexibilității operaționale și o utilizate mai eficientă a resurselor de producție.

Obiectivele stabilite la începutul cercetării au fost realizate integral. Astfel, au fost dezvoltate și validate modele cinematice pentru roboți mobili și manipulatoare robotice, au fost proiectate și implementate sisteme de servoing vizual fixe și mobile pentru operații de poziționare și manipulare de precizie, au fost elaborate arhitecturi Digital Twin pentru sisteme robotice cyber-fizice și pentru linii mecatronice de producție, au fost dezvoltate structuri multinivel de conducere bazate pe IoT și Cloud și au fost implementate mecanisme de conducere locală și la distanță utilizând infrastructuri moderne de comunicații, achiziții de date și interfețe grafice dedicate.

Rezultatele obținute demonstrează fezabilitatea utilizării conceptului Digital Twin pentru monitorizarea, simularea, optimizarea și conducerea în timp real a tehnologiilor de fabricație. Integrarea componentelor virtuale cu sistemele fizice a permis realizarea unor mecanisme avansate de supraveghere, analiză și planificare a proceselor, precum și dezvoltarea unor interfețe intuitive bazate pe realitate augmentată și realitate virtuală.

În vederea modelării și conducerii proceselor dezvoltate au fost utilizate formalisme și metode specifice sistemelor de fabricație flexibilă, inclusiv rețele Petri hibride sincronizate, metode de planificare și alocare a taskurilor, algoritmi de echilibrare și optimizare a liniilor de producție și tehnici moderne de integrare hardware-software. Implementarea și validarea experimentală au fost realizate utilizând un ansamblu complex de instrumente software, dintre care se evidențiază Sirphyco, Visual C++, MATLAB, TIA Portal, ABB RobotStudio, Siemens NX Mechatronics Concept Designer, Node-RED și Docker.

Contribuțiile obținute confirmă aplicabilitatea conceptelor IoT, Cloud, Digital Twin și sisteme robotice cyber-fizice în dezvoltarea unor arhitecturi inteligente de fabricație, capabile să răspundă cerințelor actuale privind flexibilitatea, reziliența, sustenabilitatea și eficiența energetică. În același timp, platformele dezvoltate oferă un suport valoros pentru activități didactice și de cercetare, facilitând integrarea tehnologiilor specifice Industriei și Educației 4.0/5.0 într-un mediu experimental unitar.

Validarea experimentală a tuturor arhitecturilor propuse a fost realizată prin implementări în timp real și scenarii funcționale complete, documentate prin rezultate experimentale și materiale video. Aceste implementări confirmă corectitudinea modelelor dezvoltate, funcționarea mecanismelor de conducere propuse și capacitatea sistemelor de a opera în condiții apropiate de cele întâlnite în mediul industrial.

În ansamblu, teza contribuie la dezvoltarea domeniului sistemelor inteligente de fabricație prin propunerea unor arhitecturi integrate de conducere IoT-Cloud și Digital Twin pentru linii de producție mecatronice asistate de sisteme robotice cyber-fizice, oferind atât rezultate științifice originale, cât și soluții cu aplicabilitate practică în industrie, cercetare și educație.

6.2. Rezultate și contribuții științifice

Contribuțiile originale, diseminate și certificate prin lucrările publicate la care sunt autor principal sau coautor, sunt următoarele:

- Modelarea cinematică a sistemului MCPRS integrând PeopleBot WMR, Cyton RM 1500 și ABB IRM IRB 120 într-un cadru cinematic comun bazat pe transformări omogene D-H și strategii de decuplare, cu derivarea completă a ecuațiilor cinematicii directe și inverse pentru fiecare platformă robotică, [OB.1], [AS.2], [AS.7], [AS.8], [AW.6].
- Implementarea și validarea experimentală a algoritmului TTSMC pentru conducerea robotului mobil PeopleBot pe traiectorii specifice tehnologiilor de fabricație, precum și analiza limitărilor funcționale și constructive ale platformei în cadrul arhitecturilor MCPRS, [OB.1], [AS.2], [AS.7], [AS.8], [AW.4], [AW.5];
- Proiectarea, implementarea și validarea unei arhitecturi de comunicație bidirecțională bazată pe MODBUS TCP între PLC-ul Siemens S7-1200 și sistemele robotice cyber-fizice mobile, împreună cu dezvoltarea protocoalelor de sincronizare necesare integrării în timp real în liniile A/D/R MPL și P/R/S MPS. Contribuția a fost validată prin implementarea fizică a sistemelor A/D/R FCPRS, P/R/S MPS asistat de MCPRS și A/D/R MPL asistată de CPRS dual, [OB.1], [OB.6], [AS.1], [AS.3], [AS.4], [AW.3], [AW.6];
- Proiectarea și validarea unui sistem de servoing vizual fix (FVSCS – Eye-to-Hand), bazat pe video-cameră externă și algoritmi de conducere fundamentați pe momentele imaginii, destinat detecției, identificării și clasificării produselor și componentelor în cadrul liniilor de producție, inclusiv analizei comparative cu sistemele de servoing vizual mobile, [OB.2], [AS.2], [AS.5], [AS.8], [AW.4], [AW.5], [AW.6];
- Dezvoltarea și implementarea sistemului de servoing vizual mobil (MVSCS – Eye-in-Hand), utilizând o video-cameră Logitech C920 montată pe efectorul final al manipulatorului Cyton 1500, algoritmi OpenCV C++ și strategii de conducere bazate pe momentele imaginii, validate experimental în cadrul liniilor P/R/S MPS și A/D/R MPL prin obținerea unor erori finale de poziționare sub 10 mm la preluare și sub 5 mm la plasare, [OB.2], [AS.2], [AS.5], [AS.8], [AW.4], [AW.5], [AW.6];
- Elaborarea și validarea unui protocol robust de sincronizare între MCPRS și liniile mecatronice de producție, bazat pe schimb bidirecțional de informații prin infrastructuri SCADA și comunicații Ethernet industriale, asigurând evitarea coliziunilor, detectarea situațiilor de blocaj și reducerea timpilor de așteptare în procesele de fabricație, [OB.3], [OB.6], [AS.1], [AW.3], [AP.1];
- Formularea unui set de principii pentru proiectarea interfețelor HMI orientate către utilizator în contextul Industriei și Educației 4.0/5.0, incluzând codificarea semantică a informațiilor prin culori, interfețe tactile industriale, comenzi vocale și reprezentări 3D sincronizate ale sistemelor fizice și virtuale, [OB.4], [OB.6], [AS.1], [AS.3], [AS.4], [AW.3].
- Dezvoltarea și validarea unei platforme integrate de monitorizare și conducere IoT-Cloud pentru sisteme de fabricație asistate de sisteme robotice cyber-fizice, utilizând Node-RED, InfluxDB și UGAL OwnCloud pentru achiziția, stocarea, vizualizarea și accesul la distanță la datele proceselor industriale, [OB.6], [AS.1], [AS.3], [AS.4], [AS.6], [AW.1], [AW.2], [AW.3], [AP.1], [AP.2].
- Dezvoltarea arhitecturii Digital Twin pentru conducerea liniei A/D/R FCPRS, compatibilă cu principiile Industriei și Educației 4.0/5.0, integrând tehnologii de realitate augmentată,

realitate virtuală, Node-RED, planificarea taskurilor și modelarea prin rețele Petri sincronizate (STPN), [OB.2], [OB.3], [OB.4], [AS.4], [AS.6], [AW.2], [AS.9], [AP.2], [AP.3].

- Implementarea și validarea mecanismelor de monitorizare și conducere IoT-Cloud pentru tehnologiile de asamblare, dezasamblare și reparare dezvoltate pe platforma experimentală A/D/R FCPRS, [OB.4], [OB.6], [AS.4], [AS.6], [AW.1], [AP.2], [AP.3].
- Dezvoltarea arhitecturii Digital Twin pentru conducerea liniei P/R/S MPS asistat de MCPRS, bazată pe integrarea tehnologiilor AR/VR, a mediului Node-RED și a formalismului SHPN (STPN și CPN) pentru modelarea, simularea și planificarea tehnologiilor de fabricație, [OB.2], [OB.3], [OB.4], [AS.1], [AS.10], [AP.1].
- Implementarea și validarea conducerii și monitorizării IoT-Cloud pentru tehnologiile de fabricație dezvoltate pe linia P/R/S MPS asistat de MCPRS, [OB.4], [OB.6], [AS.1], [AP.1].
- Dezvoltarea unei arhitecturi Digital Twin pentru conducerea liniei A/D/R MPL asistată de CPRS dual, integrând tehnologii de realitate augmentată și virtuală, planificarea taskurilor și modelarea prin SHPN (STPN și CPN), în concordanță cu cerințele Industriei și Educației 4.0/5.0, [OB.2], [OB.3], [OB.4], [AS.3], [AS.4].
- Implementarea și validarea conducerii și monitorizării IoT-Cloud pentru tehnologiile de fabricație dezvoltate pe linia A/D/R MPL asistată de CPRS dual, demonstrând funcționarea integrată a componentelor fizice și virtuale ale sistemului în regim de conducere locală și la distanță, [OB.4], [OB.6], [AS.3], [AS.4].

6.3. Direcții de cercetare viitoare

Pe baza rezultatelor obținute în cadrul acestei teze, se conturează o serie de direcții relevante de cercetare și dezvoltare, orientate către extinderea capacităților sistemelor robotice cyber-fizice și a arhitecturilor de conducere IoT-Cloud și Digital Twin:

- Dezvoltarea unor strategii avansate de conducere pentru sisteme mecatronice asistate de roboți, cu integrarea explicită a modelelor de incertitudine parametrică și structurală, atât la nivelul liniilor de fabricație flexibilă, cât și la nivelul sistemelor robotice cyber-fizice distribuite, în vederea creșterii robusteței și stabilității operaționale.
- Integrarea tehnicilor moderne de Inteligență Artificială adaptivă pentru optimizarea dinamică a planificării taskurilor, detectarea timpurie a deviațiilor de calitate și realizarea predicției defectelor echipamentelor în timp real, robustețe crescută la perturbații și incertitudini.
- Extinderea formalismului SHPN către PN colorate, pentru modelarea fluxurilor concurente și a sistemelor multi-agent formate din MCPRS-uri și arhitecturi CPRS distribuite, cu implementare și validare în medii precum Sirphyco și CPN Tools.
- Consolidarea securității cibernetice pentru arhitecturile industriale IoT-Cloud, prin integrarea unor mecanisme avansate de autentificare, criptare, detecție a intruziunilor și protecție a comunicațiilor în timp real, adaptate sistemelor cyber-fizice distribuite.
- Migrarea arhitecturii MCPRS către o infrastructură modernă bazată pe ROS2 Jazzy, integrarea senzoristicii 3D (IFM O3R222, OAK-D Lite) și utilizarea procesării distribuite la nivel edge, în scopul eliminării dependenței de comunicații Wi-Fi, reducerii latenței în sistemele de servoing vizual și creșterii gradului de autonomie al sistemelor robotice mobile.

6.4. Diseminarea rezultatelor

Diseminarea rezultatelor a fost demarată prin publicarea cercetărilor în două zeci (20) lucrări științifice, unde sunt listat ca prim autor în 2 (două) dintre aceste publicații.

- 8 lucrări publicate în reviste și indexate în ISI Web of Science dintre care la două sunt prim autor [AS 1];
- 8 lucrări la conferințe internaționale, publicate în IEEE Xplore dintre care 6 indexate în ISI Web of Science;
- 4 lucrări publicate în Preprints, dintre care 3 în ISI Web of Science.

1. Lucrări științifice publicate în jurnale (indexate WOS, Core Collection).

[AS.1] **G. Simion**, Adrian Filipescu, D. Ionescu, and Adriana Filipescu, “Cloud/VPN-Based Remote Control of a Modular Production System Assisted by a Mobile Cyber-Physical Robotic System-Digital Twin Approach,” *Sensors*, vol. 25, no. 2, p. 591, Jan. 2025, IF: 4, Q2, ISSN: 1424-8220, Engineering, Electrical Engineering, Instruments & Instrumentation IF: Q2, AIS: Q2, JCR 2025, Core Collection, edition SCIE, WOS:001405432100001, DOI: 10.3390/s25020591

[AS.2] **G. Simion,** Adrian Filipescu, D. Ionescu, R. Șolea, D. Cernega, E. Mincă, Adriana Filipescu, “Mobile Visual Servoing Based Control of a Complex Autonomous System Assisting a Manufacturing Technology on a Mechatronics Line,” *Inventions*, vol. 7, no. 3, p. 47, Jun. 2022, IF: 2.4, Q2, ISSN: 2411-5134 Engineering, Multidisciplinary IF:Q2, AIS: Q2, JCR 2025, ESCI, WOS:000858232500001, DOI: 10.3390/inventions7030047

[AS.3] Adriana Filipescu, **G. Simion**, Adrian Filipescu, and D. Ionescu, “IoT-Cloud-Based Control of a Mechatronic Production Line Assisted by a Dual Cyber-Physical Robotic System Within Digital Twin, AI and Industry/Education 4.0/5.0 Frameworks,” *Sensors*, vol. 26, no. 10, p. 3194, May 2026, IF: 4, Q2, ISSN: 1424-8220, Engineering, Electrical Engineering, Instruments & Instrumentation IF: Q2, AIS: Q2, JCR 2025, Core Collection, edition SCIE, WOS:001775469400001, DOI:10.3390/s26103194

[AS.4] Adrian Filipescu, **G. Simion**, D. Ionescu, and Adriana Filipescu, “IoT-Cloud, VPN, and Digital Twin-Based Remote Monitoring and Control of a Multifunctional Robotic Cell in the Context of AI, Industry, and Education 4.0 and 5.0,” *Sensors*, vol. 24, no. 23, p. 7451, Nov. 2024, IF: 4, Q2, ISSN: 1424-8220, Engineering, Electrical Engineering, Instruments & Instrumentation IF: Q2, AIS: Q2, JCR 2025, Core Collection, edition SCIE, WOS:001377771600001 DOI:10.3390/s24237451

[AS.5] E. Mincă, Adrian Filipescu, D. Cernega, R. Șolea, Adriana Filipescu, D. Ionescu, **G. Simion**, “Digital Twin for a Multifunctional Technology of Flexible Assembly on a Mechatronics Line with Integrated Robotic Systems and Mobile Visual Sensor-Challenges towards Industry 5.0”, *Sensors*, vol. 22, no. 21, p. 8153, Oct. 2022, IF: 4, Q2, ISSN: 1424-8220, Engineering, Electrical Engineering, Instruments & Instrumentation IF: Q2, AIS: Q2, JCR 2025, Core Collection, edition SCIE, WOS:000881435200001, DOI: 10.3390/s22218153

[AS.6] D. Ionescu, Adrian Filipescu, **G. Simion**, and Adriana Filipescu, “Internet of Things-Cloud Control of a Robotic Cell Based on Inverse Kinematics, Hardware-in-the-Loop, Digital Twin, and Industry 4.0/5.0,” *Sensors*, vol. 25, no. 6, p. 1821, Mar. 2025, IF: 4, Q2, ISSN: 1424-8220, Engineering, Electrical Engineering, Instruments & Instrumentation IF: Q2, AIS: Q2, JCR 2025, Core Collection, edition SCIE, WOS:001405432100001, DOI:10.3390/s25061821

[AS.7] Adriana Filipescu, D. Ionescu, Adrian Filipescu, E. Mincă, and **G. Simion**, “Multifunctional Technology of Flexible Manufacturing on a Mechatronics Line with IRM and CAS, Ready for Industry 4.0,” *Processes*, vol. 9, no. 5, p. 864, May 2021, IF: 3.4, ISSN: 2227-9717, Chemical Engineering, IF: Q2, AIS: Q2, JCR 2025, ESCI, WOS: 000654500500001, DOI: 10.3390/pr9050864

[AS.8] D. Ionescu, Adrian Filipescu, **G. Simion**, E. Mincă, D. Cernega, R. Șolea, Adriana Filipescu, “Communication and Control of an Assembly, Disassembly and Repair Flexible Manufacturing Technology on a Mechatronics Line Assisted by an Autonomous Robotic System,” *Inventions*, vol. 7, no. 2, p. 43, Jun. 2022, IF: 2.4, Q2, ISSN: 2411-5134 Engineering, Multidisciplinary IF:Q2, AIS: Q2, JCR 2025, ESCI, WOS:000818151300001, DOI: 10.3390/inventions7020043

2. Lucrări științifice publicate în proceedings la conferințe internaționale (indexate WOS, Core Collection).

[AW.1] Adrian Filipescu, **G. Simion**, D. Ionescu, and Adriana Filipescu, “Remote Control of a Flexible Robotic Cell as a Cyber Physical System for Assembly and Disassembly Based on SCADA and Industry 4.0,” in *2024 32nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Chania - Crete, Greece: IEEE, Jun. 2024, pp. 634-639, WOS:001565329000105, DOI:10.1109/MED61351.2024.10566234

[AW.2] D. Ionescu, Adrian Filipescu, **G. Simion**, R. Şolea, Adriana Filipescu, and A. Serbencu, “PLC Inverse Kinematics Model-Driven Digital Twin Focused on HIL for a Flexible Robotic Cell,” in *2024 18th International Conference on Control, Automation, Robotics and*

Vision (ICARCV), Dubai, United Arab Emirates: IEEE, Dec. 2024, pp. 1195-1200, WOS:001435120000191, DOI:10.1109/ICARCV63323.2024.10821631

[AW.3] Adrian Filipescu, I. Stamatescu, **G. Simion**, D. Ionescu, and Adriana Filipescu, "IoT-Cloud based Control of a Flexible Assembly/Disassembly Mechatronic System in the Framework of Industries 4.0 and 5.0," in *2024 IEEE 18th International Conference on Control & Automation (ICCA)*, Reykjavík, Iceland: IEEE, Jun. 2024, pp. 534-539, WOS:001294388500088, DOI:10.1109/ICCA62789.2024.10591866

[AW.4] Adrian Filipescu, R. Solea, D. Cernega, D. Ionescu, **G. Simion**, and Adriana Filipescu, "Complex Autonomous System Assisting a Manufacturing Technology on a Mechatronics Line. A Digital Twin Approach," in *2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia, Romania: IEEE, Oct. 2022, pp. 157-162, WOS:000889980600028, DOI: 10.1109/ICSTCC55426.2022.9931812

[AW.5] Adrian Filipescu, D. Cernega, E. Minca, R. Şolea, D. Ionescu, **G. Simion**, and Adriana Filipescu, "Digital Twin for a Mechatronics Line with Integrated Mobile Robotic Systems," in *2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia, Romania: IEEE, Oct. 2022, pp. 163-169, WOS:000889980600029, DOI: 10.1109/ICSTCC55426.2022.9931782

[AW.6] D. Ionescu, D. Cernega, R. Solea, Adrian Filipescu, **G. Simion**, and Adriana Filipescu, "CAS and IRM Integrated into a Multifunctional Flexible Manufacturing Technology on an A/D/RML," in *2021 25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Iasi, Romania: IEEE, Oct. 2021, pp. 541-546, WOS:000859487900089 , DOI: 10.1109/ICSTCC52150.2021.9607127

3. Articole publicate în proceedings la conferințe internaționale (Indexate SCOPUS, cu DOI).

[AS.9] Adrian Filipescu, **G. Simion**, D. Ionescu, Adriana Filipescu, "Modeling and Control an A/DT Served by an ACPS based on SCADA, Industry 4.0 and 5.0," in *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sinaia, Romania: IEEE, Sep. 2023, pp. 1-8, DOI: 10.1109/ETFA54631.2023.10275349

[AS.10] Adrian Filipescu, E. Mincă, D. Cernega, R. Șolea, Adriana Filipescu, **G. Simion**, D. Ionescu, „Digital Twin Based a Processing Technology Assisted by a MCPRS, Ready for Industry 5.0", în *2023 27th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Timisoara, Romania: IEEE, oct. 2023, pp. 297-302, DOI: 10.1109/ICSTCC59206.2023.10308478

4. Lucrări științifice publicate în Preprints (indexate WOS, neincluse în Core Collection, cu DOI).

[AP.1] **G. Simion**, Adrian Filipescu, D. Ionescu, și Adriana Filipescu, „Cloud/VPN Based Remote Control of a Modular Production System Assisted by a Mobile Cyber Physical Robotic System-Digital Twin Approach", 4 decembrie 2024, *Engineering*, WOS PPRN:120342448, Preprint DOI:10.20944/preprints202412.0302.v1

[AP.2] Adrian Filipescu, **G. Simion**, D. Ionescu, și Adriana Filipescu, „IoT-Cloud, VPN and Digital Twin Based Remote Monitoring and Control of a Multifunctional Robotic Cell in the Context of AI, Industry and Education 4.0 and 5.0", 17 octombrie 2024, *Engineering*, WOS PPRN:119048376, Preprint DOI:10.20944/preprints202410.1345.v1

[AP.3] D. Ionescu, Adrian Filipescu, **G. Simion**, și Adriana Filipescu, „IoT-Cloud and Digital Twin Approach for HIL Structure Based on Inverse Kinematics Model and PLC for Controlling a Robotic Cell in the Framework of Industry 4.0", 10 februarie 2025, *Engineering*, WOS PPRN:122447476, Preprint DOI:10.20944/preprints202502.0693.v1

[AP.4] Adriana Filipescu, **G. Simion**, Adrian Filipescu, și D. Ionescu, „IoT-Cloud-Based Control of a Mechatronic Production Line Assisted by a Dual Cyber-Physical Robotic System within Digital Twin, AI and Industry/Education 4.0/5.0 Frameworks", 30 aprilie 2026, *Engineering*, Preprint DOI:10.20944/preprints202604.1734.v1

Bibliografie

[1] O.-G. Duca, „Aplicarea conceptelor de Industrie 4.0 şi 5.0 la modelarea şi conducerea proceselor de fabricaţie flexibilă”, Teză de doctorat, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galaţi, 2023

[2] A. Filipescu, E. Mincă, A. Filipescu, and H.-G. Coandă, "Manufacturing Technology on a Mechatronics Line Assisted by Autonomous Robotic Systems, Robotic Manipulators and Visual Servoing Systems," Actuators, vol. 9, no. 4, p. 127, 2020, DOI: 10.3390/act9040127

[3] C. Copot, A. Burlacu, and C. Lazar, "Visual control architecture of servoing systems based on image moments," in OPTIM 2010: Proceedings of the 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, PTS I-IV, IEEE, 2010, pp. 801–806, DOI 10.1109/OPTIM.2010.5510558

[4] Hitachi Ltd., "Hitachi Vehicle Operating System for SH-2 Operating System Manual," Renesas Electronics Corporation, 2001. Available Online https://www.renesas.com/en/document/mat/vehicle-operating-system-sh-2-operating-system-manual , accesat pe 05.05.2026

[5] B. S. Park, S. J. Yoo, J.-B. Park, and Y.-H. Choi, "Adaptive neural sliding mode control of nonholonomic wheeled mobile robots with model uncertainty," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 17, no. 1, pp. 207–214, 2009, DOI: 10.1109/TCST.2008.922584

[6] J.-K. Lee, J.-B. Park, and Y.-H. Choi, "Tracking Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robot Based on New Sliding Surface with Approach Angle," in 3rd IFAC Symposium on Telematics Applications, Seoul, Korea, 2013, DOI: 10.3182/20131111-3-KR-2043.00018

[7] B. Wei, "A Tutorial on Robust Control, Adaptive Control and Robust Adaptive Control - Application to Robotic Manipulators," Inventions, vol. 4, no. 3, p. 49, 2019, doi: 10.3390/inventions4030049

[8] M. Nachidi, A. El Hajjaji, and J. Bosche, "An enhanced control approach for DC-DC converters," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 45, no. 1, pp. 404–412, 2013, DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.09.003

[9] V. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 22, no. 2, pp. 212–222, 1977, DOI: 10.1109/TAC.1977.1101446

[10] J. J. E. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear Control. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1991, https://lewisgroup.uta.edu/ee5323/notes/slotine%20and%20Li-%20Applied%20Non-linear%20Control-%2060Mb.pdf

[11] A. Cavallo and C. Natale, "High-order sliding control of mechanical systems: Theory and experiments," Control Eng. Pract., vol. 12, no. 9, pp. 1139–1149, 2004, DOI: 10.1016/j.conengprac.2003.11.011

[12] G. Ciubucciu, A. Filipescu, A. Jr. Filipescu, S. Filipescu, and B. Dumitrascu, "Control and Obstacle Avoidance of a WMR Based on Sliding-Mode, Ultrasounds and Laser," in 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), Kathmandu, Nepal, 2016, pp. 779–784, DOI: 10.1109/ICCA.2016.7505373

[13] E. S. El youssef, N. A. Martins, E. R. De Pieri, and U. F. Moreno, "PD-Super-Twisting Second Order Sliding Mode Tracking Control for a Nonholonomic Wheeled Mobile Robot," in 19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, 2014, DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.02210

[14] V. I. Utkin, J. Guldner, and J. Shi, Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems. CRC Press, 2009, DOI: 10.1201/9781420065619

[15] B. Koo, Y. Yoo, and S. Won, "Super-twisting algorithm based sliding mode controller for a refrigeration system," in 12th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju Island, 2012, pp. 34-38

[16] E. S. Elyoussef, E. R. De Pieri, U. F. Moreno, and M. Jungers, "Super-Twisting Sliding Modes Tracking Control of a Nonholonomic Wheeled Mobile Robot," in 10th IFAC Symposium on Robot Control, Dubrovnik, Croatia, 2012, DOI: 10.3182/20120905-3-HR-2030.00124

[17] A. Ravankar, A. A. Ravankar, Y. Kobayashi, Y. Hoshino, and C.-C. Peng, "Path Smoothing Techniques in Robot Navigation: State-of-the-Art, Current and Future Challenges," Sensors, vol. 18, no. 9, p. 3170, 2018, DOI: 10.3390/s18093170

[18] Aria pentru ROS2, https://github.com/wust-dcr/ros2aria , accesat pe 05.06.2026.

[19] C. Siciliano and O. Khatib, Springer Handbook of Robotics. Springer, 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1

[20] H. Tokashiki, K. Kaneko, and K. Tanie, "Development of independently-controlled position and orientation manipulator for minute work," in Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065), IEEE, Apr. 2000, pp. 1502–1508, DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844029

[21] N. I. Badler and D. Tolani, "Real-Time Inverse Kinematics of the Human Arm," Presence: Teleoperators and Virtual Environments, vol. 5, no. 4, pp. 393–407, 1996, DOI: 10.1162/pres.1996.5.4.393

[22] C. Rocha, C. Tonetto, and A. Dias, "A comparison between the Denavit-Hartenberg and the screw-based methods used in kinematic modeling of robot manipulators," Robot. Comput.-Integr. Manuf., vol. 27, pp. 723–728, 2011, DOI: 10.1016/j.rcim.2010.12.009

[23] R. S. Hartenberg and J. Denavit, "A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices," J. Appl. Mech., vol. 77, pp. 215–221, 1955, DOI: 10.1115/1.4011045

[24] C. Cristoiu and A. Nicolescu, "New approach for forward kinematic modeling of industrial robots," Res. Sci. Today, vol. 13, p. 136, 2017, https://www.rstjournal.com/article/e0a46029-b377-47de-9f4c-9c329f6aff21

[25] A. Gasparetto and V. Zanotto, "A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators," Mech. Mach. Theory, vol. 42, pp. 455–471, 2007, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2006.04.002

[26] M. Hadi Barhaghtalab, V. Meigoli, M. Haghighi, S. Nayeri, and A. Ebrahimi, "Dynamic analysis, simulation, and control of a 6-DOF IRB-120 robot manipulator using sliding mode control and boundary layer method," J. Cent. South Univ., vol. 25, pp. 2219–2244, 2018, DOI: 10.1007/s11771-018-3909-2

[27] ABB, "Product Manual: IRB 120," ABB Robotics, https://library.e.abb.com/public/35c8d30aebad4d13b945a1943e354ac5/3HAC035728%20PM%20IRB%20120-en.pdf , accesat pe 10.06.2026

[28] A. F. Nicolescu, F. M. Ilie, and T. G. Alexandru, "Forward and inverse kinematics study of industrial robots taking into account constructive and functional parameters modeling," Proceedings in Manufacturing Systems, vol. 10, no. 4, pp. 157–164, 2015.
[29] F. Chapelle and P. Bidaud, "Closed form solutions for inverse kinematics approximation of general 6R manipulators," Mech. Mach. Theory, vol. 39, pp. 323–338, 2004, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2003.09.003
[30] M. Almaged, "Forward and Inverse Kinematic Analysis and Validation of the ABB IRB 140 Industrial Robot," Int. J. Electron. Mech. Mechatronics Eng., vol. 7, no. 2, pp. 1383–1401, 2017
[31] C. S. G. Lee and M. Ziegler, "Geometric approach in solving inverse kinematics of PUMA robots," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-20, no. 6, pp. 695–706, 1984, DOI: 10.1109/TAES.1984.310452
[32] A. Bahani, M. E. Ech-Chhibat, H. Ait el Attar, and H. Samri, "The Inverse Kinematics Evaluation of 6-DOF Robots in Cooperative Tasks Using Virtual Modeling Design and Artificial Intelligence Tools," Int. J. Mech. Eng. Robot. Res., vol. 12, no. 2, pp. 121–130, 2023, DOI: 10.18178/ijmerr.12.2.121-130
[33] J. Peng, Y. Ding, G. Zhang, and H. Ding, "An enhanced kinematic model for calibration of robotic machining systems with parallelogram mechanisms," Robot. Comput.-Integr. Manuf., vol. 59, pp. 92–103, Oct. 2019, DOI: 10.1016/j.rcim.2019.03.008
[34] S. Luo, D. Chu, Q. Li, and Y. He, "Inverse Kinematics Solution of 6-DOF Manipulator Based on Multi-Objective Full-Parameter Optimization PSO Algorithm," Front. Neurorobot., vol. 16, p. 791796, 2022, DOI: 10.3389/fnbot.2022.791796
[35] O. F. Seven and A. Ankarali, "Inverse kinematics analysis of IRB120 robot arm," in ISAS '19 - SETSCI Conference Proceedings, 2019, pp. 383-390
[36] A. L. Kleppe and O. Egeland, "Inverse kinematics for industrial robots using conformal geometric algebra," Model. Identif. Control, pp. 63–75, 2016, DOI: 10.4173/mic.2016.1.6
[37] F. Arenas-Rosales, F. Martell-Chavez, I. Y. Sanchez-Chavez, and C. A. Paredes-Orta, "Virtual UR5 Robot for Online Learning of Inverse Kinematics and Independent Joint Control Validated with FSM Position Control," Robotics, vol. 12, no. 1, p. 23, 2023, DOI: 10.3390/robotics12010023
[38] "ABB RobotStudio Desktop Robotics," ABB, https://new.abb.com/products/robotics/software-and-digital/robotstudio/robotstudio-desktop, accesat pe 09.06.2026
[39] C. Berger and B. Rumpe, "Autonomous Driving-5 Years after the Urban Challenge: The Anticipatory Vehicle as a Cyber-Physical System," in 27th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2012), Essen, Germany, 2012, DOI: 10.48550/arXiv.1409.0413
[40] I. Şuşnea, "Contribuţii la elaborarea unor soluţii încorporate (embedded) de conducere în timp real a sistemelor robotice şi vehiculelor autonome," Teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galaţi, 2009, https://prorobsis.ugal.ro/thesis/Teza_doctorat_Susnea.pdf
[41] J. Kim, H. Kim, K. Lakshmanan, and R. R. Rajkumar, "Parallel scheduling for cyber-physical systems: Analysis and case study on a self-driving car," in ACM/IEEE 4th International Conference on Cyber-Physical Systems, Philadelphia, PA, 2013, pp. 31–40, DOI: 10.1145/2502524.2502530
[42] A. Filipescu, "Contribuţii la acţionarea electrică a liniilor de fabricaţie flexibilă şi a roboţilor integraţi," Teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galaţi, 2017
[43] A. Radaschin, "Contribuţii la conducerea inteligentă a roboţilor mobili utilizaţi în liniile flexibile de fabricaţie," Teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galaţi, 2012, https://prorobsis.ugal.ro/thesis/Teza_de_Doctorat_Radaschin_Adrian.pdf
[44] G. Ciubucciu, "Contribuţii la conducerea şi navigaţia sistemelor robotice autonome destinate asistenţei persoanelor cu dizabilităţi şi deservirii unor procese de fabricaţie flexibilă," Teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galaţi, 2019
[45] G. Petrea, "Contribuții la conducerea liniilor de fabricație flexibilă deservite de roboți mobili echipați cu manipulatoare și sisteme servoing vizuale," Universitatea Dunarea de Jos din Galați, Galati, 2018
[46] D. Ionescu, "IoT Cloud Control of manufacturing technologies on multifunctional mechatronics lines with integrated robotic systems using Digital Twin methods," Teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galaţi, 2025
[47] C. Copoţ, "Tehnici de control pentru sistemele servoing vizuale," Teză de doctorat, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iaşi, Şcoala Doctorală a Facultăţii de Automatică şi Calculatoare, 2011
[48] C. Copot, "Control Techniques for Visual Servoing Systems," Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, Iasi, Romania, 2012
[49] S. Hutchinson, G. Hager, and P. Corke, "A tutorial on visual servo control," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 12, no. 5, pp. 651–670, 1996, DOI: 10.1109/70.538972
[50] W.-C. Chang, "Robotic assembly of smartphone back shells with eye-in-hand visual servoing," Robot. Comput.-Integr. Manuf., vol. 50, pp. 102–113, Apr. 2018, DOI: 10.1016/j.rcim.2017.09.010
[51] P. I. Corke, Visual control of robots: high-performance visual servoing. in Robotics and mechatronics series, no. 2. Taunton: Research Studies Press, 1997
[52] L. Deng, W. Wilson, and F. Janabi-Sharifi, "Dynamic performance of the position-based visual servoing method in the cartesian and image spaces," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, NV, 2003, pp. 510–515, DOI: 10.1109/IROS.2003.1250680
[53] P. Corke and S. Hutchinson, "A new partitioned approach to image based visual servo control," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 17, no. 4, pp. 507–515, 2001, DOI: 10.1109/70.954764
[54] P. I. Corke, F. Spindler, and F. Chaumette, "Combining Cartesian and polar coordinates in IBVS," in 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO, 2009, pp. 5962–5967, DOI: 10.1109/IROS.2009.5354569
[55] G. Chesi and A. Vicino, "Visual servoing for large camera displacements," IEEE Trans. Robot., vol. 20, no. 4, pp. 724–735, 2004, DOI: 10.1109/TRO.2004.829465

[56] L. Bascetta and P. Rocco, "Two-time scale visual servoing of eye-in-hand flexible manipulators," IEEE Trans. Robot., vol. 22, no. 4, pp. 818–830, 2006, DOI: 10.1109/TRO.2006.878946
[57] J.-B. Alayrac et al., "Flamingo: a Visual Language Model for Few-Shot Learning," in Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2022,: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2022/hash/960a172bc7fbf0177ccccbb411a7d800-Abstract-Conference.html
[58] A. Radford et al., "Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision," in International Conference on Machine Learning (ICML), 2021, DOI: 10.48550/arXiv.2103.00020
[59] F. Chaumette, "Image moments: a general and useful set of features for visual servoing," IEEE Trans. Robot., vol. 20, no. 4, pp. 713–723, 2004, DOI: 10.1109/TRO.2004.829463
[60] F. Chaumette, "A first step toward visual servoing using image moments," in IEEE/RSJ IROS, 2002, pp. 378–383, https://inria.hal.science/inria-00352087v1
[61] R. Song, F. Li, T. Fu, and J. Zhao, "A Robotic Automatic Assembly System Based on Vision," Appl. Sci., vol. 10, no. 3, p. 1157, 2020, DOI: 10.3390/app10031157
[62] A. Karimov, E. Kopets, G. Kolev, S. Leonov, L. Scalera, and D. Butusov, "Image Preprocessing for Artistic Robotic Painting," Inventions, vol. 6, no. 1, p. 19, 2021, DOI: 10.3390/inventions6010019
[63] J. Zwierzchowski, D. Pietrala, J. Napieralski, and A. Napieralski, "A Mobile Robot Position Adjustment as a Fusion of Vision System and Wheels Odometry in Autonomous Track Driving," Appl. Sci., vol. 11, no. 10, p. 4496, May 2021, DOI: 10.3390/app11104496
[64] Y. Oh, S. Son, and G. Sim, "Sushi Dish - Object detection and classification from real images," 2017, arXiv, DOI: 10.48550/ARXIV.1709.00751
[65] G. Petrea, A. Filipescu, R. Solea, and A. Jr. Filipescu, "Visual Servoing Systems Based Control of Complex Autonomous Systems Serving a P/RML," in 22nd IEEE International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 2018, pp. 323–328, DOI: 10.1109/ICSTCC.2018.8540749
[66] G. Petrea, A. Filipescu, R. Solea, and A. Jr. Filipescu, "Visual Servoing Systems Based Control of Complex Autonomous Systems Serving a P/RML," in 22nd IEEE International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 2018, pp. 323–328, DOI: 10.1109/ICSTCC.2018.8540749
[67] R. Pi, J. Zhang, T. Han, J. Zhang, R. Pan, and T. Zhang, "Personalized Visual Instruction Tuning," in International Conference on Learning Representations (ICLR), 2025, DOI: 10.48550/arXiv.2410.07113
[68] F. Lin, "Vision Language Models: A Survey of 26K Papers," arXiv, 2025, DOI: 10.48550/arXiv.2510.09586
[69] E. Negri, L. Fumagalli, and M. Macchi, "A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems," Procedia Manufacturing, vol. 11, pp. 939–948, 2017, DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198
[70] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," IFAC-PapersOnLine, vol. 51, pp. 1016–1022, 2018, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474
[71] X. Ma, F. Tao, M. Zhang, T. Wang, and Y. Zuo, "Digital twin enhanced human-machine interaction in product lifecycle," Procedia CIRP, vol. 83, pp. 789–793, 2019, DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.330
[72] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, "Characterising the Digital Twin: A Systematic Literature Review," CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 29, pp. 36–52, 2019, DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002
[73] M. Segovia and J. Garcia-Alfaro, "Design, Modeling and Implementation of Digital Twins," Sensors, vol. 22, no. 14, p. 5396, 2022, DOI: 10.3390/s22145396
[74] D. M. Botín-Sanabria, A.-S. Mihaita, R. E. Peimbert-García, M. A. Ramírez-Moreno, R. A. Ramírez-Mendoza, and J. d. J. Lozoya-Santos, "Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review," Remote Sensing, vol. 14, no. 6, p. 1335, 2022, DOI: 10.3390/rs14061335
[75] "Siemens NX Mechatronics Concept Designer (MCD)," Siemens, Jan. 20, 2025. , https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/cad-online
[76] M. Schluse and J. Rossmann, "From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems," in IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), Edinburgh, UK, 2016, pp. 1–6, DOI: 10.1109/SysEng.2016.7753162
[77] A. Berriche, F. Mhenni, A. Mlika, and J.-Y. Choley, "Towards Model Synchronization for Consistency Management of Mechatronic Systems," Appl. Sci., vol. 10, no. 10, p. 3577, 2020, DOI: 10.3390/app10103577
[78] L. V. Guerrero, V. V. López, and J. E. Mejía, "Virtual Commissioning with Process Simulation (Tecnomatix)," Comput.-Aided Des. Appl., vol. 11, no. sup1, pp. S11–S19, 2014, DOI: 10.1080/16864360.2014.914400
[79] S. Konstantinov, F. Assad, B. Ahmad, D. A. Vera, and R. Harrison, "Virtual Engineering and Commissioning to Support the Lifecycle of a Manufacturing Assembly System," Machines, vol. 10, no. 10, p. 939, 2022, DOI: 10.3390/machines10100939
[80] D. Guerra-Zubiaga, A. Bondar, G. Escobedo, and A. Schumacher, "Digital Twin in a Manufacturing Integrated System: Siemens TIA and PLM Case Study," in ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2019, DOI: 10.1115/IMECE2019-11023
[81] O. Saha and P. Dasgupta, "A Comprehensive Survey of Recent Trends in Cloud Robotics Architectures and Applications," Robotics, vol. 7, no. 3, p. 47, 2018, DOI: 10.3390/robotics7030047
[82] D. Mourtzis, E. Vlachou, and N. Milas, "Industrial Big Data as a Result of IoT Adoption in Manufacturing," Procedia CIRP, vol. 55, pp. 290–295, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.038
[83] R. F. Maia, A. J. Bálsamo, G. A. W. Lopes, A. A. Massote, and F. Lima, "Evaluation of OPC-UA communication in an autonomous advanced manufacturing cell implementation," Gestão & Produção, vol. 27, no. 4, p. e5414, 2020, DOI: 10.1590/0104-530X5414-20
[84] Z.-Y. Chen and C.-T. Chen, "A Remote Controlled Robotic Arm That Reads Barcodes and Handles Products," Inventions, vol. 3, no. 1, p. 17, 2018, DOI: 10.3390/inventions3010017
[85] S. A. Omidi, M. J. A. Baig, and M. T. Iqbal, "Design and Imsplementation of Node-Red Based Open-Source SCADA Architecture for a Hybrid Power System," Energies, vol. 16, no. 5, p. 2092, 2023, DOI: 10.3390/en16052092

[86] I.-V. Nițulescu and A. Korodi, "Supervisory Control and Data Acquisition Approach in Node-RED: Application and Discussions," IoT, vol. 1, no. 1, pp. 76–91, 2020, DOI: 10.3390/iot1010005
[87] A. Florescu and S. A. Barabas, "Modeling and Simulation of a Flexible Manufacturing System - A Basic Component of Industry 4.0," Appl. Sci., vol. 10, no. 22, p. 8300, 2020, DOI: 10.3390/app10228300
[88] F. F. Chen and E. E. Adams, "The Impact of Flexible Manufacturing Systems on Productivity and Quality," IEEE Trans. Eng. Manag., vol. 38, pp. 33–45, 1991, DOI: 10.1109/17.65758
[89] G. Chryssolouris, Manufacturing Systems – Theory and Practice. New York, NY: Springer Verlag, 2005, DOI: 10.1007/0-387-28431-1
[90] T. Tolio, Design of Flexible Production Systems - Methodologies and Tools. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009
[91] A. Filipescu and A. Jr. Filipescu, "Simulated Hybrid Model of an Autonomous Robotic System Integrated into Assembly/Disassembly Mechatronics Line," in IFAC Proceedings Volumes, 2014, pp. 9223–9228, DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00556
[92] Z. Liu, L. Hu, W. Hu, and J. Tan, "Petri Nets-Based Modeling Solution for Cyber–Physical Product Control Considering Scheduling, Deployment, and Data-Driven Monitoring," IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst., vol. 53, no. 2, pp. 990–1002, 2023, DOI: 10.1109/TSMC.2022.3170489
[93] S. Peng and M. Zhou, "Sensor-based stage Petri net modelling of PLC logic programs for discrete-event control design," Int. J. Prod. Res., vol. 41, no. 3, pp. 629–644, 2003, DOI: 10.1080/0020754021000042364
[94] F. Pereira and L. Gomes, "Combining Data-Fluxs and Petri Nets for Cyber-Physical Systems Specification," in Designing Embedded Systems with the SIGNAL Programming Language, Springer, 2016, pp. 149–169, DOI: 10.1007/978-3-319-31165-4_7
[95] E. Minca, A. Filipescu, H. G. Coanda, F. Dragomir, O. E. Dragomir, and A. Filipescu, "Extended Approach for Modeling and Simulation of Mechatronics Lines Served by Collaborative Mobile Robots," in 22nd IEEE International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 2018, pp. 335–341, DOI: 10.1109/ICSTCC.2018.8540713
[96] G. Petrea, A. Filipescu, E. Minca, A. Voda, A. Jr. Filipescu, and A. Serbencu, "Hybrid modelling based control of a processing/reprocessing mechatronics line served by an autonomous robotic system," in 16th IEEE International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC2013), Sinaia, 2013, pp. 410–415, 10.1109/ICSTCC.2018.8540670
[97] A. Jr. Filipescu, G. Petrea, A. Filipescu, E. Minca, and S. Filipescu, "Discrete modelling based control of a processing/reprocessing mechatronics line served by an autonomous robotic system," in 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE 2013), Galati, 2013
[98] G. Petrea, A. Filipescu, E. Minca, A. Voda, and A. Jr. Filipescu, "Hybrid Modelling Based Control of a Processing/Reprocessing Line Served by an Autonomous Robotic System," The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galati Fascicle III, vol. 36, no. 1, pp. 13–18, 2013
[99] A. Jr. Filipescu, G. Petrea, A. Filipescu, and S. Filipescu, "Modeling and Control of a Mechatronics System Served by a Mobile Platform Equipped with Manipulator," in 33rd Chinese Control Conference, Nanjing, China, 2014, pp. 6577–6582, DOI: 10.1109/ChiCC.2014.6896078
[100] F. Dragomir, E. Mincă, O. E. Dragomir, and A. Filipescu, "Modelling and Control of Mechatronics Lines Served by Complex Autonomous Systems," Sensors, vol. 19, no. 15, p. 3266, Jul. 2019, DOI: 10.3390/s19153266
[101] S. Mittal, M. A. Khan, D. Romero, and T. Wuest, "Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, vol. 233, no. 5, pp. 1342–1361, 2017, DOI: 10.1177/0954405417736547
[102] S. Nahavandi, "Industry 5.0 - A Human-Centric Solution," Sustainability, vol. 11, no. 16, p. 4371, 2019, DOI: 10.3390/su11164371
[103] M. C. Zizic, M. Mladineo, N. Gjeldum, and L. Celent, "From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology," Energies, vol. 15, no. 14, p. 5221, 2022, DOI: 10.3390/en15145221
[104] G. Da Silverira, D. Borenstein, and F. S. Fogliatto, "Mass Customization: Literature Review and Research Directions," Int. J. Prod. Econ., vol. 72, pp. 1–13, 2001, DOI: 10.1016/S0925-5273(00)00079-7
[105] G. Boothroyd and L. Althing, "Design for assembly and disassembly," Annals of CIRP, vol. 41, no. 2, pp. 625–636, 1992, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63249-1
[106] A. Filipescu, E. Mincă, A. Filipescu, and H.-G. Coandă, "Manufacturing Technology on a Mechatronics Line Assisted by Autonomous Robotic Systems, Robotic Manipulators and Visual Servoing Systems," Actuators, vol. 9, no. 4, p. 127, 2020, DOI: 10.3390/act9040127
[107] A. Filipescu, E. Minca, and A. Filipescu, "Mechatronics Manufacturing Line with Integrated Autonomous Robots and Visual Servoing Systems," in 9th IEEE International Conference on CIS-RAM 2019, Bangkok, Thailand, 2019, pp. 620–625, DOI: 10.1109/CIS-RAM47153.2019.9095848
[108] A. Radaschin, A. Filipescu, V. Minzu, E. Minca, and A. Jr. Filipescu, "Adaptive disassembly sequence control by using mobile robots and system information," in 15th IEEE International Conference on System Theory, Control and Computing, Sinaia, Romania, 2011, pp. 499–505
[109] A. Radaschin, A. Voda, E. Minca, and A. Filipescu, "Task Planning Algorithm in Hybrid Assembly/Disassembly Process," in 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Bucharest, 2012, pp. 571–576, DOI: 10.3182/20120523-3-RO-2023.00336
[110] J. Kallrath, "Planning and scheduling in the process industry," OR Spectrum, pp. 201–227, 2003, DOI: 10.1007/s00291-002-0101-7
[111] Y. He, K. E. Stecke, and M. L. Smith, "Robot and machine scheduling with state-dependent part input sequencing in flexible manufacturing systems," Int. J. Prod. Res., vol. 54, pp. 6736–6746, 2016, DOI: 10.1080/00207543.2016.1161252

[112] A. Filipescu, E. Minca, A. Jr. Filipescu, and G. Petrea, "Modeling and Control of Assembly/Disassembly Mechatronic Line Served by Robotic Manipulator Mounted on Mobile Platform," The Annals of "Dunărea De Jos" University of Galati Fascicle III, vol. 35, no. 1, pp. 17–22, 2012
[113] E. Minca, A. Filipescu, and A. Voda, "Modelling and control of an assembly/disassembly mechatronics line served by mobile robot with manipulator," Control Engineering Practice, vol. 31, pp. 50–62, 2014, DOI: 10.1016/j.conengprac.2014.06.005