

IOSUD - UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești



TEZĂ DE DOCTORAT

- Rezumatul tezei de doctorat -

IoT Cloud Control of manufacturing technologies on multifunctional mechatronics lines with integrated robotic systems using Digital Twin methods

Doctorand,

Ing. IONESCU Dan

Conducător științific,

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

Seria I8: Ingineria Sistemelor Nr.14

Galați

2025

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești



TEZĂ DE DOCTORAT

- Rezumatul tezei de doctorat -

IoT Cloud control of manufacturing technologies on multifunctional mechatronics lines with integrated robotic systems using Digital Twin methods

Doctorand,

Ing. IONESCU Dan

Președinte

Prof. univ. dr. ing. habil. BARBU Marian

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Conducător științific

Prof. univ. dr. ing. FILIPESCU Adrian

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Referenți științifici

Prof. univ. dr. ing. habil. SACALĂ Ioan-Ștefan

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București

Conf. univ. dr. ing. habil. STAMATESCU Iulia

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București

Prof. univ. dr. ing. habil. DOSOFTEI Constantin-Cătălin

Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Seria I8: Ingineria Sistemelor Nr.14

Galați

2025

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 BIOMEDICALE

Seria M:	Medicină
Seria F:	Farmacie

Cuprins

Introducere	1
Tendințe, tehnologii și concepte ale Industriei și Educației 4.0/5.0 aplicate proceselor de fabricație 4.0/5.0	1
Sisteme Robotice Cyber-Fizice (CPRS).....	2
Tehnologii de fabricație industriale și de laborator deservite de sisteme robotice integrate	2
Abordarea DT în procesele de fabricație flexibilă	2
Obiectivele cercetării.....	3
Prezentarea structurii tezei	4
Capitolul 1.....	5
Echipamente, software și concepte asociate Industriei 4.0 și 5.0	5
1.1. Concepte și tehnologii specifice Industriei și Educației 4.0.....	5
1.2. Tehnologii și inovații digitale specifice Industriei și Educației 5.0	5
1.3. Tehnologii IoT și software utilizate în modelarea și conducerea liniilor mecatronice multifuncționale asistate de CPRS	6
1.4. Magistrale și protocoale de comunicație utilizate în IoT Cloud Control ale tehnologiilor de fabricație deservite de sisteme robotice integrate.....	7
1.5. Concluzii	8
Capitolul 2.....	9
Tehnologii de fabricație flexibilă utilizate pe linii mecatronice de laborator, asistate de sisteme robotice cyber-fizice	9
2.1. Caracteristici ale sistemelor multifuncționale de fabricație flexibilă	9
2.2. Sisteme robotice integrate în liniile de fabricație flexibilă specifice Industriei 4.0. Rolul roboților industriali în producția inteligentă (Smart Manufacturing)	9
2.2.1. Manipulatorul robotic industrial ABB 120 IRM cu 6 grade de libertate	9
2.2.2. Roboți mobili - PeopleBot WMR.....	10
2.2.3. Manipulatorul robotic Cyton cu 7 grade de libertate	11
2.3. Tehnologii MCPRS utilizate în linii de fabricație de laborator	12
2.3.1. Sistem Robotic Autonom (ARS).....	12
2.3.2. Sistem Autonom Complex (CAS).....	12
2.3.3. Sisteme robotice cyber-fizice mobile (MCPRS) și sisteme robotice cyber-fizice autonome (ACPS)	13
2.4. Linii Mecatronice de laborator multifuncționale asistate de sisteme robotice integrate	14
2.4.1. Linia de mecatronică modulară, de procesare/reprocesare (P/RML), FESTO MPS-200	14
2.4.2. Linia de mecatronică Hera&Horstmann de asamblare/dezasamblare și reparație (A/D/RML) integrată cu Celula Flexibilă ABB și deservită de ARS	15
2.4.3. Celula Flexibilă multifuncțională de asamblare și dezasamblare (A/DRC), modelat ca sistem CPRS bazat pe tehnologia IoT	16

2.5. Sisteme servoing vizuale și de vedere artificială utilizate în tehnologiile de fabricație flexibile	18
2.6. Rezultate și Contribuții Științifice	19
Capitolul 3.....	20
Modelarea și conducerea sistemelor robotice cyber-fizice mobile integrate pe linii de fabricație flexibile de laborator.....	20
3.1. Deservirea sistemelor de fabricație flexibilă de către sisteme robotice cyber-fizice fixe și mobile	20
3.2. Modelarea și simularea unei celule robotice de asamblare și dezasamblare (A/DRC) echipată cu manipulator robotic ABB 120 IRM, utilizând cinematica inversă	20
3.2.1. Modelarea cinematicii directe a robotului manipulator ABB 120 IRM	20
3.2.2. Modelarea cinematicii inverse a robotului manipulator ABB 120 IRM.....	23
3.2.3. Simularea mișcării cu cinematică inversă a brațului robotic ABB 120 IRM	24
3.3. Modelarea și conducerea sistemelor robotice mobile cyber-fizice (MCPRS) utilizate la deservirea tehnologiilor de fabricație.....	25
3.3.1. Modelarea și conducerea roboților mobili (WMR)	25
3.3.2. Modelarea și conducerea manipulatorului robotic integrat în ARS	26
3.4. Rezultate și contribuții științifice	27
Capitolul 4.....	28
Metode Digital Twin utilizate în monitorizarea și conducerea prin IoT Cloud-Control a tehnologiilor de fabricație flexibilă pe linii de mecatronică de laborator	28
4.1. Metoda DT bazată pe AR și VR pentru modelarea și conducerea liniilor de fabricație multifuncționale asistate de ARS (A/D/RML)	28
4.2. Metoda DT în conducerea IoT Cloud-Control bazată pe realitate augmentată și realitate virtuală aplicată celulei robotice A/DRC	30
4.2.1. Metoda DT folosind AR și VR. Modelare DT A/DRC Virtual	30
4.2.2. Planificarea interactivă a taskurilor utilizând Node-RED și realitatea augmentată	30
4.2.3. Modelare și simulare prin STPN a realității virtuale	30
4.2.4. DT Real World. Monitorizarea și conducerea A/DRC	33
4.3. Metoda DT în conducerea IoT bazată pe cinematica inversă și Hardware-in-the-Loop (HIL) aplicată celulei robotice A/DRC	33
4.3.1. Metoda DT folosind conceptul de Virtual Commissioning și strategia HIL	33
4.3.2. Arhitectura ierarhică și distribuită a DT A/DRC. Virtual și real	33
4.3.3. Conceptul de Virtual Comissioning. Simulare HIL	36
4.3.4. Modelarea A/DRC Virtual: Implementarea cinematicii directe și inverse în PLC...36	
4.3.5. Dezvoltarea modelului 3D Virtual folosind pachetul software Siemens NX MCD .37	
4.3.6. DT Real World. Modelarea și conducerea A/DRC.....	37
4.4. Rezultate și Contribuții Științifice	38
Capitolul 5.....	39
Conducerea IoT Cloud-Control pentru A/DRC utilizând cinematica inversă, HIL și DT cu stocarea de date în MongoDB Cloud History	39

5.1. Protocoale de comunicație utilizate în monitorizarea și conducerea DT A/DRC: OPC UA, PROFINET și IoT	39
5.2. Proiectarea și integrarea sistemelor IoT SCADA și HMI	40
5.3. Implementarea software în PLC pentru conducerea A/DRC bazată pe Digital Twin ...	41
5.4. Monitorizarea și conducerea A/DRC de la distanță folosind tehnologia Remote HMI VPN Control.....	43
5.5. Proiectarea și implementarea MongoDB Cloud History bazat pe IoT și Node-RED pentru stocarea datelor	43
5.6. Rezultate în timp real ale DT și validarea modelului A/DRC virtual	46
5.7. Rezultate și contribuții științifice	50
Capitolul 6.....	52
Concluzii și contribuții științifice.....	52
6.1. Contribuții științifice	53
6.2. Direcții de cercetare viitoare	54
6.3. Diseminarea rezultatelor	54
6.3.1. Lucrări științifice publicate în Reviste de specialitate	54
6.3.2. Lucrări științifice publicate în proceeding-uri ale Conferințelor Internaționale	55
6.3.3. Lucrări științifice publicate în Platforma Preprints.....	56
Bibliografie	57

Listă Figuri

Figura 1. Structura de comunicație pentru A/D/RML Hera & Horstmann și FC cu ABB 120 IRM.	7
Figura 2. ABB IRB120 6-DOF.....	10
Figura 3. PeopleBot WMR cu braț robotic Cyton cu 7 grade de libertate (7-DOF).	11
Figura 4. Festo MPS 200, asistat de MCPRS (PeopleBot WMR echipat cu Cyton 1500 RM și MVSS).	14
Figura 5. Piesa de lucru (Work Piece) procesată de-a lungul stațiilor MPS-urilor, mișcările MCPRS-ului, preluare și depozitare de RM și MVSS.....	15
Figura 6. A/D/RML Hera & Horstmann.....	15
Figura 7. Structura A/DML Hera & Horstmann și a celulei flexibile ABB deservite de ARS.	16
Figura 8. Structura hardware a rețelei PLC din cadrul A/D/RML.	17
Figura 9. Celula Flexibilă (FC) echipată cu robot ABB IRB cu 6 grade de libertate (6-DOF).	17
Figura 10. Structura hardware și de comunicație a PLC-ului Siemens S7-1200 din cadrul A/DRC.....	18
Figura 11. Controlul în timp real al brațului robotic Cyton RM, plasarea unei componente în depozitul de cilindri cu următoarele acțiuni: (a) parcare cu obiectul în gripper, (b) poziționare pentru scanare, (c) deplasare deasupra depozitului, (d) plasarea piesei.....	18
Figura 12. Control în buclă închisă al brațului robotic Cyton RM, bazat pe sistemul de viziune de tip eye-in-hand VSS.	19
Figura 13. Atribuirea cadrelor de referință și a sistemelor de coordonate conform DH, pentru robotul ABB 120 IRM.	21
Figura 14. Transformările dintre cadrele și coordonatele articulațiilor robotului ABB 120 IRM: a) cadrul $\Sigma 0$ la cadrul $\Sigma 1$; b) cadrul $\Sigma 1$ la cadrul $\Sigma 2$; c) cadrul $\Sigma 2$ la cadrul $\Sigma 3$	22
Figura 15. Transformările dintre cadrele și coordonatele articulațiilor robotului ABB 120 IRM: a) cadrul $\Sigma 3$ la cadrul $\Sigma 4$; b) cadrul $\Sigma 4$ la cadrul $\Sigma 5$; c) cadrul $\Sigma 5$ la cadrul $\Sigma 6$	23
Figura 16. Determinarea geometrică a unghiului articulației $\theta 1$	23
Figura 17. Soluția geometrică pentru articulațiile $\theta 2$ and $\theta 3$	24
Figura 18. Simularea mișcării robotului în MATLAB: a) Vedere de sus; b) Vedere izometrică.	24
Figura 19. Reprezentarea sistemului ARS real și a celui virtual în Trajectory-Tracking.	25
Figura 20. Traiectorii dorite și reale (A/D/RML) ale robotului CAS PeopleBot pentru recuperarea cilindrului, acțiune de recuperare componentă, conducere bazată pe metoda FOSMC (First-Order Sliding Mode Control).....	26
Figura 21. Parametrii Denavit-Hartenberg, atribuirea cadrelor de referință și a sistemelor de coordonate pentru manipulatorul Cyton Gamma 1500 RM.	26
Figura 22. Planificarea taskurilor și sincronizarea procesului de dezasamblare FC echipat cu ABB 120 IRM.	29
Figura 23. Planificarea sarcinilor AR în Node-RED pentru operația de A/DRC asamblare.	31

Figura 24. Modelul STPN pentru operația de asamblare A/DRC în cadrul Digital Twin.	32
Figura 25. Monitorizarea și controlul de la distanță bazate pe Cloud și VPN ale Real World pentru DT A/DRC.	34
Figura 26. A/DRC cu ABB 120 IRM. Strat Fizic și Virtual al DT.	35
Figura 27. Proces fizic și model virtual al DT A/DRC.	35
Figura 28. Concepte de Virtual Commissioning: Hardware-in-the-Loop (HIL) și Software-in-the-Loop (SIL).	36
Figura 29. Proiectarea modelului 3D Digital Twin utilizând NX Mechatronics Concept Designer.	37
Figura 30. Mimica SCADA pentru cinematică inversă: calcul, testare și simulare DT.	40
Figura 31. Panou de control SCADA DT pentru operații și controlul mișcării.	40
Figura 32. Simulare în Cloud a istoricului SCADA DT.	41
Figura 33. Diagrama de flux și structura programului principal OB1 al PLC-ului Siemens.	42
Figura 34. Algoritmul blocului funcțional PLC pentru mișcarea liniară MoveL prin segmentarea traiectoriei.	42
Figura 35. Interacțiunea fluxului Node-RED între Cloud și PLC.	43
Figura 36. Structura înregistrării JSON în MongoDB pentru A/DRC.	44
Figura 37. Stocarea datelor în Cloud pentru SCADA și DT.	45
Figura 38. Testul de latență în Cloud pentru A/DRC.	45
Figura 39. Traectorii virtuale și fizice în spațiul 3D ale IRM pentru asamblarea în DT A/DRC.	47
Figura 40. Traectorii virtuale și fizice în spațiul 3D ale IRM pentru dezasamblarea în DT A/DRC.	48
Figura 41. Unghiurile articulațiilor virtuale și fizice ale IRM, împreună cu semnalele de monitorizare STPN pentru asamblarea A/DRC: a) unghiul articulației θ_1 ; b) unghiul articulației θ_2 ; c) unghiul articulației θ_3 ; d) unghiul articulației θ_4 ; e) unghiul articulației θ_6 .	49
Figura 42. Unghiurile articulațiilor virtuale și fizice ale IRM, împreună cu semnalele de monitorizare STPN pentru dezasamblarea A/DRC: a) θ_1 joint angle; b) θ_2 joint angle; c) θ_3 joint angle; d) θ_4 joint angle; e) θ_5 joint angle; f) θ_6 joint angle. a) unghiul articulației θ_1 ; b) unghiul articulației θ_2 ; c) unghiul articulației θ_3 ; d) unghiul articulației θ_4 ; e) unghiul articulației θ_5 ; f) unghiul articulației θ_6 .	50
Figura 43. Compararea erorilor unghiurilor articulațiilor IRM între sistemul fizic A/DRC și modelul virtual DT: a) operația de asamblare; b) operația de dezasamblare.	51

Listă Abrevieri

A/D - Assembly/Disassembly

A/D FC - A/D Flexible Cell (Flexible Robotic Cell with ABB 120 IRM)

A/DRC - A/D Robotic Cell (A/D FC as IoT based cyber physical robotic system)

A/DML - Assembly/ Disassembly Mechatronic Line (6-Workstations Hera & Horstmann)

A/D/RML - Assembly/ Disassembly/Repair Mechatronic Line (A/D FC + A/DML)

AI - Artificial Intelligence

AMQP - Advanced Message Queuing Protocol

AMR - Autonomous Mobile Robots

API - Application Programming Interface

AR - Augmented Reality

ARIA - Advanced Robotic Interface for Applications

ARS - Autonomous Robotic System

BI - Business Intelligence tools

CAD - Computer-Aided Design

CAM - Computer-Aided Manufacturing

CAS - Complex Autonomous Systems

CoAP - Constrained Application Protocol

CPRS - Cyber-Physical Robotic Systems

CPS - Cyber-Physical Systems

DFD - Design for Disassembly

DH - Denavit-Hartenberg convention

DOF - Degree of Freedom

DT - Digital Twin

ECL - Endpoint Closed-Loop system

EOL - End-Point Open-Loop system

ERP - Enterprise Resource Planning

FC - Flexible Cell

FCPRS - Fixed Cyber-Physical Robotic Systems

FML - Flexible Manufacturing Line

FMML - Flexible Manufacturing Mechatronics Line

FMS - Flexible Manufacturing Systems

FOSMC - First Order Sliding Mode Control

FRC - Flexible Robotic Cell

GUI - Graphical User Interface

HD - High Definition

HIL - Hardware-in-the-loop simulation

HMI - Human-Machine Interface

HRC - Human-robot collaboration

HVS - Hybrid Visual Servoing

IBVS - Image-Based Visual Servoing

IIoT - Industrial Internet of Things

I/O - Input/Output

IoE - Internet of Everything

IoT - Internet of Things

IRM - Industrial Robot Manipulator

M2M - Machine-To-Machine Communication

MCD - Mechatronics Concept Designer

MCPRS - Mobile Cyber-Physical Robotic Systems

MES - Manufacturing Execution Systems

ML - Machine Learning

MPS - Modular Production Line

MQTT - Message Queuing Telemetry Transport

MVSS - Mobile Visual Servoing System

NX MCD - Siemens NX Mechatronics Concept Designer

OPC UA - Open Platform Communications Unified Architecture

P/R - Processing/Reprocessing

PBVS - Position-Based Visual Servoing

PLC - Programmable Logic Controller

RM - Robotic Manipulator

RMS - Reconfigurable Manufacturing Systems

RPC - Remote Procedure Call communication protocol

SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition

SMC - Sliding Mode Control

SOSMC - Second Order Sliding Mode Control

SPC - Statistical Process Control

SSL - Secure Socket Layer
STPN - Synchronized Timed Petri Nets
TIA - SiemensTotally Integrated Automation Portal
TLS - Transport Layer Security
TT - Trajectory-Tracking
TTSMC - Trajectory-Tracking Sliding-Mode Control
VC - Virtual Commissioning
VPN - Virtual Private Network
VPS - Virtual Private Server
VPU - Video Processing Unit
VR - Virtual Reality
VSS - Visual Servoing System
WMR - Wheeled Mobile Robot
WS - Work Station

Introducere

Tendințe, tehnologii și concepte ale Industriei și Educației 4.0/5.0 aplicate proceselor de fabricație

În contextul tehnologiilor de fabricație, adoptarea principiilor și tehnologiilor specifice Industry 4.0 a devenit un factor determinant pentru competitivitate și adaptabilitate într-un mediu economic dinamic. Transformarea digitală a proceselor ingineresti este profund influențată de integrarea tehnologiilor inteligente de producție, precum IoT, DT, VC, Cloud robotics și analiza avansată a datelor (big data analytics). Aceste tehnologii facilitează interconectarea sistemelor digitale, optimizarea proceselor industriale și creșterea eficienței operaționale, contribuind semnificativ la modernizarea și digitalizarea integrată a sistemelor de fabricație [1]. Industry 5.0 reprezintă o evoluție complementară a conceptelor oferite de Industry 4.0. Aceasta readuce prezența umană în mediile industriale și pune accent pe implicarea operatorilor umani în centrul proceselor industriale. Este o extindere care îmbunătățește coordonarea dintre tehnologiile avansate și capacitățile umane pentru a obține eficiență sporită, personalizare, reziliență și sustenabilitate în sistemele de producție. Industry 5.0 promovează colaborarea om-mașină, cu accent pe integrarea tehnologiilor inteligente de producție, precum roboții (collaborative robots), în sistemele de fabricație, pentru a crește eficiența, flexibilitatea și precizia proceselor industriale. Integrarea roboților în celule robotice și colaborarea acestora cu operatorii umani pentru a spori productivitatea și calitatea reprezintă un aspect fundamental al acestei transformări industriale. În plus, sustenabilitatea și reziliența sunt strategii-cheie ale acestui nou mediu industrial. Prin combinarea ingeniozității umane și a deciziilor contextuale cu precizia tehnologică, Industry 5.0 contribuie la dezvoltarea unor sisteme tehnologice mai robuste și adaptabile, capabile să facă față perturbărilor și să reducă impactul asupra mediului. Sustenabilitatea, în acest sens, urmărește conservarea mediului și include aspecte sociale și economice, precum îmbunătățirea condițiilor de muncă, reducerea consumului de resurse - sustenabilitatea operațională pe termen lung. Reziliența este obținută prin crearea unor sisteme de fabricație flexibile (FMS), capabile să se adapteze dinamic la cerințe variabile ale pieței, volatilitatea lanțurilor de aprovizionare și perturbări externe - calități tot mai importante într-un mediu industrial global în continuă schimbare.

În contextul Industry 5.0, dezvoltarea sistemelor robotice, în speță a celulelor robotice trebuie să fie multidisciplinară și integrată, implicând contribuții din inginerie, AI și machine learning (ML), pentru a crea spații de lucru bine structurate, sigure și eficiente. Activitățile de cercetare-dezvoltare trebuie să se concentreze pe îmbunătățirea standardelor de siguranță, optimizarea interacțiunii om-robot și aplicarea soluțiilor bazate pe AI, pentru a asigura o implementare holistică în mediile de producție. Mai mult, tehnologiile avansate precum AR și VR oferă utilizatorilor, un mediu virtual, sigur pentru modelarea proceselor industriale complexe, cum ar fi asamblarea, dezasamblarea, repararea sau recuperarea componentelor, și mentenanța. Prin învățarea experiențială în medii virtuale, aceste soluții contribuie la creșterea nivelului de competență, reducerea erorilor și creșterea încrederii în noile tehnologii. Acest lucru este în concordanță și cu principiile Education 5.0, care promovează integrarea tehnologiilor digitale inovatoare în educație pentru a pregăti studenții, cercetătorii și profesioniștii pentru cerințele carierelor din Industry 4.0/5.0.

Sisteme Robotice Cyber-Fizice (CPRS)

CPRS expune un concept fundamental al Industriilor 4.0 și 5.0, datorită caracteristicilor lor tehnologice avansate care sporesc eficiența, flexibilitatea și sustenabilitatea în dezvoltarea sectorului de producție smart (Smart Manufacturing). În industrie, CPS reprezintă un sistem sofisticat, complex care integrează procese fizice și resurse cibernetice pentru a îmbunătăți automatizarea, monitorizarea și controlul proceselor industriale. Arhitecturile de control ale sistemelor CPS integrează componente hardware și software, asigurând o funcționare eficientă într-o varietate de medii operaționale. Acestea pot integra funcționalități și interacțiuni dinamice diferite într-un mod eficient și compatibil, puternic dependent de contextul specific de implementare și de scopul bine definit.

Tehnologii de fabricație industriale și de laborator deservite de sisteme robotice integrate

În ultimii ani, industria a cunoscut progrese și schimbări semnificative, marcate de apariția sistemelor robotice complexe, a tehnologiilor de fabricație multifuncționale și flexibile, cu stații de lucru de înaltă precizie, precum și a sistemelor eficiente de transport și manipulare [7-9]. Cercetările se concentrează tot mai mult pe extinderea numărului de sarcini ale sistemelor de fabricație, varietatea și flexibilitatea acestora, cum ar fi implementarea și execuția operațiilor precum asamblarea, procesarea, reparația sau recuperarea componentelor - realizate pe aceeași stație de lucru, pentru a crește productivitatea. Această schimbare are implicații asupra calității produsului, fiind direct influențată de precizia și acuratețea procesului de fabricație [10-12].

O FMML include toate stațiile și celulele de lucru sau celulele robotizate, instrumentația și echipamentele de achiziție de date, roboți mobili (WMR), roboți manipulatori (RM), precum și subsisteme integrate de monitorizare și control, care facilitează execuția sarcinilor de asamblare, procesare și depozitare într-un mod reconfigurabil. Acest lucru asigură reversibilitate, repetabilitate și, cel mai important, flexibilitate [7, 13-23]. Sistemele robotice complexe și CPS-urile contribuie esențial la avansul producției, fiind integrate în FMML, și echipate cu sisteme avansate de navigație și senzori vizuali care permit precizia operațiunilor tehnologice atribuite sau programate. Aceste sisteme sporesc productivitatea și facilitează recuperarea, reutilizarea și reevaluarea componentelor din produsele finale care nu îndeplinesc standardele de calitate [13-17].

Această teză se aliniază cu noile concepte de proiectare, modelare, implementare și management al proceselor de fabricație flexibile, în special pentru sarcini de asamblare/dezasamblare (A/D) [19, 21, 23-25] și operațiuni de procesare/reprocesare (P/R) [13, 25-31]. Aceste concepte sunt implementate pe sisteme/linii mecatronice de laborator de tip FMML deservite de platforme mobile autonome (WMR) echipate cu roboți manipulatori (RM) pentru execuția dinamică și interactivă a sarcinilor.

Abordarea DT în procesele de fabricație flexibilă

Tehnologia DT presupune transformarea virtuală a mediului fizic, prin trecerea către un model digital, virtual, centrat pe emularea, optimizarea operațiunilor și a proceselor fizice.

Aceasta se realizează prin integrarea unor instrumente software avansate și tehnologii moderne care asigură suportul în implementarea și validarea acestor medii virtuale. DT este o replică virtuală dinamică și interactivă a unui sistem fizic, oferind o imagine detaliată și în timp real a informațiilor despre procesul fizic, reflectând comportamentul, proprietățile, interacțiunile precum și operațiile/task-urile sistemului real. În producție, DT funcționează ca o platformă de vizualizare a proceselor, modelând cu acuratețe caracteristicile, performanțele și operațiunile sistemului fizic [2, 3]. Acesta îmbunătățește conectivitatea și permite optimizări în indicatorii de performanță, eficiența producției, suportul sistemului, capabilitățile predictive, calitatea și reducerea costurilor și riscurilor operaționale [4-6].

Obiectivele cercetării

Această cercetare vizează în principal proiectarea, modelarea și implementarea software a tehnologiei DT cât și a conducerii IoT Cloud-Control pentru o tehnologie multifuncțională de fabricație flexibilă - o celulă robotică de asamblare și dezasamblare (A/DRC), echipată cu un robot ABB IRM cu 6 grade de libertate (ABB 120 IRM). Lucrarea integrează conceptele specifice Industriilor 4.0 și 5.0, evaluând prin simulări și teste extinse acuratețea, fiabilitatea, eficiența și aplicabilitatea acestor tehnologii în procese de fabricație reale.

Obiectivul principal al acestei cercetări este de a crea o platformă virtuală avansată, utilizând tehnologii digitale de ultimă generație, pentru a monitoriza, analiza, proiecta și optimiza de la distanță (remote) procesele și task-urile sistemului fizic, eliminând necesitatea interacțiunii directe cu echipamentele de pe teren. Astfel, tehnologia de fabricație propusă permite și integrarea noilor concepte precum VC, un mediu virtual, digital și dinamic de testare, care permite o emulare a procesului fizic facilitând un transfer bidirecțional și continuu de date către acesta. Prin integrarea tehnologiilor IoT precum și a platformelor/serviciilor de stocarea a datelor în Cloud (MongoDB), este proiectată și implementată o arhitectură DT de conducere IoT Cloud stabilă, flexibilă și pe mai multe niveluri. Această platformă digitală oferă o soluție sigură și robustă pentru monitorizarea de la distanță - în timp real, permite simularea scenariilor și introducerea de strategii noi în ceea ce privește conceptul de mentenanță predictivă, contribuind în final la îmbunătățirea procesului decizional și a eficienței operaționale generale [29].

S-au identificat următoarele obiective specifice:

- OB.1.** Proiectarea și implementarea arhitecturilor hardware și software pentru un sistem de fabricație flexibilă (FMS), asistat de CPRS și compatibil cu conducerea IoT Cloud-Control, DT și a noilor concepte de Industrie/Educație 4.0/5.0.
- OB.2.** Modelarea și controlul sistemelor de tip CPRS integrate în tehnologii de fabricație multifuncționale, în cadrul unor sisteme mecatronice de laborator.
- OB.3.** Abordare DT bazată pe AR/VR pentru conducerea unei tehnologii de fabricație multifuncționale pe o linie de asamblare/dezasamblare asistată de MCPRS.
- OB.4.** Metodă de conducere IoT Cloud-Control și DT bazată pe AR/VR pentru o celulă robotică multifuncțională.

- OB.5.** Metodă de conducere IoT Cloud-Control și DT bazată pe VC pentru o celulă robotică de asamblare și dezasamblare.
- OB.6.** Proiectarea și implementarea IoT Cloud-based History pentru o tehnologie de fabricație, cu stocare de date în Cloud (MongoDB), aplicate unei celule robotice de asamblare și dezasamblare, pentru creșterea eficienței, optimizare, mentenanță predictivă și diagnosticare.
- OB.7.** Testarea, evaluarea și validarea rezultatelor cercetării în laborator pentru IoT Cloud-Control utilizând abordarea DT aplicată unei celule robotice de asamblare și dezasamblare.

Prezentarea structurii tezei

Structura tezei este organizată în șase capitole, fiecare abordând un aspect esențial al cercetării:

Capitolul 1 introduce noile tehnologii emergente, platforme, software-uri și concepte, evidențiind modul în care IoT, Edge Computing, Cloud Computing, inteligența artificială, big data, Digital Twin și noile interfețe de comunicație sunt combinate pentru integrarea și implementarea conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0.

Capitolul 2 se concentrează pe dezvoltarea și implementarea tehnologiilor de fabricație flexibilă în medii de laborator, bazate pe linii mecatronice cu sisteme cyber-fizice robotice integrate, cum ar fi MCPRS.

Capitolul 3 se axează pe modelarea dinamicii MCPRS integrate în linii de fabricație flexibile de laborator, precum și pe modelarea, gestionarea și controlul MVSS în cadrul fabricației flexibile. Este prezentat și studiat cadrul teoretic și metodele analitice pentru calculul și implementarea cinematicii inverse pentru RM cu 6 și 7 grade de libertate.

Capitolul 4 explorează metodele DT utilizate în monitorizarea și conducerea bazată pe IoT Cloud Control a sistemelor de fabricație flexibilă.

Capitolul 5 abordează integrarea sistemelor de conducere, control și achiziție de date bazate pe Cloud pentru A/DRC, utilizând cinematica inversă, simularea HIL și MongoDB Cloud pentru stocarea datelor istorice.

Capitolul 6 analizează rezultatele prin interpretarea datelor experimentale și simulate colectate, prezentând concluziile-cheie ale abordării propuse, și conturează direcții de cercetare viitoare în domeniul automatizării industriale și al CPRS-urilor.

Capitolul 1

Echipamente, software și concepte asociate Industriei 4.0 și 5.0

1.1. Concepte și tehnologii specifice Industriei și Educației 4.0

Industry 4.0 se caracterizează prin adoptarea unor tehnologii emergente care contribuie la dezvoltarea unor medii de producție inteligente, interconectate și automatizate. Printre aceste tehnologii, un rol central îl joacă IoT și varianta sa industrială, IIoT, care permit echipamentelor fizice să comunice și să schimbe date prin intermediul senzorilor integrați și a sistemelor software avansate. Acest mediu tehnologic avansat facilitează monitorizarea în timp real, mentenanța predictivă și decizii autonome pentru eficiența operațională.

CPS permite această integrare prin conectarea strânsă a echipamentelor fizice cu sisteme computaționale inteligente, facilitând o interacțiune și coordonare continuă între procesele industriale.

Edge computing aduce procesarea datelor mai aproape de sursă, reducând latența și îmbunătățind capacitatea de reacție, în timp ce Cloud Computing oferă acces scalabil la resursele de stocare și calcul din locațiile remote.

AI și Machine Learning (ML) sunt esențiale pentru ca sistemele industriale să poată învăța din datele colectate, să recunoască tipare și să optimizeze operațiunile fără programare explicită. Aceste tehnologii stau la baza conceptului de smart factory, în care device-urile și sistemele interconectate funcționează în armonie pentru a spori productivitatea, flexibilitatea și eficiența.

Utilizarea DT permite crearea unor replici virtuale, dinamice ale sistemelor fizice, oferind inginerilor posibilitatea de a simula, monitoriza și optimiza procesele în timp real, fără a afecta operațiunile reale. Integrarea sistemelor asigură funcționarea coerentă a tehnologiilor și platformelor, maximizând beneficiile automatizării.

Tehnologiile AR și VR sunt utilizate tot mai frecvent pentru instruirea industrială, mentenanță și proiectare, oferind medii interactive și simulative. Roboții autonomi, echipați cu AI și sisteme de navigație bazate pe senzori, execută sarcini complexe în mod independent, îmbunătățind siguranța și reducând timpii de nefuncționare.

Având în vedere dependența tot mai mare de infrastructura digitală, cybersecurity a devenit o preocupare critică, necesitând măsuri robuste pentru protejarea datelor sensibile și asigurarea continuității operaționale. În paralel, Education 4.0 urmărește alinierea practicilor educaționale cu aceste progrese tehnologice, prin integrarea unor instrumente precum AI, VR și Cloud Computing în mediile de învățare, pregătind astfel studenții pentru cerințele industriei moderne.

1.2. Tehnologii și inovații digitale specifice Industriei și Educației 5.0

Industry 5.0 reprezintă un progres firesc al Industry 4.0, punând accent pe integrarea creativității și gândirii critice umane cu tehnologiile avansate, în vederea creării unor sisteme industriale mai sustenabile, robuste și centrate pe om. Această evoluție este ghidată de trei strategii fundamentale: producția centrată pe om, sustenabilitate și reziliență.

Abordarea centrată pe om asigură faptul că progresele tehnologice sunt orientate spre îmbunătățirea capacităților umane, nu spre înlocuirea acestora, favorizând crearea unor medii colaborative în care oamenii și sistemele inteligente lucrează împreună în mod armonios.

Sustenabilitatea în Industry 5.0 asigură protecția mediului, incluzând promovarea principiilor economiei circulare, cum ar fi reducerea deșeurilor, reutilizarea materialelor și regenerarea resurselor, toate acestea fiind aliniate cu obiectivele ecologice pe termen lung.

Strategia de reziliență se concentrează pe construirea unor sisteme capabile să se adapteze la perturbări și să mențină stabilitatea într-un mediu industrial tot mai interconectat și volatil. Tehnologii precum cognitive computing și AI sunt utilizate nu doar pentru automatizare, ci și pentru a sprijini luarea deciziilor umane și eficiența operațională.

Cobots (roboți colaborativi) sunt proiectați pentru a lucra în siguranță alături de oameni, preluând sarcini repetitive sau solicitante din punct de vedere fizic, permițând astfel operatorilor umani să se concentreze pe activități mai complexe și creative. Acești roboți sunt echipați cu senzori smart avansați și capabilități AI care le permit să se adapteze la mediul înconjurător și să asigure o colaborare coerentă și sigură.

Education 5.0 completează aceste transformări industriale prin promovarea învățării interdisciplinare, a creativității și a educației continue. Aceasta integrează tehnologii emergente în procesul educațional pentru a furniza studenților competențele digitale necesare într-un mediu tehnologic în continuă schimbare.

1.3. Tehnologii IoT și software utilizate în modelarea și conducerea liniilor mecatronice multifuncționale asistate de CPRS

În contextul fabricației flexibile, tehnologiile IoT joacă un rol esențial în facilitarea automatizării, monitorizării și optimizării, prin conectarea unei game largi de dispozitive, inclusiv senzori, actuatori și sisteme integrate. Aceste dispozitive colectează și transmit date prin gateway-uri către platforme Cloud, unde sunt procesate și analizate pentru a facilita luarea deciziilor inteligente.

O arhitectură IoT tipică în industrie include senzori inteligenți, dispozitive edge, platforme de Cloud Computing și sisteme SCADA, toate acestea conectate și sincronizate pentru a îmbunătăți eficiența operațională. Senzorii inteligenți, precum camerele HD și senzorii de proximitate, furnizează date în timp real pentru monitorizare și control, în timp ce soluțiile Cloud precum MongoDB oferă capacități avansate de stocare și analiză.

În această teză, MongoDB Cloud este utilizat pentru gestionarea datelor provenite de la senzori, a jurnalelor de producție și ale indicatorilor de performanță ai sistemului, susținând analiza în timp real și redarea istorică a datelor în cadrul aplicațiilor DT. Dispozitivele de edge computing, precum NVIDIA Jetson Nano, procesează datele local pentru a reduce latența și a permite interacțiuni în timp real.

Sistemele SCADA și interfețele om-mașină (HMI) oferă ecrane grafice intuitive pentru monitorizarea și controlul proceselor industriale.

Node-RED este un instrument de programare low-code care facilitează integrarea dispozitivelor și serviciilor IoT, permițând accesul de la distanță în condiții de siguranță pentru vizualizarea datelor de sistem.

Tehnologia A/DRC, descrisă în această teză integrează multiple componente, inclusiv senzori IoT, computere embedded, controlere robotice și platforme și aplicații Cloud, pentru a

crea un mediu DT integrat și robust destinat monitorizării, controlului și optimizării de la distanță a proceselor de fabricație existente în celula robotică.

1.4. Magistrale și protocoale de comunicație utilizate în IoT Cloud Control ale tehnologiilor de fabricație deservite de sisteme robotice integrate

Comunicarea eficientă este esențială pentru asigurarea unei funcționări neîntrerupte a sistemelor industriale interconectate. O varietate de protocoale de comunicație sunt utilizate pentru a asigura schimbul de date securizat, fiabil și în timp real între dispozitive, controlere și platforme Cloud.

Protocoale precum CoAP, AMQP și MQTT sunt utilizate pentru comunicare eficientă și cu un consum redus de resurse în medii cu limitări de performanță.

Modbus TCP este larg utilizat pentru sincronizarea operațiunilor între PLC-uri și sisteme industriale, folosind topologia Ethernet, în timp ce OPC UA oferă un mediu de comunicare independent de platforma folosită facilitând o comunicație standardizată și securizată între diverse echipamente hardware și software.

În cadrul acestei cercetări, OPC UA servește drept modalitate principală de comunicație între modelul DT și PLC, permițând sincronizarea în timp real a semnalelor de la senzori și actuatori. Modbus TCP este utilizat pentru coordonarea sarcinilor între PLC și sistemul robotic autonom (ARS), asigurând execuția precisă și la timp a operațiunilor (Figura 1).

Integrarea dintre Node-RED și OPC UA contribuie semnificativ la creșterea interoperabilității, oferind utilizatorilor posibilitatea de a dezvolta aplicații personalizate, interfețe de control și fluxuri de automatizare care eficientizează procesele industriale și facilitează comunicarea cu dispozitivele și sistemele conectate.

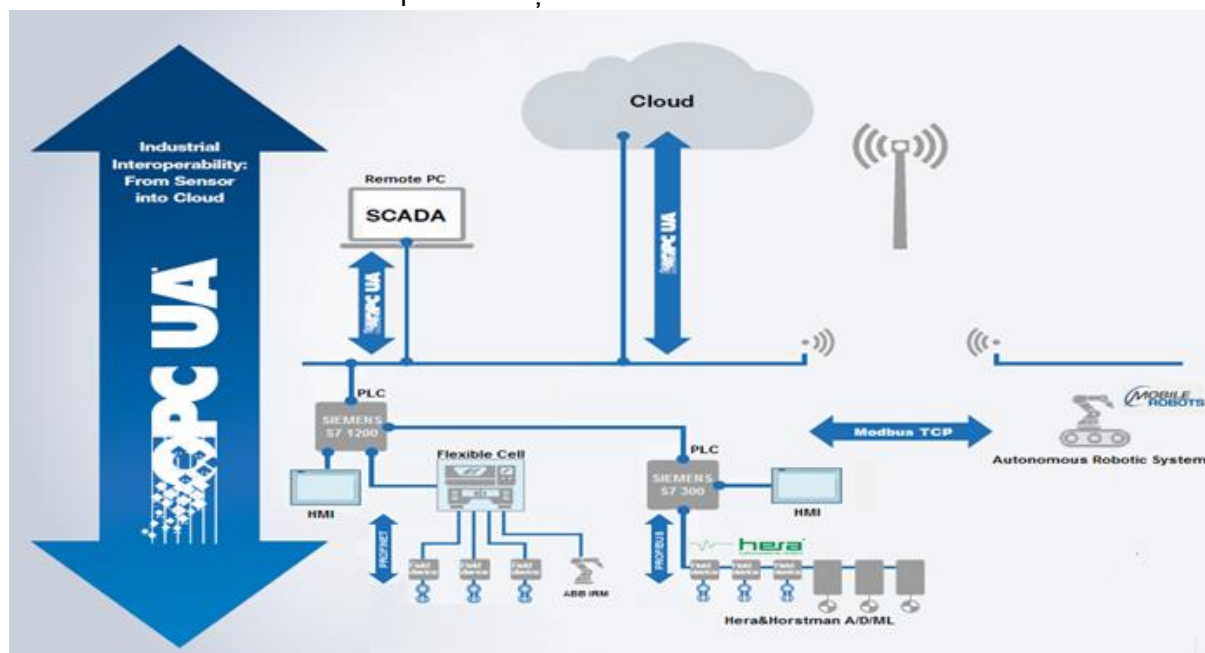


Figura 1. Structura de comunicație pentru A/D/RML Hera & Horstmann și FC cu ABB 120 IRM.

PROFINET, este un protocol bazat pe Ethernet, este utilizat pentru conectarea PLC-ului, HMI-ului și controler-ului robotului ABB, susținând schimbul structurat de date și controlul precis al mișcării. Aceste protocoale permit, împreună, o comunicare robustă, scalabilă și securizată în cadrul sistemului de fabricație flexibilă.

1.5. Concluzii

Integrarea tehnologiilor IoT, a soluțiilor de automatizare și a protocoalelor de comunicație, a transformat fundamental sistemele standard de fabricație în medii dinamice, adaptive și inteligente. Aceste progrese susțin dezvoltarea sistemelor de fabricație flexibilă, capabile să efectueze atât operațiuni de asamblare, cât și dezasamblare, reparare și recuperare, extinzând astfel ciclul de viață al echipamentelor și sistemelor industriale existente, promovând practici sustenabile.

Tehnologiile IoT permit colectarea, monitorizarea și controlul datelor în timp real la toate nivelurile procesului de producție, în timp ce edge computing și integrarea Cloud sporesc capacitatea de reacție și scalabilitatea. Utilizarea protocoalelor de comunicație standardizate precum OPC UA, PROFINET și Modbus TCP asigură schimbul de date securizat și sincronizat, sprijinind aplicații avansate precum VC și simulările Hardware-in-the-Loop (HIL).

Lucrarea de față propune un cadru de comunicație integrat, menit să sprijine operarea și optimizarea în timp real a unui sistem flexibil de fabricație robotică. Prin corelarea infrastructurii tehnice cu principiile adaptabilității, sustenabilității și colaborării om-robot, această cercetare contribuie la conturarea unui mediu industrial caracterizat prin inteligență sporită, reziliență și responsabilitate ecologică.

Capitolul 2

Tehnologii de fabricație flexibilă utilizate pe linii mecatronice de laborator, asistate de sisteme robotice cyber-fizice

2.1. Caracteristici ale sistemelor multifuncționale de fabricație flexibilă

Conceptul de flexibilitate în sistemele de fabricație reprezintă o caracteristică esențială pentru operațiunile industriale moderne, în special în cadrul conceptelor Industry 4.0 și 5.0. Flexibilitatea se referă la capacitatea unui sistem de a se adapta la modificări în proiectarea produsului, volumul de producție și configurația procesului, fără timpi morți semnificativi sau necesitatea reconfigurării echipamentelor.

Multifuncționalitatea amplifică această adaptabilitate prin capacitatea unui singur sistem sau proces, de a executa o varietate de sarcini - precum asamblare, dezasamblare, inspecție și reparare - în cadrul aceluiași mediu de producție. Aceasta este realizată prin integrarea stațiilor de lucru modulare, a automatizării programabile și a sistemelor de control inteligente.

Reversibilitatea permite sistemelor să revină la configurații sau stări anterioare, sprijinind practici sustenabile precum reutilizarea componentelor și reciclarea. Acest aspect este deosebit de important în modelele economiei circulare, unde reducerea deșeurilor și maximizarea eficienței resurselor sunt obiective-cheie.

Repetabilitatea asigură faptul că procesele de fabricație generează rezultate consistente și de înaltă calitate pe parcursul mai multor cicluri de producție. Aceasta caracteristică se poate obține cu echipamente de precizie, monitorizare în timp real și proceduri standardizate.

Deși FMSs oferă numeroase avantaje - inclusiv timpi de livrare reduși, calitate îmbunătățită a produselor și capacitate de reacție sporită - acestea prezintă și dezavantaje. Provocările includ costuri inițiale ridicate, integrare complexă a sistemelor și necesitatea unor operatori calificați. Cu toate acestea, integrarea tehnologiilor precum DT, IoT și AI continuă să îmbunătățească capabilitățile și fiabilitatea FMS.

2.2. Sisteme robotice integrate în liniile de fabricație flexibilă specifice Industriei 4.0. Rolul roboților industriali în producția inteligentă (Smart Manufacturing)

Roboții joacă un rol esențial în facilitarea producției inteligente, oferind precizie, scalabilitate și adaptabilitate. În Industry 4.0, roboții nu sunt doar automatizați, ci și inteligenți, capabili să ia decizii în timp real pe baza datelor provenite de la senzori și integrați cu platforme Cloud pentru analize predictive pentru optimizarea proceselor.

2.2.1. Manipulatorul robotic industrial ABB 120 IRM cu 6 grade de libertate

Manipulatorul robotic ABB IRB 120 cu 6 grade de libertate (6-DOF) este un robot compact și ușor, ideal pentru spații restrânse și sarcini de înaltă precizie (Figura 2). Este utilizat

pe scară largă în medii de laborator pentru operațiuni de asamblare și dezasamblare, oferind controlul avansat al mișcării și medii de programare prin intermediul software-ului RobotWare. ABB 120 IRM este utilizat în cadrul experimentelor tezei, în celula robotică multifuncțională A/DRC, pentru execuția și gestionarea multiplelor task-uri automate de asamblare și dezasamblare a două piese tehnic distincte în aceeași stație.

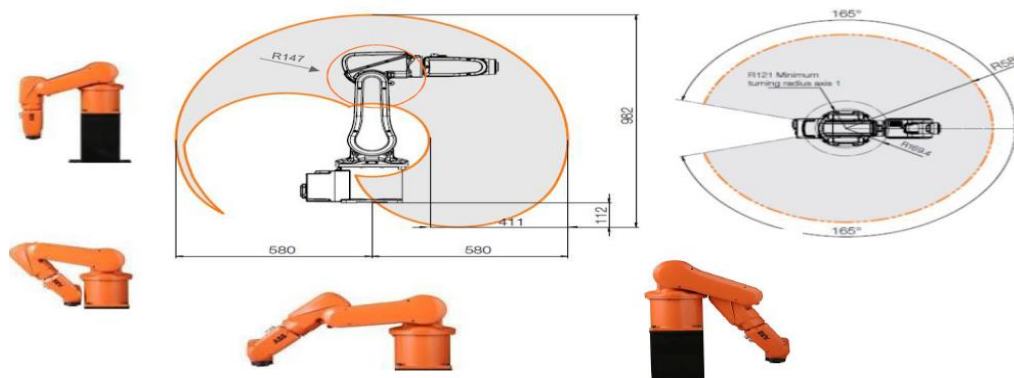


Figura 2. ABB IRB120 6-DOF.

Robotul ABB 120 IRM este controlat prin controller-ul compact ABB IRC5 și software-ul RobotWare, care gestionează controlul mișcării, integrarea sistemului și comunicarea cu dispozitive externe. Datele poziției și orientării end-effector-ului sunt transmise către PLC prin tipul de date *robtarget*, care include informații despre poziție (translation), orientare (rotatie sub formă de quaternioni), configurația axelor robotului și poziția axelor externe. În platforma DT A/DRC reprezentarea rotațiilor se face folosind quaternioni, metodă utilizată în cinematica directă pentru urmărirea precisă a poziției și orientării modelului virtual.

2.2.2. Roboți mobili - PeopleBot WMR

Robotul mobil PeopleBot servește ca platformă mobilă pentru transportul componentelor în cadrul mediilor de fabricație flexibilă de laborator (Figura 3). Echipat cu senzori tip sonar, bare de protecție și un computer integrat, acesta navighează autonom și interacționează cu alte sisteme prin conexiuni Wi-Fi și interfețe SCADA.

Platforma mobilă PeopleBot face parte din familia de roboți mobili autonomi dezvoltată de Mobile Robots, derivat din Pioneer P3-DX, este un robot mobil 2DW/1FW, cu două roți mobile și o roată fixă. PeopleBot este componentă esențială a platformelor CAS și ARS [SP1–SP6], fiind utilizat în medii de fabricație flexibilă pentru transportul autonom al componentelor între stații de lucru, în cadrul unei linii mecatronice A/D/RML. CAS asistă în operațiuni de asamblare, dezasamblare și reparație, în special pentru piesele care nu respectă standardele de calitate [SP6]. Integrarea robotului mobil PeopleBot în CAS, conform [SP2], evidențiază progresul sistemelor robotice autonome (ARS) în contextul producției flexibile, în concordanță cu principiile Industry 4.0/5.0.

Caracteristici și funcționalități-cheie:

- Arhitectură de Control: Un sistem SCADA pe PC-ul extern procesează datele de poziție și transmite comenzile de control către robot, sincronizând operațiile cu PLC-ul A/D/RML [SP2].

- Integrare Software: Conducerea robotului este realizată prin pachetul ARIA (Advanced Robotic Interface for Applications), iar algoritmul TTSMC este utilizat pentru conducerea de tip Trajectory-Tracking bazată pe modelul cinematic utilizând o arhitectură de tip FOSMC.
- Simulare și Testare: Software-ul MobileSim permite simularea operațiunilor robotului, facilitând testarea strategiilor de control și planificarea traiectoriilor într-un mediu virtual.

2.2.3. Manipulatorul robotic Cyton cu 7 grade de libertate

Cyton Gamma 1500 este un manipulator robotic (RM) cu 7 grade de libertate (DOF), ușor și de înaltă precizie, proiectat pentru sarcini versatile de manipulare (Figura 3). Cu o greutate de 3 kg, poate manipula obiecte de până la 1500 g, având o rază maximă de acțiune de 68 cm. Manipulatorul robotic Cyton cu 7 grade de libertate (7-DOF) oferă un nivel suplimentar de flexibilitate datorită razei sale extinse de acțiune și preciziei ridicate. Este deosebit de eficient în operațiuni de tip „pick and place” și poate fi îmbunătățit prin integrarea unui sistem de servoing vizual (Visual Servoing System - VSS), constând într-o cameră HD montată pe efectorul final, care permite identificarea și manipularea obiectelor în timp real. Acest sistem permite detecția precisă a obiectelor, prinderea, manipularea și eliberarea acestora. Datorită flexibilității ridicate, algoritmilor avansați de control și integrării cu sisteme de viziune, Cyton Gamma 1500 este ideal pentru aplicații de cercetare, automatizare și robotică de laborator care necesită precizie și adaptabilitate.



Figura 3. PeopleBot WMR cu braț robotic Cyton cu 7 grade de libertate (7-DOF).

2.3. Tehnologii MCPRS utilizate în linii de fabricație de laborator

Sistemele Mobile MCPRS și ACPS sunt platforme inteligente utilizate în tehnologiile de fabricație. Aceste sisteme combină roboți mobili, roboți manipulatori și sisteme de viziune pentru a executa sarcini complexe în mod autonom.

Un sistem robotic autonom – ARS, include, de regulă, un robot mobil (precum PeopleBot), un braț robotic (de exemplu, Cyton 1500) și un sistem de servoing vizual. Aceste componente colaborează pentru a realiza sarcini precum recuperarea, transportul și plasarea componentelor, toate coordonate prin protocoale de comunicație și sisteme centralizate de monitorizare și control SCADA.

Sistemele autonome complexe – CAS, extind acest concept prin integrarea mai multor unități autonome care colaborează pentru îndeplinirea sarcinilor. Aceste sisteme sunt ideale pentru medii dinamice, unde flexibilitatea și coordonarea sunt esențiale.

ACPS sunt proiectate pentru un grad ridicat de autonomie și configurabilitate, integrând senzori, actuatori și sisteme de calcul pentru a permite luarea deciziilor în timp real și controlul adaptiv. Aceste sisteme sunt deosebit de utilizate în linii de mecatronică de laborator pentru testarea și validarea strategiilor avansate de fabricație.

2.3.1. Sistem Robotic Autonom (ARS)

Un ARS, este compus dintr-un RM montat pe o platformă mobilă (WMR), reprezentând o aplicație robotică avansată, mobilă și autonomă, care integrează mai multe tehnologii emergente: robotică, AI și senzori smart pentru a permite executarea independentă a sarcinilor, fără intervenție umană continuă.

În cadrul liniei de mecatronică de laborator A/D/RML Hera & Horstmann, ARS este utilizat pentru testarea și implementarea de metode de analiză, optimizare și echilibrare a sistemelor de fabricație flexibilă (FMS). Acesta este compus din:

- Cyton Gamma 1500 RM cu 7 DOF, echipat cu sistem de servoing vizual *eye-in-hand* (VSS) și cameră HD, conectate prin Wi-Fi la un PC de control;
- WMR PeopleBot, cu configurație 2DW/1FW, echipat cu sistem odometric și microcontroller integrat pentru comunicare wireless.

ARS efectuează operațiuni de tip *pick-and-place* pentru manipularea componentelor recuperate în urma inspecției de calitate, transportându-le către locații de stocare prestabilite. Controlul este realizat printr-o comunicație wireless cu router integrat în WMR iar conducerea robotului mobil este realizată în ARIA API, software care rulează pe același PC care gestionează și Cyton RM.

Sistemul funcționează pe baza a trei bucle de control:

1. Bucle de sincronizare PLC - ARS, prin semnale Modbus TCP;
2. Controlul sistemului VSS, bazat pe algoritmi dezvoltați în OpenCV pentru procesare de imagine în timp real;
3. Controlul mișcării WMR, utilizând algoritmul TTSMC și funcții din cadrul ARIA.

2.3.2. Sistem Autonom Complex (CAS)

Un CAS este un sistem mobil avansat, compus din mai multe unități autonome, WMR-uri echipate cu RM-uri, care colaborează și se coordonează pentru a atinge obiective de

poziționare, orientare și manipulare a obiectelor, în medii adesea dinamice sau imprevizibile. În contrast cu ARS, care este o unitate robotică individuală ce funcționează autonom, CAS implică interacțiunea și cooperarea între mai mulți agenți autonomi, fiind adecvat pentru aplicații complexe precum cobots, orașe inteligente sau flote autonome.

Un caz specific de laborator, CAS este integrat și deservește o linie de mecatronică Hera&Horstmann de asamblare/dezasamblare și reparație (A/D/RML) integrată cu Celula Flexibilă ABB.

Sistemul CAS include:

- RM Cyton 1500 cu 7 DOF, montat pe platforma mobilă PeopleBot;
- sistem VSS cu cameră HD, conectat prin USB la un PC de control;
- microcontroler integrat, care transmite date de poziție și semnale de control către PC prin Wi-Fi.

Mișcările între pozițiile de parcare, preluare și plasare sunt controlate wireless printr-un router integrat în WMR, utilizând funcții dedicate din cadrul software-ului ARIA și algoritmul de conducere a mișcării TTSMC, pentru navigație precisă și manipulare eficientă. PC-ul de control calculează comenzile și le transmite către CAS, comunicând bidirecțional cu PLC-ul liniei A/D/RML, asigurând sincronizarea operațiunilor. Această arhitectură de control permite CAS să funcționeze autonom și coordonat într-un mediu de producție flexibil, demonstrând aplicabilitatea sa în scenarii avansate de automatizare industrială.

2.3.3. Sisteme robotice cyber-fizice mobile (MCPRS) și sisteme robotice cyber-fizice autonome (ACPS)

În această teză, MCPRS reprezintă o tehnologie multifuncțională destinată în special sistemelor de fabricație flexibilă în medii de laborator, integrând mai multe subsisteme: o linie mecatronică de asamblare/dezasamblare (A/D/RML), o celulă flexibilă A/D FC cu un IRM 6-DOF, precum și un ARS sau CAS compus dintr-o platformă mobilă (WMR) echipată cu un RM și un sistem de servoing vizual și vedere artificială eye-in-hand (VSS) montat pe efectorul final. Toate subsistemele sunt interconectate prin PLC-uri, module de comunicație (cablate și wireless), senzori (inclusiv infraroșii, inductivi, optici) și actuatori electrici și pneumatici.

ACPS este o extensie a MCPRS, având în structură un WMR 2DW/1FW echipat cu un RM Cyton 1500 cu 7 DOF și o cameră HD cu Wi-Fi montată pe efectorul final, utilizată ca senzor vizual în cadrul sistemului mobil de servoing vizual (MVSS). ACPS oferă autonomie, configurabilitate și fiabilitate, asigurând mișcare și poziționare precisă, cu robustețe față de incertitudini structurale și de modelare.

Structura tipică a unui ACPS include:

- WMR cu sistem odometric;
- RM cu funcții de siguranță integrate (anti-coliziune, evitare obstacole);
- senzori sonar, laser și viziune computerizată;
- subsisteme de calcul și comunicație.

Funcționarea eficientă a ACPS necesită integrarea coordonată a componentelor de control, calcul, comunicație și hardware fizic, toate funcționând interdependent. Ca parte a noii generații de sisteme inteligente, ACPS impune o integrare strânsă a capacităților de control, comunicație și calcul pentru a asigura mobilitate superioară, precizie în mișcare, stabilitate, robustețe și eficiență operațională [51–53].

2.4. Linii Mecatronice de laborator multifuncționale asistate de sisteme robotice integrate

2.4.1. Linia de mecatronică modulară, de procesare/reprocesare (P/RML), FESTO MPS-200

Festo MPS 200 este un sistem mecatronic modular flexibil, destinat aplicațiilor de laborator, compus din patru stații de lucru (WS - Workstations) care gestionează procese precum: stocare componente neprelucrate, manipulare, prelucrare, sortare/stocare, reprocesare și eliminare rebuturi (Figura 4). Fiecare stație este controlată de un PLC Siemens S7-300, conectat prin Profibus la un PLC master Siemens S7-1200, responsabil de coordonarea întregului flux de producție. Arhitectura de comunicație a liniei de producție este ilustrată în Figura 5 [54].

Sistemul este asistat de un MCPRS, compus din un WMR PeopleBot (2DW/1FW), un RM Cyton 1500 cu 7 DOF montat pe WMR cu tehnologie MVSS (Mobile Vision Sensor System) pe efectorul final al RM [SP4, SP6, SP11, SP13].

PLC-ul Siemens S7-1200 îndeplinește următoarele funcții:

- coordonarea fluxului de producție între cele patru stații;
- comunicarea de control între stațiile MPS și MCPRS;
- sincronizarea sarcinilor între MPS și MCPRS;
- interfațarea cu sisteme externe prin OPC-UA, WAN-Ethernet și alte protocoale de rețea pentru control SCADA și HMI în Cloud.

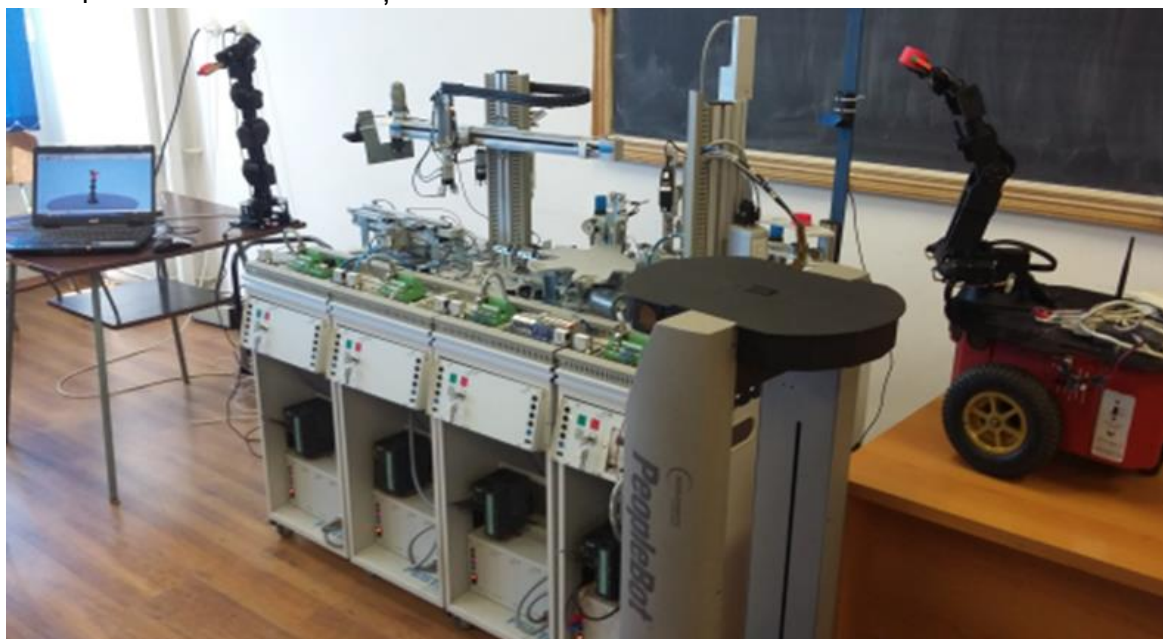


Figura 4. Festo MPS 200, asistat de MCPRS (PeopleBot WMR echipat cu Cyton 1500 RM și MVSS).

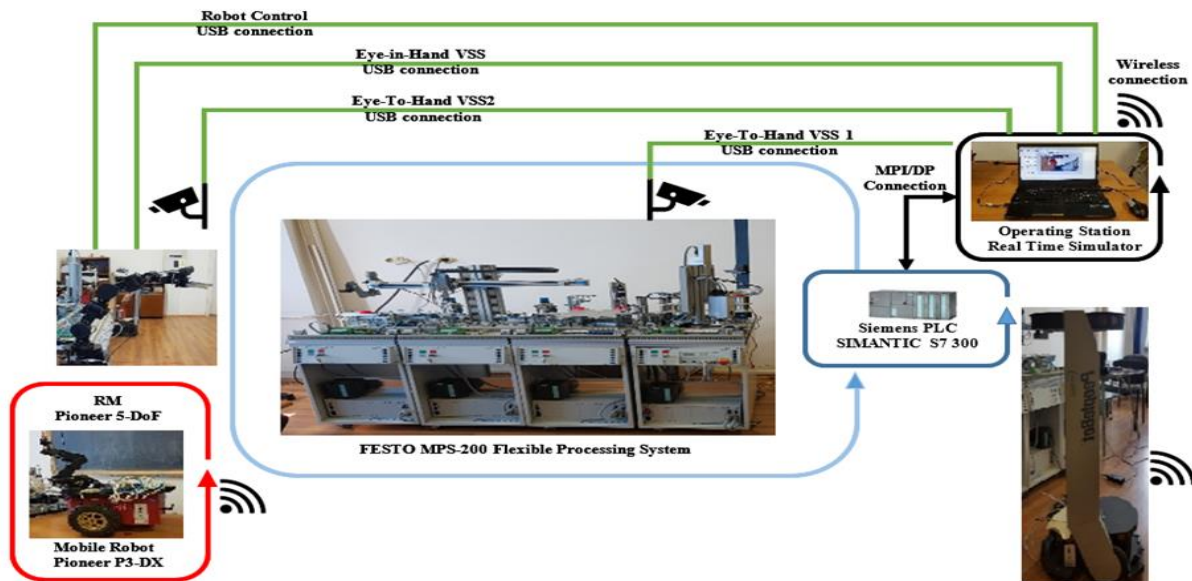


Figura 5. Piesa de lucru (Work Piece) procesată de-a lungul stațiilor MPS-urilor, mișcările MCPRS-ului, preluare și depozitare de RM și MVSS.

2.4.2. Linia de mecatronică Hera&Horstmann de asamblare/dezasamblare și reparație (A/D/RML) integrată cu Celula Flexibilă ABB și deservită de ARS

Sistemul Hera & Horstmann A/D/RML integrează mai multe subsisteme cum ar fi roboți manipulatori, roboți mobili și stații de lucru controlate prin PLC pentru a realiza operațiuni de asamblare, dezasamblare și reparare. Acesta dispune de o arhitectură de control hibridă, atât centralizată cât și distribuită, permițând sincronizarea în timp real și optimizarea proceselor. Structura de bază constă în Linia de mecatronică Hera&Horstmann de asamblare/dezasamblare (A/DML) integrată cu Celula Flexibilă ABB și deservită de ARS. Aceste subsisteme colaborează pentru a executa procese esențiale de fabricație, precum asamblarea produselor, inspecția calității, repararea și dezasamblarea cu recuperarea componentelor (Figura 6).



Figura 6. A/D/RML Hera & Horstmann.

Arhitectura este concepută pentru a fi reconfigurabilă, permițând reversibilitatea operațională, repetabilitatea și, esențial, flexibilitatea - o caracteristică indispensabilă pentru procesele de fabricație (Figura 7). [9]

Pentru sarcinile de dezasamblare și reparație, operațiile de pick-and-place și transport sunt realizate de ARS, echipat cu brațul robotic Cyton RM 7-DoF. Inițial, stația FC, echipată cu ABB 120 IRM, efectuează dezasamblarea sau repararea prin înlocuirea componentelor defecte și plasarea acestora în locații dedicate. Ulterior, ARS preia piesele recuperate pentru transport și le depozitează în locațiile de stocare. Coordonarea dintre PLC-ul master și ARS se bazează pe multiple semnale de sincronizare transmise prin protocolul Modbus TCP, un standard utilizat pe scară largă în automatizarea industrială (vezi Figura 8).

2.4.3. Celula Flexibilă multifuncțională de asamblare și dezasamblare (A/DRC), modelat ca sistem CPRS bazat pe tehnologia IoT

Celula flexibilă (FC) echipată cu ABB 120 IRM este o celulă robotică industrială, compactă, capabilă să execute operații complete de asamblare și dezasamblare. Integrează un braț robotic ABB cu 6-DOF, un PLC, un HMI și sisteme de monitorizare și control SCADA. De asemenea, suportă conectivitate IoT prin dispozitive precum Jetson Nano și Siemens IOT2050 (Figura 9).

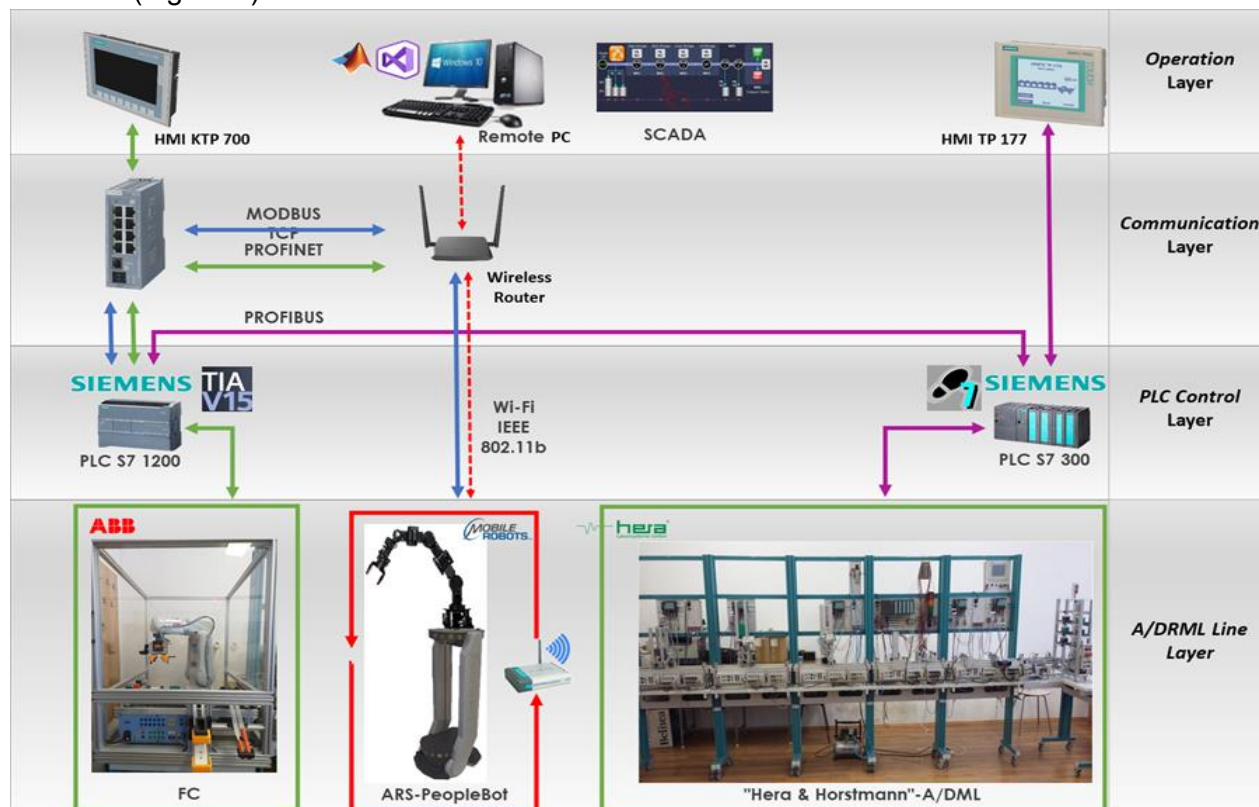


Figura 7. Structura A/DML Hera & Horstmann și a celulei flexibile ABB deservite de ARS.

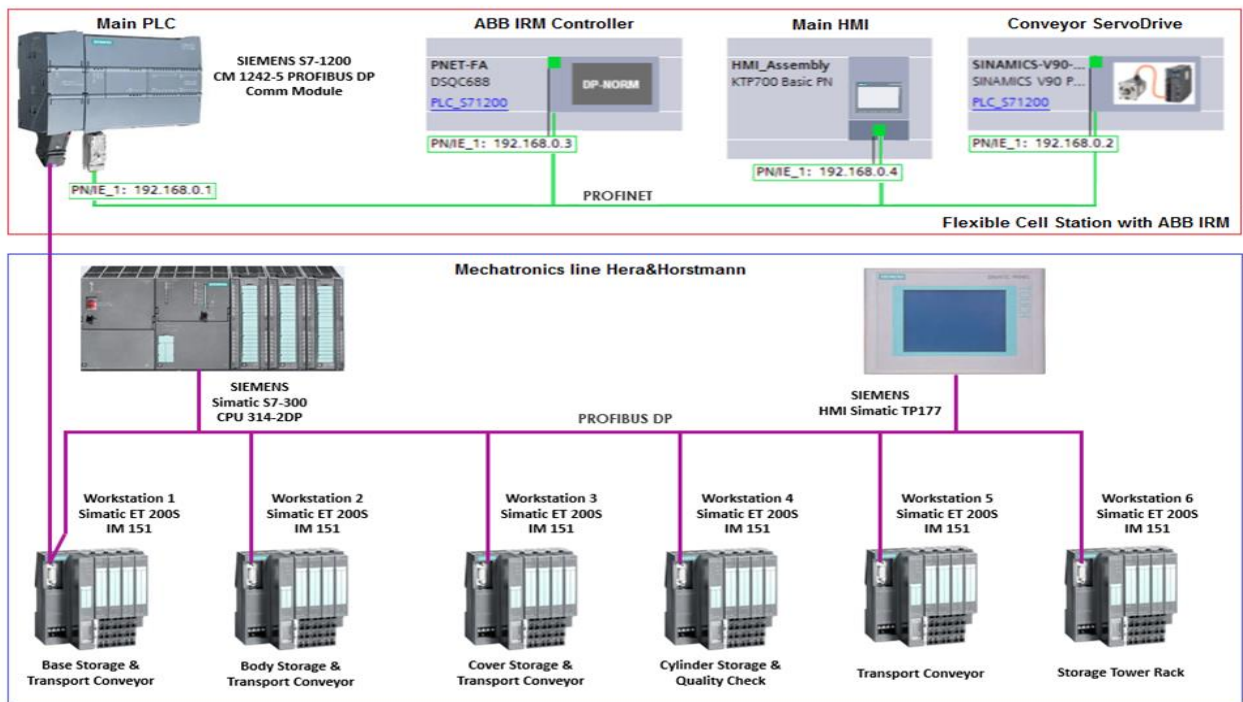


Figura 8. Structura hardware a rețelei PLC din cadrul A/D/RML.

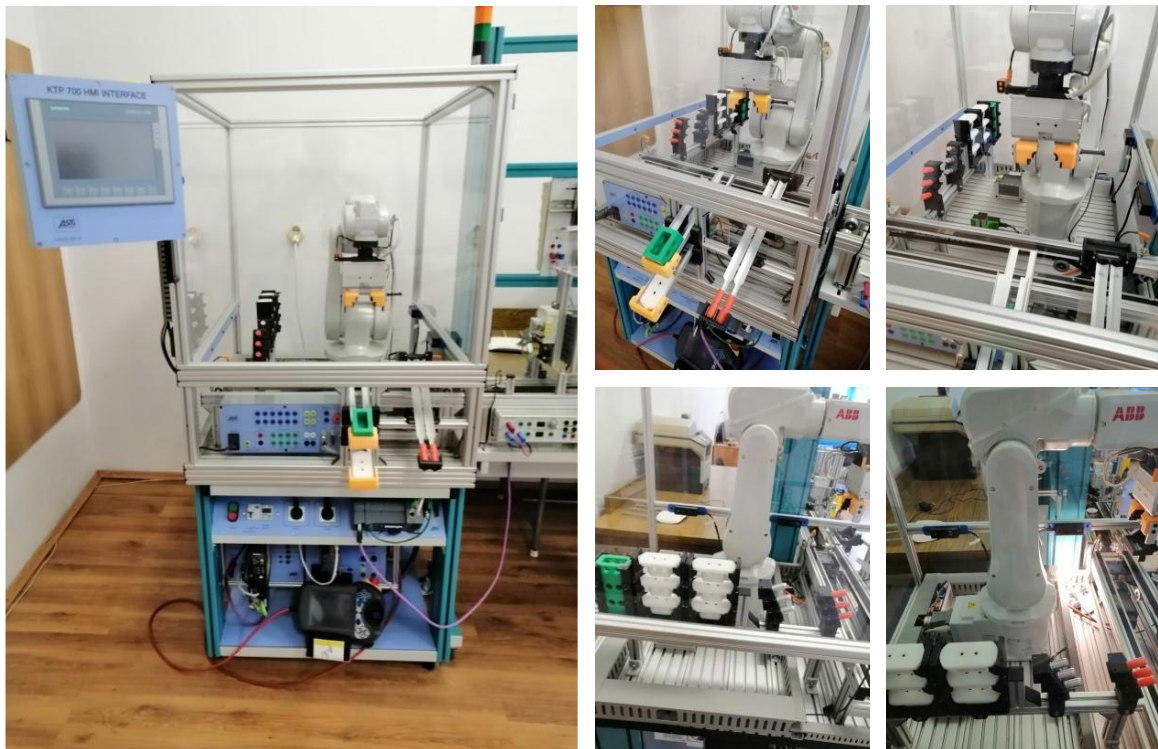


Figura 9. Celula Flexibilă (FC) echipată cu robot ABB IRB cu 6 grade de libertate (6-DOF).

A/DRC, ilustrată în Figura 10, integrează o unitate A/D controlată de un PLC Siemens S7-1200, echipată cu supraveghere SCADA pentru achiziția datelor de câmp I/O și monitorizarea în timp real.

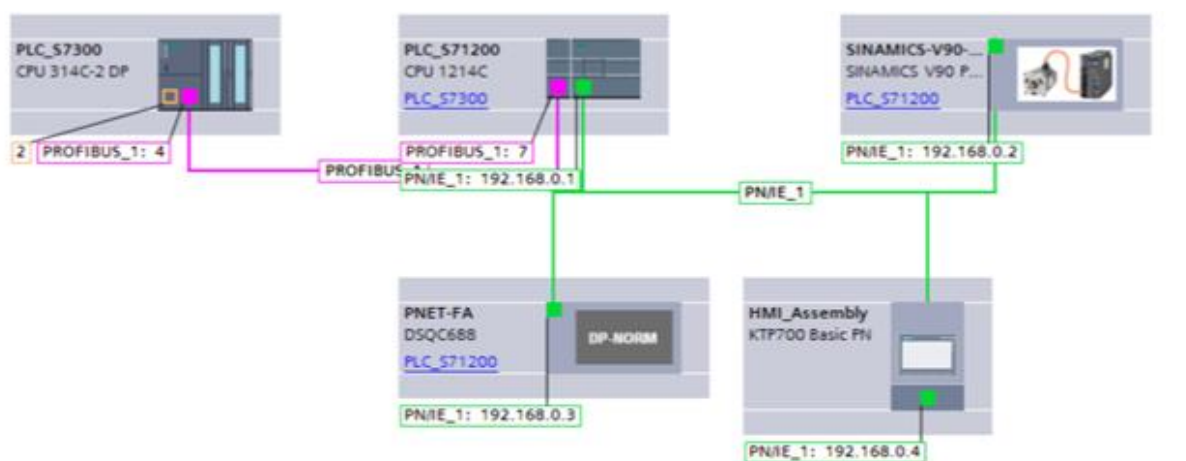


Figura 10. Structura hardware și de comunicație a PLC-ului Siemens S7-1200 din cadrul A/DRC.

2.5. Sisteme servoing vizuale și de vedere artificială utilizate în tehnologiile de fabricație flexibile

Sistemele de servoing vizual (Visual Servoing Systems - VSS) permit roboților să execute mișcări precise pe baza feedback-ului vizual. Aceste sisteme utilizează camere video - adesea montate pe efectorul final al robotului (eye-in-hand) - pentru a capta imagini în timp real ale mediului de lucru. Imaginile și datele obținute sunt procesate pentru a extrage caracteristici precum poziția și orientarea obiectelor, care sunt apoi utilizate pentru a ghida acțiunile RM-ului.

În această teză, un sistem Hybrid Visual Servoing (HVS) de tip eye-in-hand este implementat pe brațul robotic Cyton 1500 (Figura 11). Sistemul utilizează momente de imagine și puncte de interes pentru a urmări obiectele și a ghida mișcările robotului. Procesarea imaginilor în timp real este realizată cu ajutorul librăriei OpenCV pe un computer embedded, model Jetson Nano, permițând un control precis și adaptiv în medii dinamice.

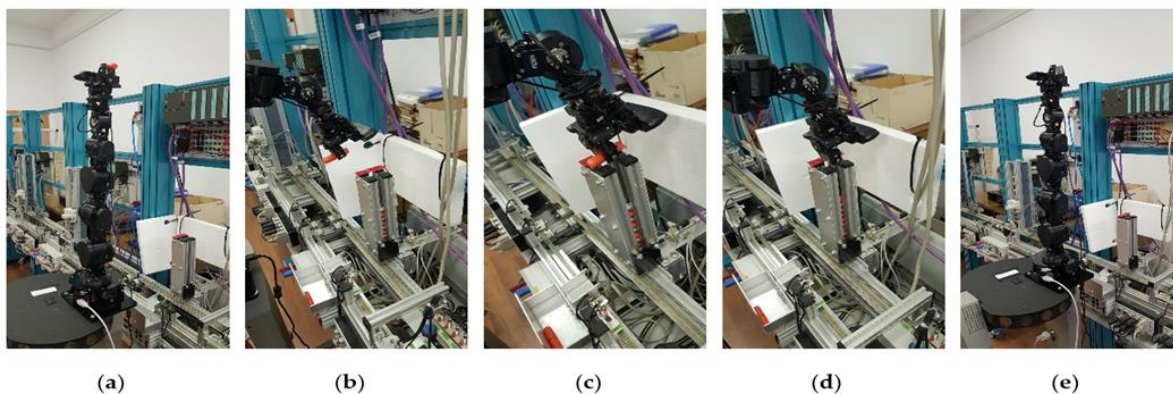


Figura 11. Controlul în timp real al brațului robotic Cyton RM, plasarea unei componente în depozitul de cilindri cu următoarele acțiuni: (a) parcare cu obiectul în gripper, (b) poziționare pentru scanare, (c) deplasare deasupra depozitului, (d) plasarea piesei.

Sistemul de servoing vizual eye-in-hand VSS este proiectat pentru a asista poziționarea brațului robotic (RM) prin procesare de imagine, calculând și minimizând eroarea dintre

caracteristicile reale și cele dorite, extrase de senzorul video [16, 68, 70]. Figura 12 ilustrează diagrama buclei de control VSS, bazată pe o arhitectură orientată pe imagine. Pentru efectuarea operațiilor în A/DRML folosind informațiile colectate din procesarea imaginilor, ARS este echipat cu un braț robotic Cyton RM 7-DOF, prevăzut cu un gripper tip paddle și o cameră video HD montată pe efectorul final (Figura 11). Atât RM, cât și camera comunică cu PC-ul de la distanță prin conexiuni Wi-Fi USB.

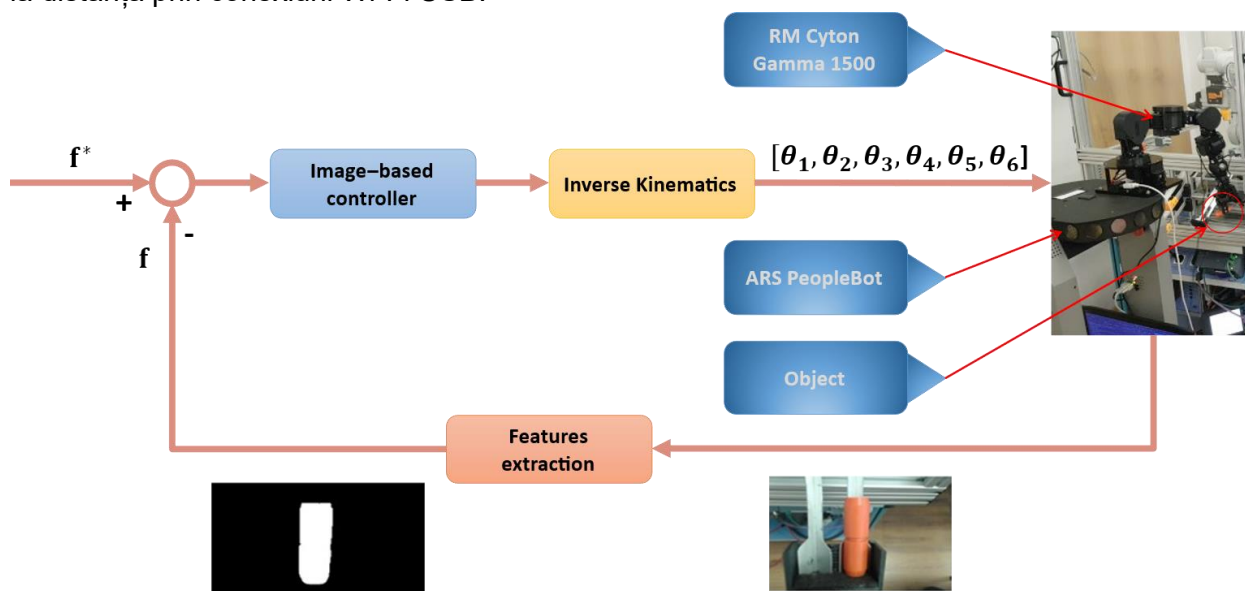


Figura 12. Control în buclă închisă al brațului robotic Cyton RM, bazat pe sistemul de viziune de tip eye-in-hand VSS.

2.6. Rezultate și Contribuții Științifice

Acest capitol oferă o analiză detaliată a tehnologiilor de fabricație flexibilă în medii de laborator, punând accent pe integrarea sistemelor robotice, a platformelor mobile și a tehnologiilor de servoing vizual și vederea artificială VSS. Cercetarea demonstrează modul în care aceste componente pot fi combinate pentru a crea sisteme de fabricație multifuncționale, reversibile și repetabile, aliniate cu obiectivele Industry 4.0 și 5.0.

Contribuțiile principale includ:

- Proiectarea și implementarea unor structuri de fabricație flexibilă capabile să execute atât operațiuni de asamblare, cât și de dezasamblare, utilizând aceeași stație de lucru.
- Integrarea platformelor **MCPRS** cu capabilități autonome de navigație și manipulare.
- Implementarea arhitecturilor de control distribuit pentru a spori autonomia și capacitatea de reacție a sistemului.
- Aplicarea **VSS** pentru feedback vizual și control robotic în timp real.
- Utilizarea protocoalelor de comunicație industrială (de ex. **OPC UA**, **MQTT**, **Modbus**, **PROFINET**) pentru a asigura integrarea și interoperabilitatea sistemelor.

Capitolul 3

Modelarea și conducerea sistemelor robotice cyber-fizice mobile integrate pe linii de fabricație flexibile de laborator

3.1. Deservirea sistemelor de fabricație flexibilă de către sisteme robotice cyber-fizice fixe și mobile

Integrarea sistemelor CPRS în mediile moderne de producție reprezintă un salt semnificativ în evoluția automatizării industriale. Aceste sisteme, care combină echipamente fizice cu inteligență algoritmică avansată integrată, esențial pentru realizarea conceptelor Industry 4.0 și a emergentei Industry 5.0.

În mod particular, MCPRS - care constă în WMRs echipați cu roboți manipulatori - permit un nou nivel de flexibilitate și capacitate de reacție. Aceste sisteme pot naviga autonom în cadrul unei facilități de producție, pot interacționa cu noduri CPS fixe, precum stații de asamblare sau unități de inspecție, și pot realoca dinamic sarcinile pe baza datelor în timp real.

Cercetarea prezentată în acest capitol demonstrează modul în care sisteme la scară de laborator, precum Hera & Horstmann A/DML și FESTO MPS-200, pot fi transformate în medii de producție inteligente și flexibile prin integrarea CPRS. Aceste sisteme susțin fluxul bidirecțional al componentelor, permițând ca operațiuni precum dezasamblarea, reparația și reasamblarea să fie declanșate automat pe baza feedback-ului din controlul calității. De exemplu, dacă un produs eșuează la inspecție, un CPS mobil poate fi programat pentru a recupera componenta defectă și a o transporta către o stație de reprocesare - totul fără intervenție umană.

Arhitectura acestor sisteme este, în mod inerent, multi-stratificată, cu unități CPS fixe (de exemplu, brațe robotice, PLC-uri, senzori inteligenți) care colaborează cu agenți CPS mobili. Comunicarea este facilitată prin protocoale industriale precum OPC UA, Modbus TCP și PROFINET, asigurând operațiuni sincronizate și schimb de date în flux continuu.

3.2. Modelarea și simularea unei celule robotice de asamblare și dezasamblare (A/DRC) echipată cu manipulator robotic ABB 120 IRM, utilizând cinematica inversă

3.2.1. Modelarea cinematicii directe a robotului manipulator ABB 120 IRM

Manipulatorul robotic ABB 120 IRM este un robot compact și de înaltă precizie, cu 6 grade de libertate (6-DOF), utilizat pe scară largă în aplicații de laborator și industriale. Mișcarea sa este descrisă prin intermediul cinematicii directe, care implică calcularea poziției și orientării efectorului final pe baza unghiurilor cunoscute ale articulațiilor. Acest lucru se realizează prin utilizarea matricelor de transformare omogene și a convenției Denavit-Hartenberg (DH), care oferă o metodă standardizată de reprezentare a lanțului cinematic al robotului, definit ca relație matematică între poziția și orientarea robotului și coordonatele articulațiilor acestuia (Figura 13). Această metodă necesită doar patru parametri scalari pentru a reprezenta fiecare articulație a robotului, conform specificațiilor produsului IRB 120.

Semnificația parametrilor DH pentru fiecare articulație al robotului este următoarea:

- θ_i - unghiul de rotație în jurul axei Z_{i-1} , care variază în funcție de mișcarea articulației, între axa X_{i-1} și axa X_i ;
- d_i - distanța de translație a originii sistemului de coordonate O_i de-a lungul axei Z_{i-1} , față de cadrul de referință anterior;
- α_i - unghiul de rotație între axele Z_{i-1} și Z_i , efectuat în jurul axei X_i ;
- a_i - distanța de translație a originii O_i de-a lungul axei X_i .

Pentru a reprezenta modul în care cadrul de coordonate Σ_{i-1} trebuie rotit și translatat pentru a obține cadrul de referință al următorului element mobil Σ_i , se utilizează matricea de transformare omogenă T_i asociată fiecărei articulații i , corespunzătoare gradului de libertate exprimat prin unghiul θ_i . Fiecare matrice de transformare este o funcție de θ_i , și exprimă relația dintre cadrul Σ_i și cadrul precedent Σ_{i-1} , începând de la cadrul inițial Σ_0 . Astfel, utilizând parametrii Denavit-Hartenberg, matricea T_i poate fi exprimată [7] după cum urmează:

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) * \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) * \sin(\theta_i) & a * \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) * \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) * \cos(\theta_i) & a * \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Parametrii D-H prezentați în Tabelul 1, care definesc caracteristicile cinematice ale manipulatorului, sunt integrați în matricile de transformare omogenă – denumite și transformări relative – pentru a genera matricile de transformare între articulații, corespunzătoare fiecărui cadru de referință și fiecărei dimensiuni [SP8] (Figuri 14,15). Aceste matrici realizează maparea coordonatelor de la elementul $i - 1$ la elementul i .

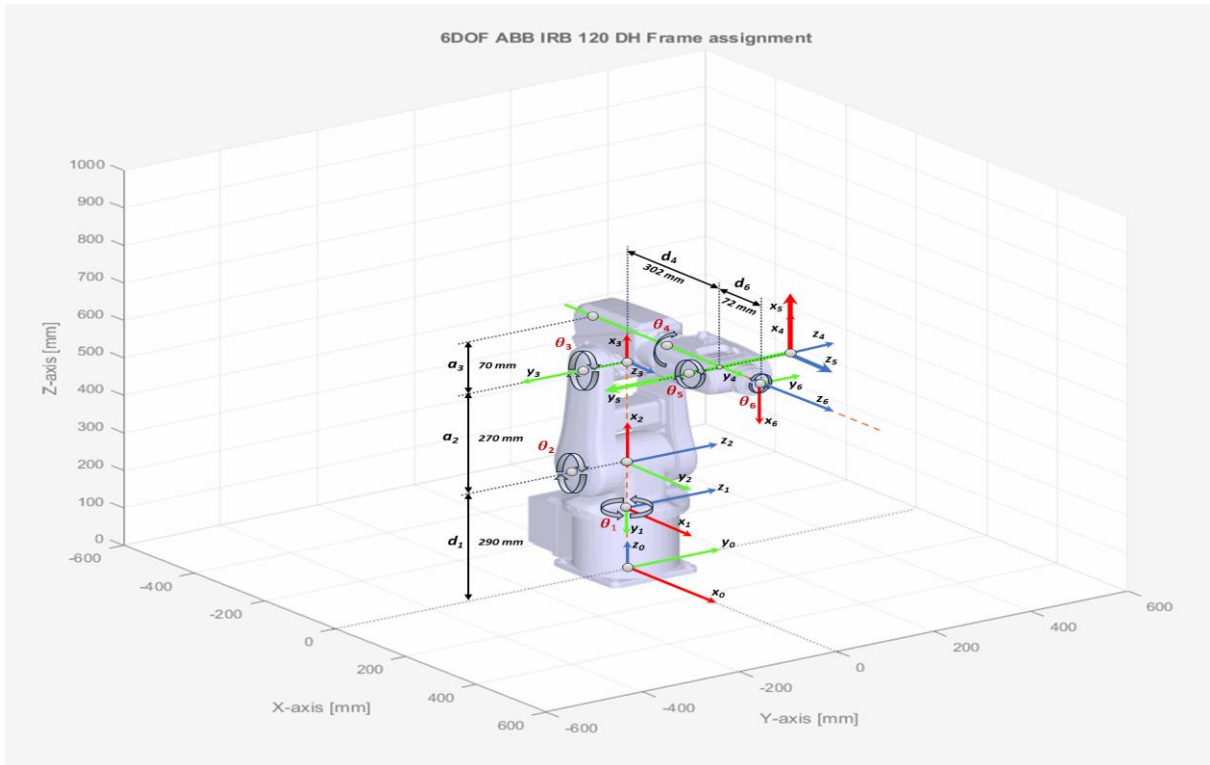


Figura 13. Atribuirea cadrelor de referință și a sistemelor de coordonate conform DH, pentru robotul ABB 120 IRM.

Tabel 1. Parametrizarea Denavit-Hartenberg (D-H) a robotului ABB IRB 120 IRM utilizată pentru determinarea matricei de transformare omogenă

Joint	$\alpha_i [^\circ]$	$a_i [mm]$	$\theta_i [^\circ]$	$d_i [mm]$
$T_1(\theta_1)$	$-\pi/2$	0	θ_1	$d_1=290$
$T_2(\theta_2)$	0	$a_2=270$	$\theta_2-\pi/2$	0
$T_3(\theta_3)$	$-\pi/2$	$a_3=70$	θ_3	0
$T_4(\theta_4)$	$\pi/2$	0	θ_4	$d_4=302$
$T_5(\theta_5)$	$-\pi/2$	0	θ_5	0
$T_6(\theta_6)$	0	0	$\theta_6+\pi$	$d_6=72$

$${}^0T_1(\theta_1) = \begin{bmatrix} {}^0R_z(\theta_1) & {}^0P(\theta_1) \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1T_2(\theta_2) = \begin{bmatrix} {}^1R_y(\theta_2) & {}^1P(\theta_2) \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2T_3(\theta_3) = \begin{bmatrix} {}^2R_y(\theta_3) & {}^2P(\theta_3) \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & 0 & \sin(\theta_3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_3) & 0 & \cos(\theta_3) & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3T_4(\theta_4) = \begin{bmatrix} {}^3R_x(\theta_4) & {}^3P(\theta_4) \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_4 \\ 0 & \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^4T_5(\theta_5) = \begin{bmatrix} {}^4R_y(\theta_5) & {}^4P(\theta_5) \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & \sin(\theta_5) & L_6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_5) & 0 & \cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^5T_6(\theta_6) = \begin{bmatrix} {}^5R_x(\theta_6) & {}^5P(\theta_6) \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_7 \\ 0 & \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_6) & \cos(\theta_6) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

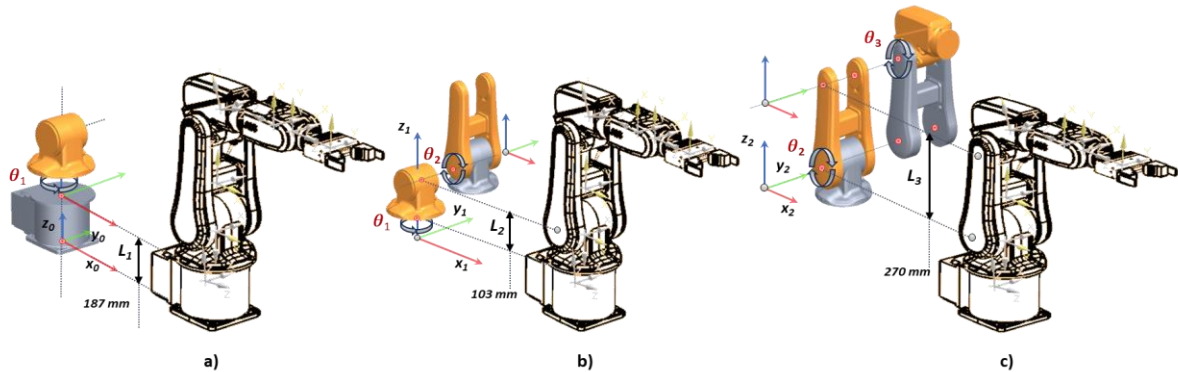


Figura 14. Transformările dintre cadrele și coordonatele articulațiilor robotului ABB 120 IRM: a) cadrul Σ_0 la cadrul Σ_1 ; b) cadrul Σ_1 la cadrul Σ_2 ; c) cadrul Σ_2 la cadrul Σ_3 .

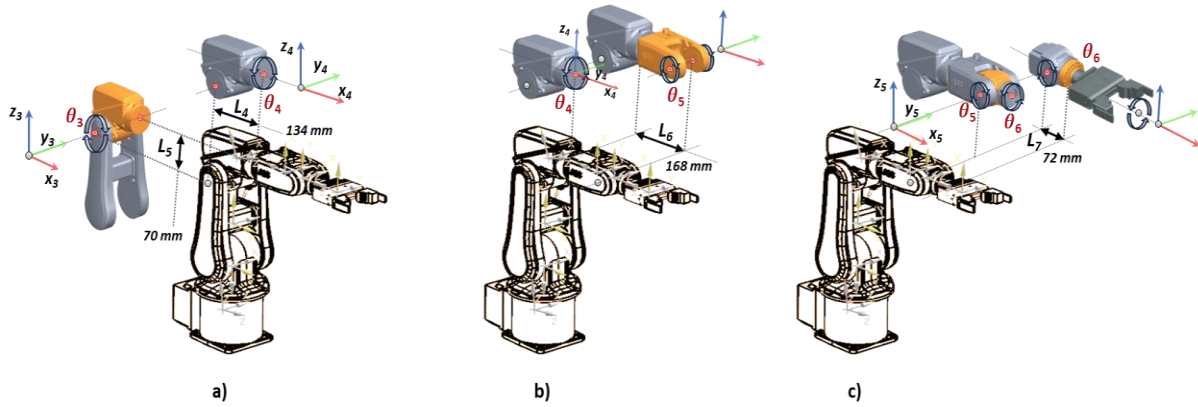


Figura 15. Transformările dintre cadrele și coordonatele articulațiilor robotului ABB 120 IRM: a) cadrul Σ_3 la cadrul Σ_4 ; b) cadrul Σ_4 la cadrul Σ_5 ; c) cadrul Σ_5 la cadrul Σ_6 .

Abordarea algebrică a cuplării cinemate poate fi exprimată sub forma unei concatenări matriciale succesive, prin înmulțirea celor șase matrici de transformare conform convenției D-H. Astfel, se obține transformarea completă de la origine până la efectorul final al RM.

$${}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2.2. Modelarea cinematicii inverse a robotului manipulator ABB 120 IRM

Cinematica inversă reprezintă procesul de determinare a unghiurilor necesare pentru a atinge o anumită poziție și orientare a RM. Se utilizează o abordare geometrică, care simplifică problema prin decuplarea acesteia în două subprobleme: poziție și orientare.

- **Calculul poziției:** utilizând ${}^3T_6$, se determină centrul încheieturii (wrist center), respectiv punctul de intersecție al axelor primelor trei articulații (Figurile 16,17).
- **Calculul orientării:** orientarea efectorului final în raport cu wrist este determinată utilizând a doua matrice ${}^3T_6$, care descrie transformarea de orientare realizată de ultimele trei articulații ce formează încheietura sferică.

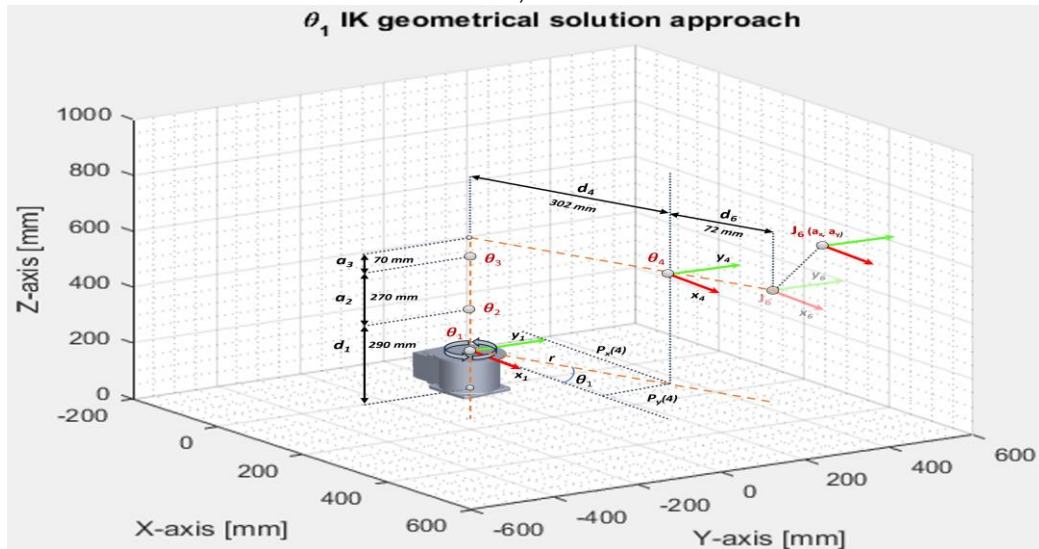


Figura 16. Determinarea geometrică a unghiului articulației θ_1

Această metodă generează soluții multiple, reflectând capacitatea robotului de a atinge aceeași poziție prin configurații diferite. Soluția optimă este selectată pe baza unor criterii precum constrângerile mecanice, limitele articulațiilor și cerințele specifice sarcinii. Această abordare este potrivită pentru aplicații de control în timp real, unde eficiența computațională și precizia sunt esențiale.

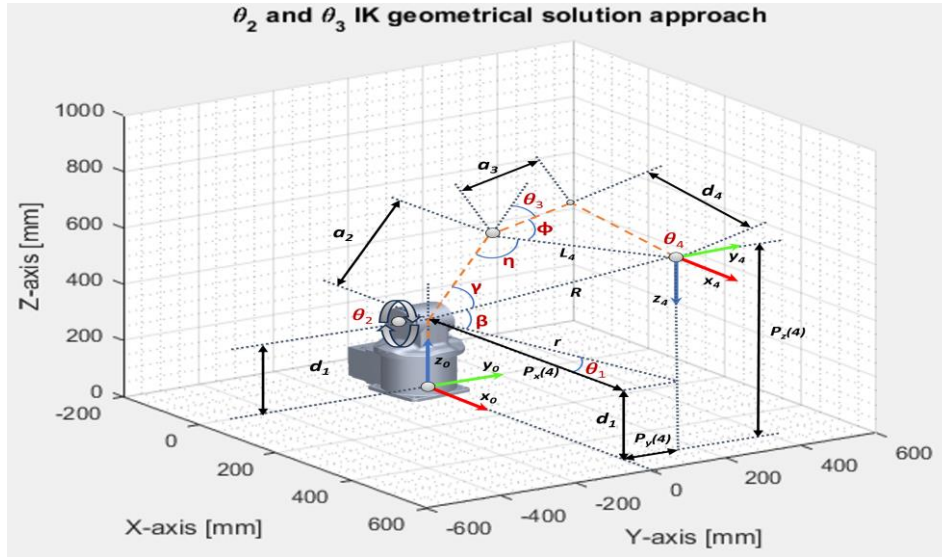


Figura 17. Soluția geometrică pentru articulațiile θ_2 and θ_3 .

Determinarea unghiurilor ($\theta_4, \theta_5, \theta_6$) se face calculând matricea:

$${}^3_6R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_4 \cdot C_5 \cdot C_6 - S_4 \cdot S_6 & -C_4 \cdot C_5 \cdot S_6 - S_4 \cdot C_6 & C_4 \cdot S_5 \\ S_4 \cdot C_5 \cdot C_6 + C_4 \cdot S_6 & -S_4 \cdot C_5 \cdot S_6 + C_4 \cdot C_6 & S_4 \cdot S_5 \\ -S_5 \cdot C_6 & S_5 \cdot S_6 & C_5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.2.3. Simularea mișcării cu cinematică inversă a ABB 120 IRM

Simulările realizate în MATLAB și ABB RobotStudio validează acuratețea modelului cinematic invers implementat. Mișcarea robotului este reprodusă într-un mediu DT, demonstrând că modelul virtual reflectă fidel comportamentul robotului fizic. Rezultatele simulării confirmă faptul că DT oferă o aproximare fiabilă a mișcării robotului, constituind un instrument valoros pentru proiectarea, testarea și optimizarea sistemelor (Figura 18).

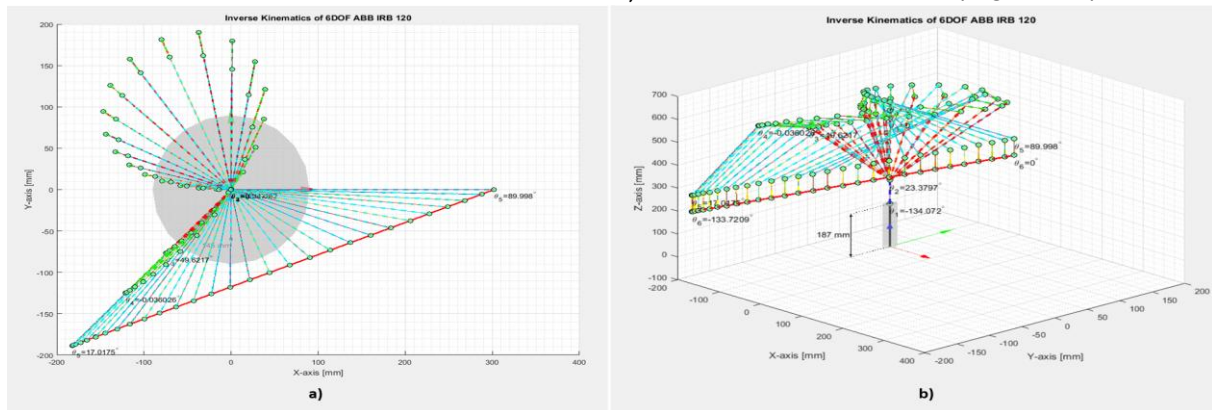


Figura 18. Simularea mișcării robotului in MATLAB: a) Vedere de sus; b) Vedere izometrică.

3.3. Modelarea și conducerea sistemelor robotice mobile cyber-fizice (MCPRS) utilizate la deservirea tehnologiilor de fabricație

3.3.1. Modelarea și conducerea roboților mobili (WMR)

Controlul roboților mobili WMR, precum PeopleBot, se bazează de regulă pe modele cinematice, datorită complexității modelării dinamice și a limitărilor controlerelor integrate. În această cercetare este implementată o strategie de conducere de tip Trajectory Tracking Sliding Mode Control (TTSMC), care asigură urmărirea precisă a traiectoriei, în ciuda incertitudinilor și perturbațiilor externe. Sistemul de control utilizează un model virtual pentru a genera traiectoria dorită și o compară cu poziția reală a robotului pentru a calcula erorile de urmărire (Figura 19). Utilizarea tehnicilor First-Order Sliding Mode Control (FOSMC) și Second-Order Sliding Mode Control (SOSMC) îmbunătățesc suplimentar capacitatea sistemului de a respinge perturbațiile și de a menține o urmărire precisă.

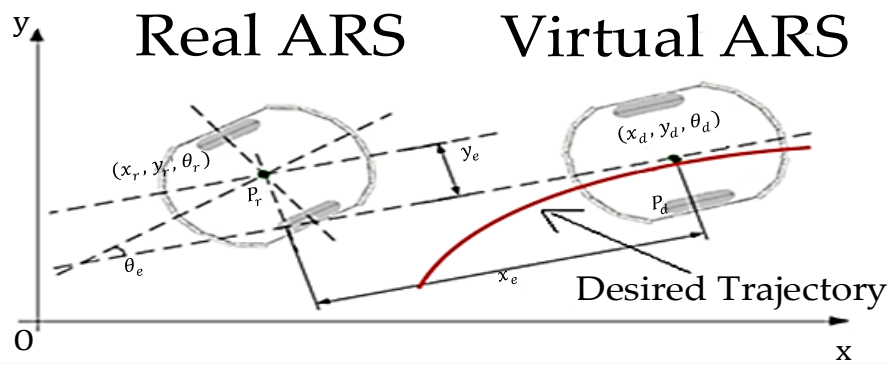


Figura 19. Reprezentarea sistemului ARS real și a celui virtual în Trajectory-Tracking.

Legea de control echivalentă $\eta_{eq} = [v_{eq} \ \omega_{eq}]^T$, care satisface condiția $\dot{\sigma}(\xi_e) = 0$, este obținută astfel:

$$\sigma(\xi_e) = \begin{bmatrix} \sigma_v(x_e) \\ \sigma_\omega(y_e, \theta_e) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 x_e \\ k_2 y_e + k_3 \sin(\frac{\theta_e}{2}) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$u_{eq} = \begin{bmatrix} -k_1 & k_1 y_e \\ 0 & -(2k_2 x_e + k_3 \cos(\frac{\theta_e}{2})) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 2k_2 & k_3 \cos(\frac{\theta_e}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e \\ v_r \sin \theta_e \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$v_{eq} = \omega_{eq} y_e + \cos(\theta_e) v_r \quad (12)$$

$$\omega_{eq} = \frac{1}{2} \frac{k_3 \cos(\frac{\theta_e}{2}) \omega_r + 2k_2 \sin(\theta_e) v_r}{k_2 x_e + \frac{k_3}{2} \cos(\frac{\theta_e}{2})} \quad (13)$$

Rezultatele simulărilor confirmă că abordarea TTSMC aplicată unei linii A/DRML permite robotului să urmeze traiectorii complexe cu o precizie ridicată, chiar și în prezența unor inexactități de modelare și a perturbațiilor externe (Figura 20). Aceasta face o soluție puternică pentru controlul roboților mobili în medii dinamice și incerte.

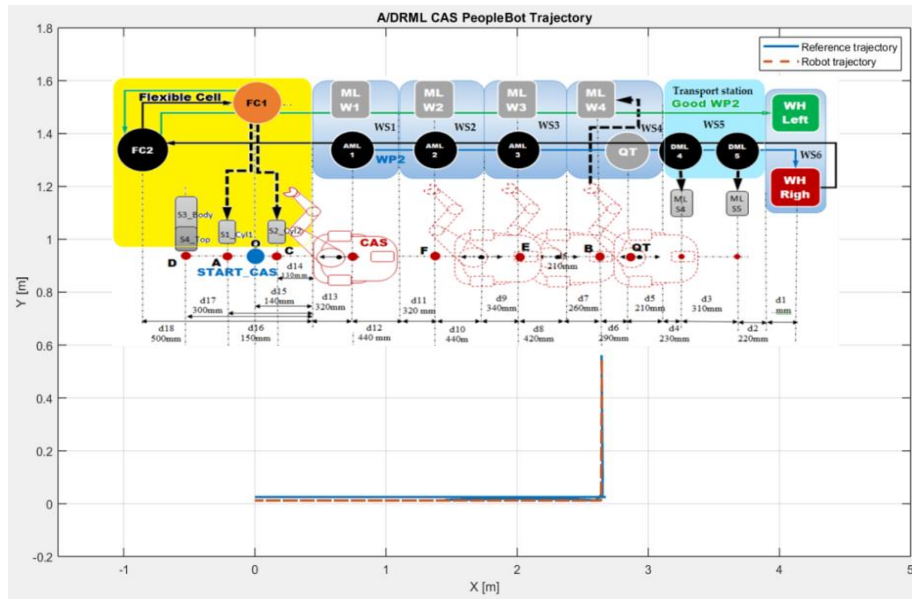


Figura 20. Traiectorii dorite și reale (A/D/RML) ale robotului CAS PeopleBot pentru recuperarea cilindrului, acțiune de recuperare componentă, conducere bazată pe metoda FOSMC (First-Order Sliding Mode Control).

3.3.2. Modelarea și conducerea manipulatorului robotic integrat în ARS

Manipulatorul robotic Cyton Gamma 1500, cu 7 grade de libertate (7-DOF), este modelat utilizând convenția DH pentru a deriva cinematica directă (Figura 21).

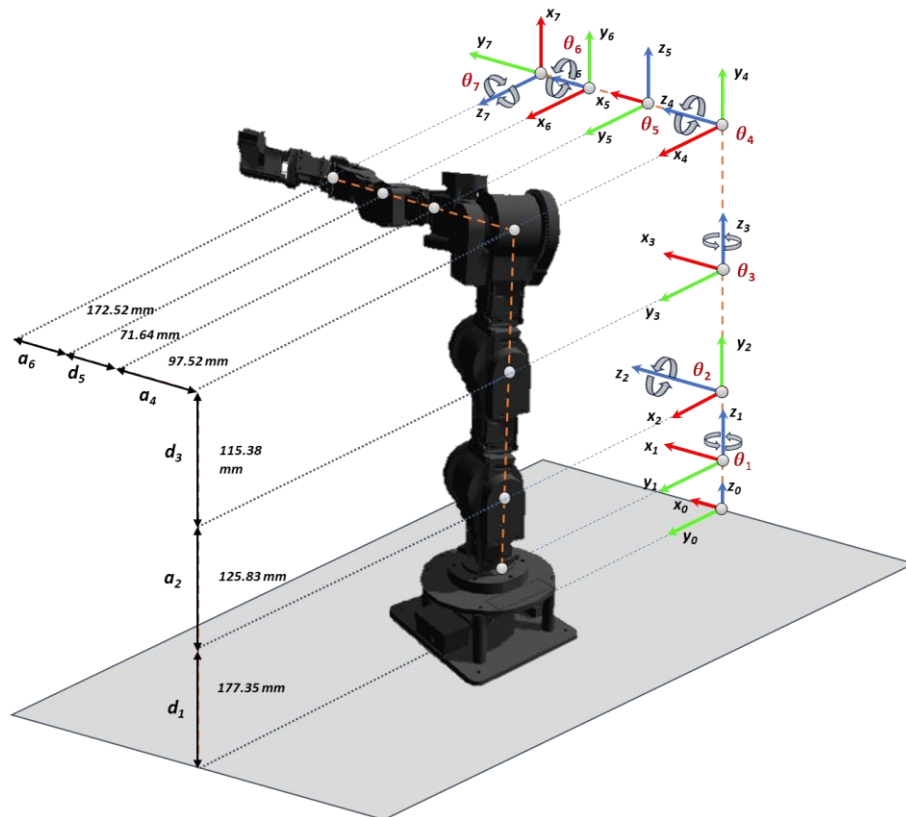


Figura 21. Parametrii Denavit-Hartenberg, atribuirea cadrelor de referință și a sistemelor de coordonate pentru manipulatorul Cyton Gamma 1500 RM.

Modelul cinematic este construit, similar ca la robotul ABB 120 IRM, prin înmulțirea matricelor de transformare ale fiecărei articulații, rezultând o descriere completă a poziției și orientării efectorului final. Datorită redundanței manipulatorului, mai multe configurații pot atinge aceeași poziție a efectorului, ceea ce impune utilizarea unor criterii de optimizare sau metode numerice pentru cinematica inversă.

3.4. Rezultate și contribuții științifice

Acest capitol prezintă un studiu al modelării, simulării și controlului CPRS în cadrul mediilor de fabricație flexibilă. Integrarea tehnologiilor IoT, DT și VSS a permis dezvoltarea unor sisteme de fabricație inteligente, adaptive și reziliente.

Modelarea și simularea celulelor robotizate (de exemplu, A/DRC cu robotul ABB IRB120 IRM cu 6 grade de libertate) validează controlul precis al mișcărilor și optimizarea sarcinilor. Integrarea VSS contribuie la îmbunătățirea adaptabilității și robusteții în operațiunile de asamblare/dezasamblare (A/D) în cadrul sistemelor flexibile de fabricație (FMS).

Contribuțiile majore includ:

- Modelarea și simularea sistemelor A/DML Hera & Horstmann cu WMR și manipolatoare Cyton cu 7 grade de libertate (OB.1, OB.2).
- Proiectarea sistemului A/DRC cu ABB IRB120 IRM pentru sarcini complexe de asamblare/dezasamblare (OB.2).
- Integrarea CPRS în sistemele A/D/RML bazate pe IoT Cloud-Control (OB.1, OB.2).
- Control centralizat și distribuit bazat pe PLC pentru sisteme ARS, cu suport SCADA, IIoT și CAS (OB.2, OB.3 [SP2]).
- Strategii de control pentru ARS dedicate dezasamblării și recuperării, facilitând automatizarea și sustenabilitatea (OB.2, OB.3 [SP6, SP7, SP14, SP15]).
- Implementare CPRS utilizat în A/DRC cu ABB IRB120 IRM, PLC, SCADA și dispozitive IoT edge (OB.1, OB.4 [SP10]).
- Control și feedback în timp real pentru linii integrate ARS/MCPRS, utilizând modele DT (OB.2, OB.3 [SP11–SP13]).
- Integrarea DT și ARS pentru reprocesare și recuperare, asigurând sincronizare și reziliență (OB.2, OB.3 [SP13–SP15]).
- Utilizarea ARS cu manipolatoare robotice și VSS pentru operații A/D de înaltă precizie și urmărirea traiectoriei bazată pe conducere TTSMC pentru WMR (OB.2, OB.3 [SP15, SP16]).

Aceste contribuții oferă o bază solidă pentru dezvoltarea unor sisteme de fabricație inteligente, sustenabile și centrate pe om, aliniate cu obiectivele Industry 4.0 și 5.0. Prin demonstrarea fezabilității și eficienței CPRS în medii de laborator, această cercetare oferă un fundament robust pentru aplicații industriale viitoare.

Capitolul 4

Metode Digital Twin utilizate în monitorizarea și conducerea prin IoT Cloud-Control a tehnologiilor de fabricație flexibilă pe linii de mecatronică de laborator

4.1. Metoda DT bazată pe AR și VR pentru modelarea și conducerea liniilor de fabricație multifuncționale asistate de ARS (A/D/RML)

Tehnologia DT bazată pe AR și VR este utilizată pentru controlul liniilor de fabricație multifuncționale asistate de ARS, prin integrarea mediilor reale și virtuale. În cadrul abordării A/D/RML DT, lumea virtuală include atribuirea taskurilor, planificarea și sincronizarea cu sisteme robotice integrate precum IRM și CAS. CAS este compus din PeopleBot WMR, Cyton 1500 RM și MVSS, și poate fi asimilat unui MCPS, unde comportamentul dinamic este controlat de algoritmi software. În CPRS, componentele fizice și software sunt profund interconectate, operând la diferite scări spațio-temporale.

Modelarea virtuală implică simulări hibride cu rețele Petri sincronizate (SHPN), modelarea MVSS, simularea TTSMC în MobileSim, cinematica inversă a RM și o interfață grafică (GUI) pentru monitorizarea controlului în timp real, conducând la automatizarea completă a sistemului. SHPN este utilizat pentru modelarea tehnologiilor A/D/RML, care combină dinamica discretă (A/D/RML) cu cea continuă (MCPS).

Partea reală a DT pentru A/DRML

Partea reală a DT (Real World) pentru A/D/RML constă în comunicare, sincronizare, monitorizare și control al unei tehnologii multifuncționale implementate într-un sistem de laborator. Aceasta integrează o linie mecatronică de asamblare/dezasamblare (A/DML) Hera & Horstmann și o celulă flexibilă (FC) cu un ABB IRM cu 6-DOF. Întregul sistem este asistat de CAS, compus dintr-un ARS (WMR cu 7-DOF RM și MVSS eye-in-hand), toate subsistemele fiind echipate cu PLC-uri, dispozitive de comunicație (cablate și wireless), senzori (infraroșii, inductivi, optici) și actuatori electrici și pneumatici. Tehnologia permite asamblarea a două produse (WP1 și WP2) și dezasamblarea sau repararea celor care nu trec testele de calitate. WP1 este asamblat în FC de ABB 120 IRM, iar WP2 este procesat în stațiile WS1–WS4 ale A/DML. În cazul dezasamblării sau reparației, WP2 este transportat de-a lungul A/DML către FC, unde ABB IRM efectuează dezasamblarea, iar CAS recuperează componentele și le depozitează pentru reutilizare.

Lumea Virtuală DT ca Reprezentare Digitală a A/DRML

Lumea virtuală a DT, reprezentând o replică digitală a sistemului A/D/RML asistat de CAS și MVSS, oferă un cadru interactiv pentru atribuirea sarcinilor, planificare, comunicare, sincronizare, modelare și simulare SHPN, precum și pentru modelarea CAS. Pentru implementarea performantă a controlului în timp real al sistemului multifuncțional, sunt utilizate modele SPN și SHPN. Necesitatea modelului SHPN derivă din colaborarea dintre linia mecatronică A/DML (evenimente discrete) și CAS (dinamică continuă).

Integrarea modelării hibride SHPN cu tehnologiile AR și VR oferă un cadru eficient pentru proiectarea CPS-urilor, îmbunătățind acuratețea și eficiența reprezentării sistemului. Aceasta permite simularea, monitorizarea și controlul în timp real în medii de fabricație multifuncționale. Modelele SHPN furnizează informații decizionale pentru structura de control, bazată pe sincronizare între dinamica continuă (CAS) și cea discretă (A/DML).

Tehnologiile AR și VR îmbunătățesc modelarea SHPN prin vizualizare interactivă, validare și detecția timpurie a erorilor, esențiale în linii de producție adaptabile.

Modelul SHPN pentru dezasamblare descrie atât dinamica discretă (operații cu ABB IRM în FC), cât și cea continuă (deplasările CAS pentru recuperare și depozitare). Simularea acestui model permite monitorizarea evoluției sistemului A/D/RML asistat de CAS în spațiul stărilor, iar analiza rezultatelor contribuie la optimizarea performanței.

Modelul este implementat în timp real prin platforma SCADA din Siemens TIA Portal, sincronizat cu semnale reale preluate prin PLC-uri și senzori. Aceste semnale validează tranzițiile din modelul SHPN, declanșând operațiile de dezasamblare, recuperare și depozitare efectuate de CAS (Figura 22).

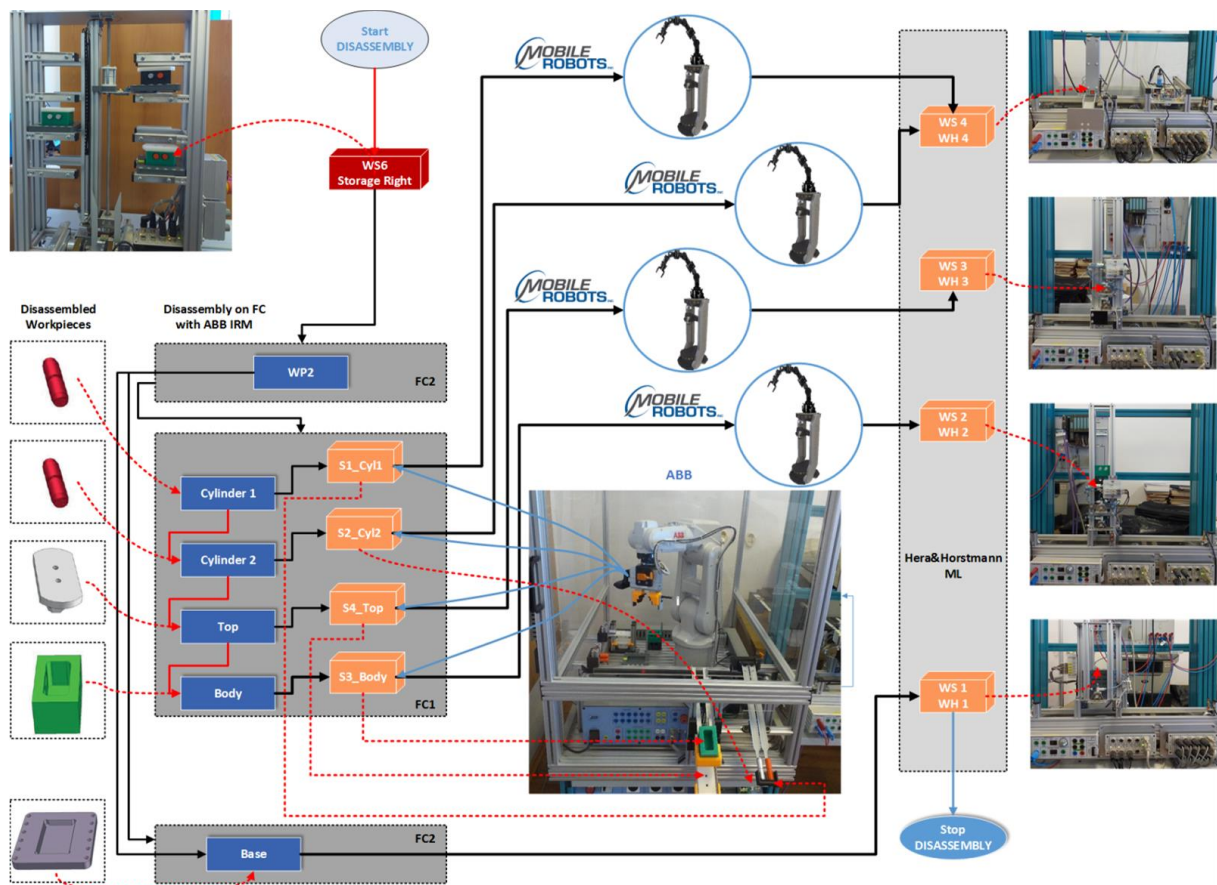


Figura 22. Planificarea taskurilor și sincronizarea procesului de dezasamblare FC echipat cu ABB 120 IRM.

4.2. Metoda DT în conducerea IoT Cloud-Control bazată pe realitate augmentată și realitate virtuală aplicată celulei robotice A/DRC

4.2.1. Metoda DT folosind AR și VR. Modelare DT A/DRC Virtual

Digital Twin-ul celulei A/DRC funcționează ca un corespondent virtual care reproduce comportamentul sistemului fizic în timp real. Acesta integrează AR pentru planificarea task-urilor și VR pentru simularea mișcărilor, permițând operatorilor să interacționeze cu sistemul prin interfețe intuitive.

AR suprapune informații digitale peste mediul fizic, ghidând operatorii în sarcinile de asamblare și dezasamblare. Utilizează Node-RED pentru a vizualiza datele în timp real și pentru a sincroniza operațiunile cu robotul ABB 120 IRM. Aceasta îmbunătățește colaborarea om-robot, reduce erorile și sprijină întreținerea predictivă.

VR, pe de altă parte, oferă un mediu complet realist în care utilizatorii pot simula și valida fluxurile de lucru robotice. Prin integrarea modelelor STPN, VR permite vizualizarea secvențelor de sarcini, alocarea resurselor și constrângerile temporale, asigurând optimizarea operațiunilor înainte de implementare.

4.2.2. Planificarea interactivă a task-urilor utilizând Node-RED și realitatea augmentată

Node-RED este utilizat pentru a crea ecrane AR interactive care vizualizează starea fiecărei operații din A/DRC. Operatorii pot monitoriza progresul operațiunilor de asamblare și dezasamblare, pot primi alerte și pot interacționa cu sistemul în timp real. De exemplu, în timpul asamblării WP1 sau WP2, Node-RED afișează secvența operațiunilor, de la plasarea paletului de bază până la inserarea cilindrilor. În mod similar, în timpul dezasamblării, urmărește eliminarea și depozitarea fiecărei componente. Această integrare asigură execuția sincronizată, feedback-ul în timp real și luarea deciziilor îmbunătățite (Figura 23).

4.2.3. Modelare și simulare prin STPN a realității virtuale

Modelele STPN sunt utilizate pentru a simula fluxurile de lucru de asamblare și dezasamblare ale A/DRC. Aceste modele definesc stările, tranzițiile și constrângerile temporale ale fiecărei operațiuni, permițând controlul și optimizarea precisă.

În modelul de asamblare, tranzițiile reprezintă acțiuni precum plasarea paletului de bază, atașarea corpului și inserarea cilindrilor. Locațiile de supervizare monitorizează starea fiecărei etape, asigurând respectarea secvenței definite (Figura 24).

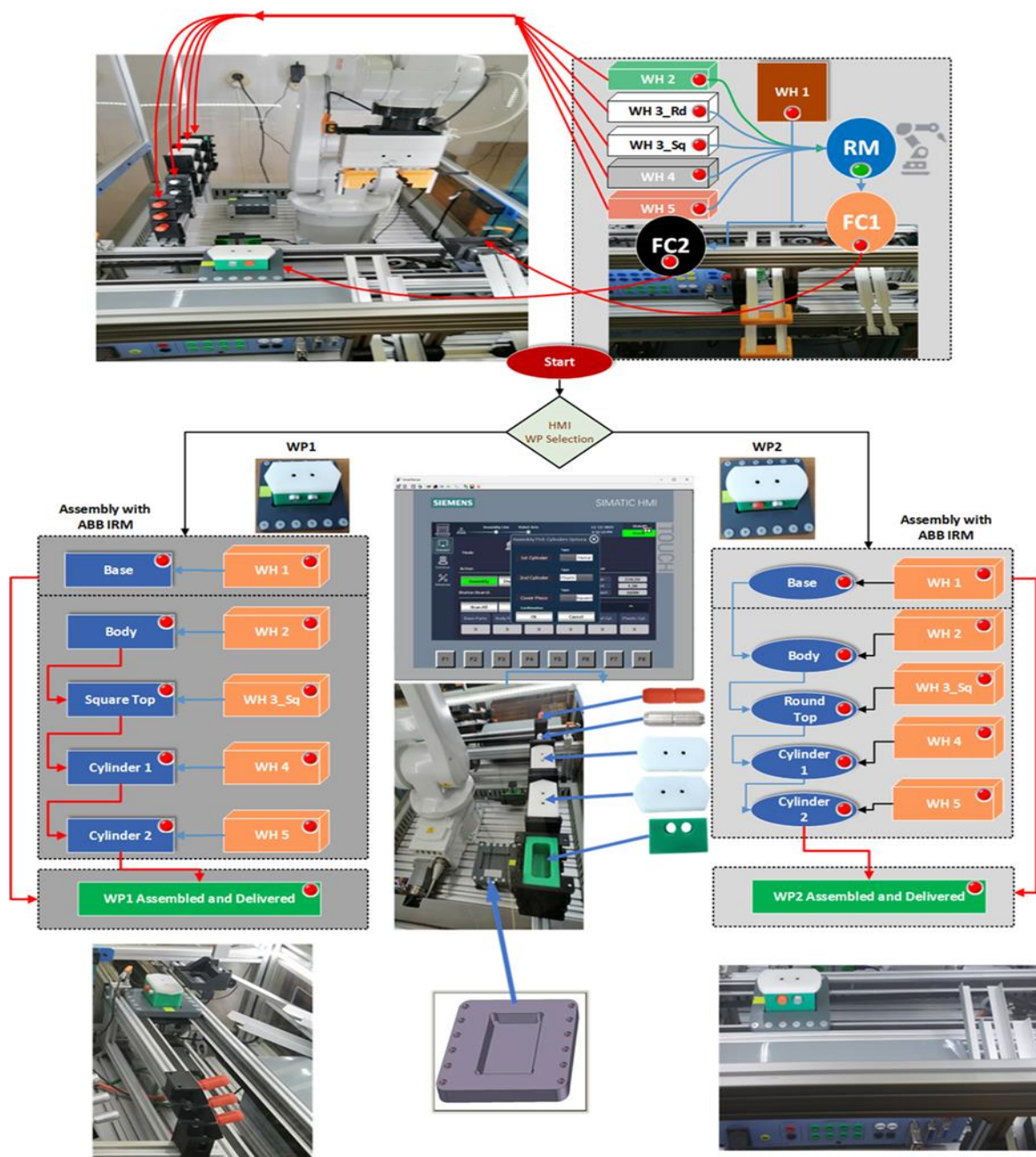


Figura 23. Planificarea sarcinilor AR în Node-RED pentru operația de A/DRC asamblare.

The A/DRC STPN model for DT assembly

HMI SCADA Start Assembly - WP1/WP2 Selection

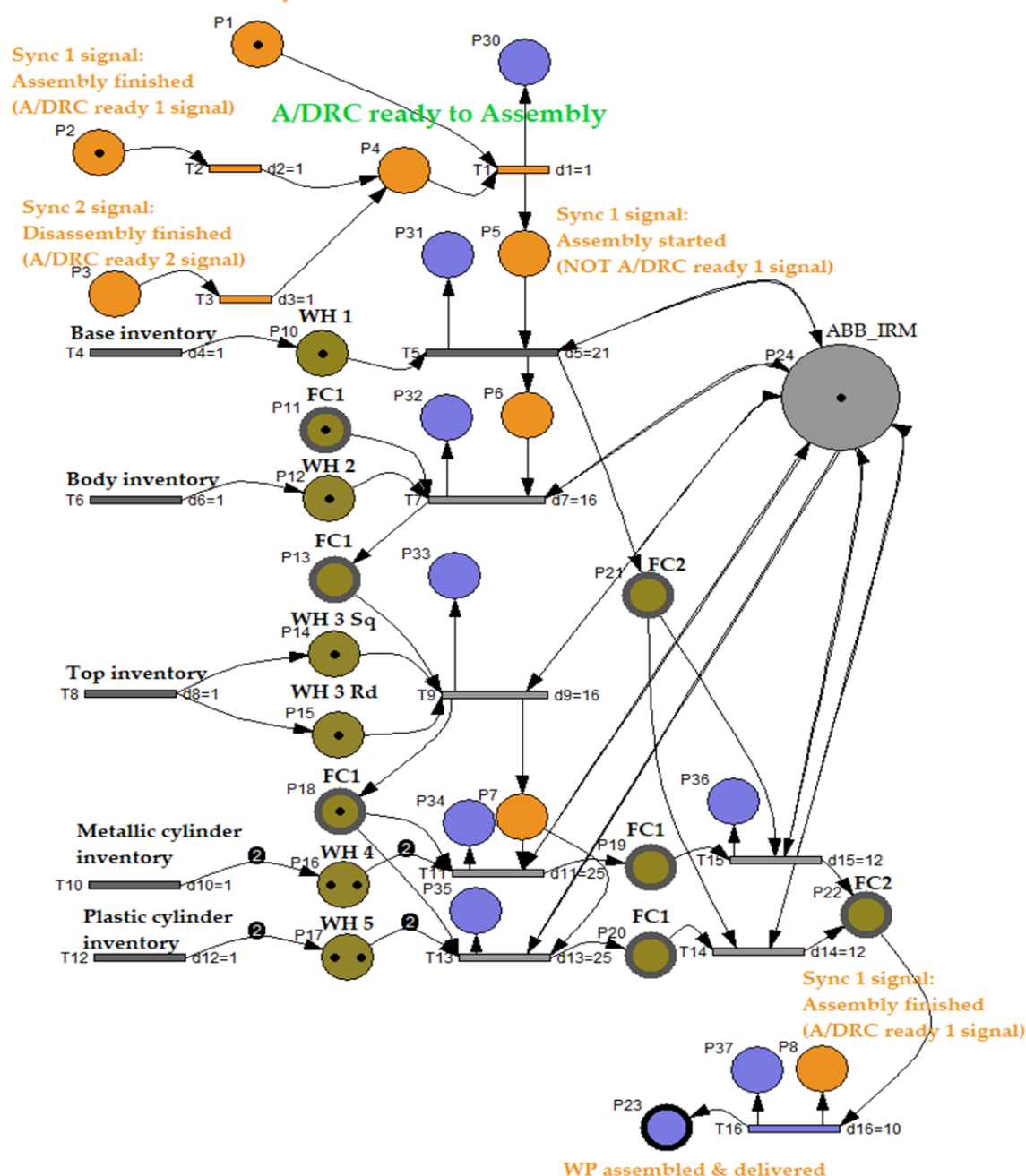


Figura 24. Modelul STPN pentru operația de asamblare A/DRC în cadrul Digital Twin.

În modelul de dezasamblare, procesul este inversat, cu tranziții pentru eliminarea fiecărei componente și depozitarea acestora în depozitul corespunzător. Utilizarea STPN în VR permite testarea fără riscuri, instruirea și optimizarea fluxurilor de lucru, sprijinind dezvoltarea sistemelor de fabricație inteligente și autonome.

4.2.4. DT Real World. Monitorizarea și conducerea A/DRC

Arhitectura de control a procesului fizic (Real World) pentru A/DRC este structurată pe mai multe niveluri (Figura 25):

- **Nivelul de operare la distanță (remote):** include sistemele SCADA și HMI pentru monitorizare și control de la distanță.
- **Nivelul de operare locală:** permite interacțiunea directă cu sistemul la fața locului.
- **Nivelul de comunicație:** gestionează transferul de date între dispozitive prin router-e, gateway-uri și dispozitive edge.
- **Nivelul de control:** include PLC-ul, controlerul ABB și Jetson Nano pentru execuția logicii de control și procesarea imaginilor.
- **Nivelul de proces:** cuprinde ABB 120 IRM, sistemele de transport, senzorii și actuatoarele.

Această arhitectură asigură sincronizarea în timp real, integritatea datelor, permițând DT-ului să funcționeze ca o platformă de control complet integrată.

4.3. Metoda DT in conducerea IoT bazată pe cinematica inversă și Hardware-in-the-Loop (HIL) aplicată celulei robotice A/DRC

4.3.1. Metoda DT folosind conceptul de Virtual Commissioning și strategia HIL

Acest capitol analizează proiectarea, modelarea și implementarea software a unei aplicații DT, ilustrată printr-o replică virtuală 3D a unei stații A/DRC asistată de ABB IRM 120, utilizând cinematică inversă și tehnici HIL (Figura 26). Scopul este dezvoltarea unui mediu virtual avansat pentru monitorizarea, analiza și optimizarea proceselor ingineresti, fără interacțiune directă cu echipamentele fizice. Tehnologia propusă integrează conceptul VC prin schimb bidirecțional de date între modelul digital și sistemul fizic, susținut de o infrastructură IoT în Cloud. Contribuțiile principale sunt: dezvoltarea unui simulator HIL pentru emularea unei stații A/DRC, implementarea software-ului, controlul IoT în Cloud, achiziția de date și modelarea 3D a proceselor fizice dinamice, simulate ulterior în MATLAB și ABB RobotStudio (Figurile 27,28).

Sistemul oferă interfețe de comunicație prin PROFINET IO către SCADA și HMI, precum și prin OPC UA pentru integrarea cu Siemens NX MCD și modelul virtual DT. În cadrul PLC-ului, a fost implementată o soluție de cinematică inversă în formă închisă pentru ABB 120 IRM, bazată pe o metodă geometrică, care permite calculul rapid și selecția soluției corecte în funcție de configurația robotului. Caracterul analitic al metodei asigură performanță eficientă în execuție.

4.3.2. Arhitectura ierarhică și distribuită a DT A/DRC. Virtual și real

Sistemul DT este organizat într-o arhitectură centralizată pe mai multe niveluri, care integrează operarea locală și la distanță (SCADA, HMI), comunicația prin SIMATIC IOT2050 și OPC UA, controlul prin PLC S7-1200, ABB IRC5C și Jetson Nano, precum și procesul fizic cu ABB 120 IRM, benzi transportoare și senzori. Această structură permite monitorizare în

timp real, analiză predictivă și diagnosticare la distanță, sporind reziliența și adaptabilitatea sistemului (Figura 25).

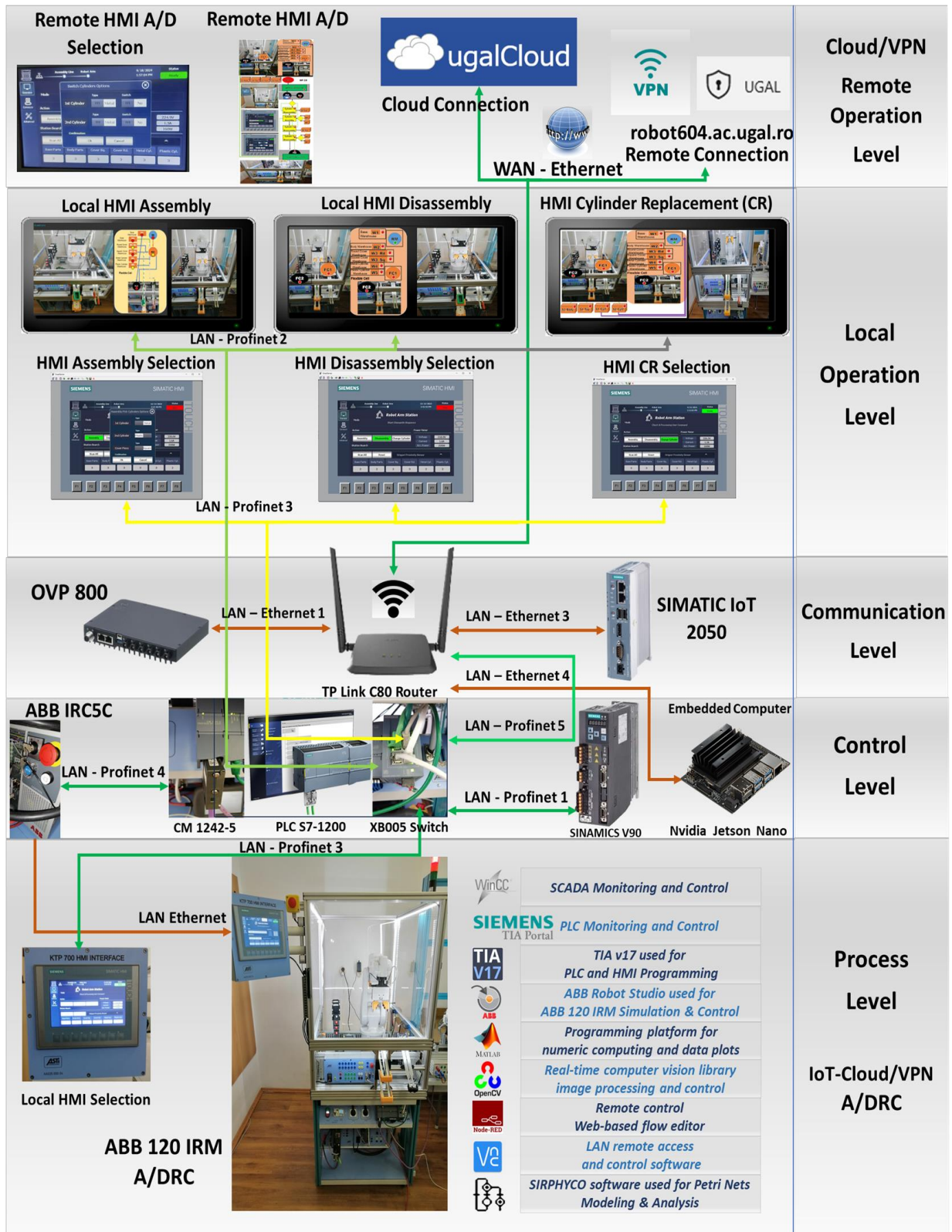


Figura 25. Monitorizarea și controlul de la distanță bazate pe Cloud și VPN ale Real World pentru DT A/DRC.

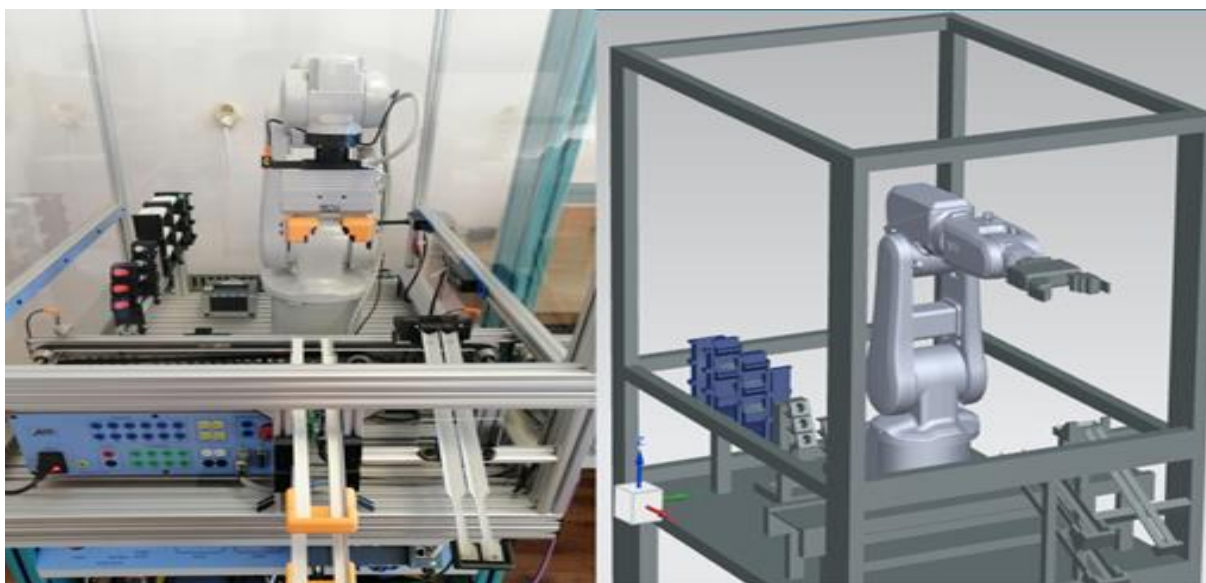


Figura 26. A/DRC cu ABB 120 IRM. Strat Fizic și Virtual al DT.

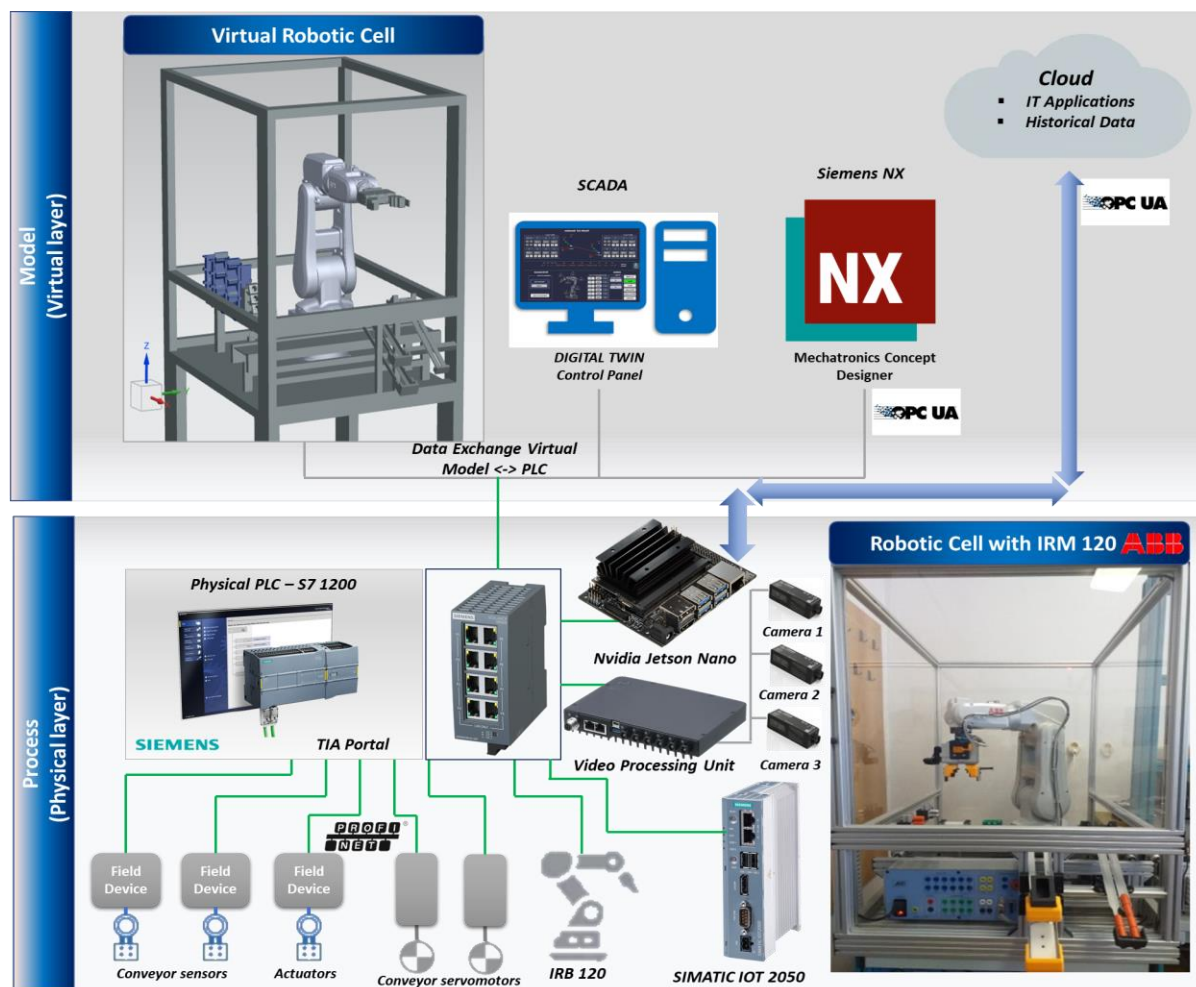


Figura 27. Proces fizic și model virtual al DT A/DRC.

4.3.3. Conceptul de Virtual Commissioning. Simulare HIL

VC și simularea Hardware-in-the-Loop (HIL) sunt utilizate pentru testarea și validarea programelor PLC și a logicii de control robotic înainte de implementare. Acest proces reduce timpii de nefuncționare, erorile de integrare și costurile de punere în funcțiune. Platforma DT include un model virtual 3D al A/DRC, dezvoltat în Siemens NX MCD, și un sistem de control în timp real implementat în Siemens TIA Portal. Configurația HIL conectează modelul virtual la PLC-ul fizic, permițând interacțiunea în timp real și schimbul bidirecțional de date (Figura 28).

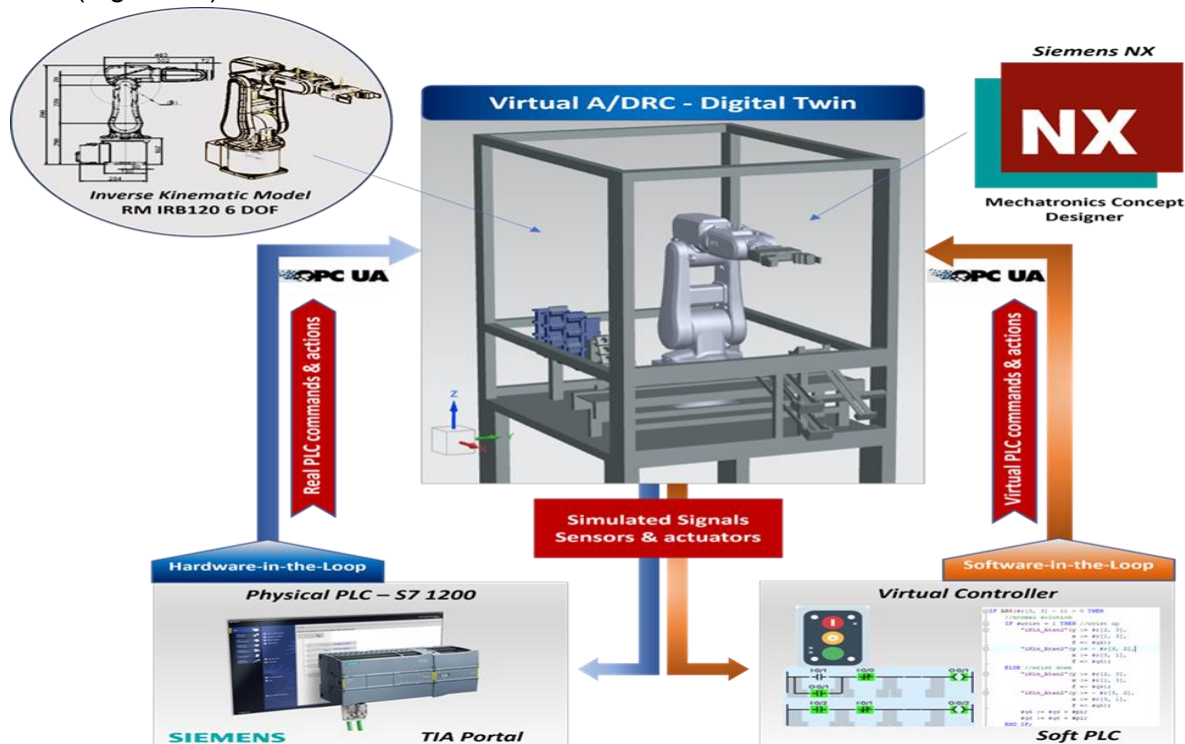


Figura 28. Concepte de Virtual Commissioning: Hardware-in-the-Loop (HIL) și Software-in-the-Loop (SIL).

4.3.4. Modelarea A/DRC Virtual: Implementarea cinematicii directe și inverse în PLC

Cinematica inversă a robotului ABB 120 IRM este implementată direct în PLC în Siemens Tia Portal v17 prin Siemens Function Blocks:

- **iKin_IRB120_Main:** rezolvă problema cinematicii inverse.
- **iKin_MoveL:** execută mișcări liniare între două puncte.
- **iKin_Theta2/Theta3:** calculează unghiurile articulațiilor pentru configurații specifice.
- **iKin_Wrist:** determină unghiurile articulațiilor încheieturii (Wrist).
- **iKin_DH:** generează matricile de transformare.
- **iKin_CalcRobConf:** codifică configurația robotului.
- **iKin_cubicPoly_TrajGen_Liniar:** generează traiectoria liniară utilizând Interpolarea polinomială cubică.

Aceste funcții permit planificarea precisă a mișcărilor, controlul traiectoriilor și execuția în timp real, asigurând faptul că modelul virtual reflectă cu acuratețe comportamentul sistemului fizic.

4.3.5. Dezvoltarea modelului 3D Virtual folosind pachetul software Siemens NX MCD

Modelul 3D al A/DRC cu ABB 120 IRM este dezvoltat în Siemens NX MCD, utilizând date CAD și specificații ale producătorului ABB (Figura 29). Modelul include:

- Robotul ABB 120 IRM cu șase axe de mișcare.
- Sisteme de transport, gripper-e și unități de stocare.
- Sisteme implementate de detecție a coliziunilor, proiectarea corpurilor rigide și maparea semnalelor din interfața de comunicație.

Modelul este conectat la PLC prin OPC UA, permițând simulare în timp real, validarea controlului și comisionare virtuală.

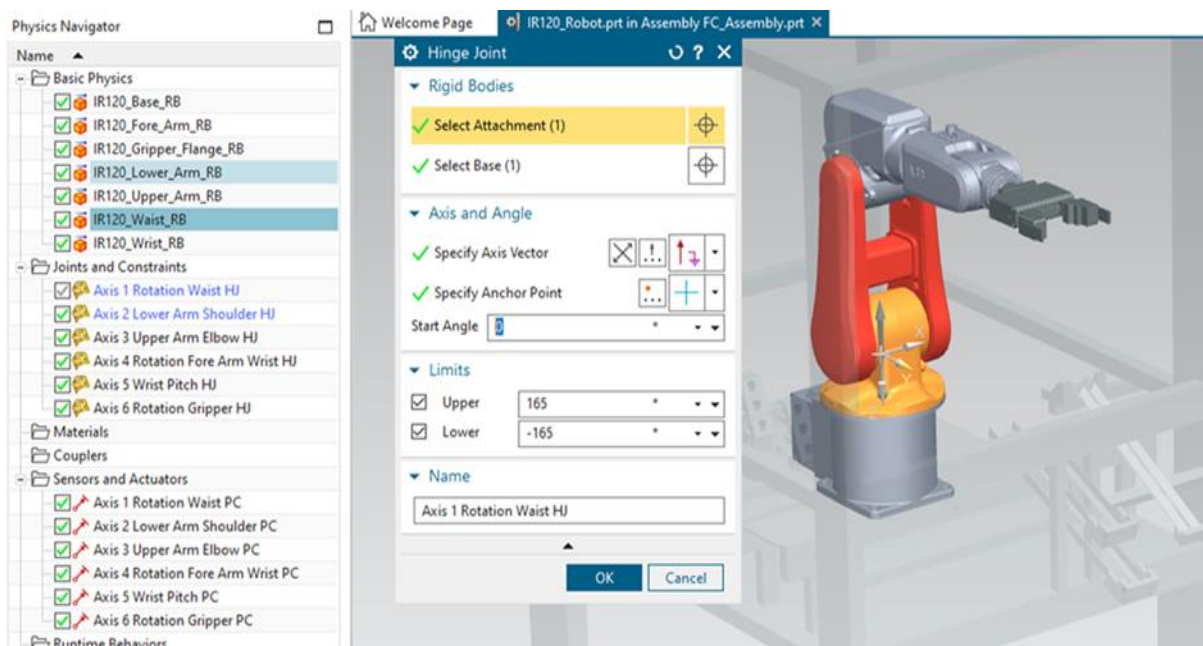


Figura 29. Proiectarea modelului 3D Digital Twin utilizând NX Mechatronics Concept Designer.

4.3.6. DT Real World. Modelarea și conducerea A/DRC

Această secțiune se concentrează pe implementarea fizică și controlul în timp real al sistemului A/DRC, evidențiind modul în care dispozitivele IoT, edge computing-ul facilitează comunicația și integrarea eficientă între DT și procesul fizic.

A/DRC include șase depozite dedicate, fiecare responsabil pentru stocarea unor componente specifice, precum paleții de bază, corpuri, capace (rotunde și pătrate), cilindri metalici sau din plastic. Aceste componente sunt monitorizate cu ajutorul a trei camere de adâncime IFM O3R222, conectate la unitatea de procesare video OVP800, care gestionează achiziția și procesarea imaginilor. Robotul ABB 120 IRM execută sarcini de asamblare și dezasamblare pe baza datelor în timp real provenite de la senzorii IoT, care monitorizează alinierea componentelor, poziționarea și forțele aplicate. Sistemul se adaptează dinamic la abateri, utilizând feedback-ul din DT și analizele Cloud pentru optimizarea performanței. Arhitectura rețelei include un router Wi-Fi, PLC, Jetson Nano, controlerul ABB și sisteme SCADA, toate conectate prin LAN și WAN. Fiecare dispozitiv are o adresă IP unică, permițând comunicare securizată și acces de la distanță prin VPN. Jetson Nano rulează

și Node-RED, susținând dezvoltarea flexibilă a aplicațiilor de control și monitorizare prin platforma Docker. Această arhitectură asigură monitorizarea și controlul A/DRC atât local, cât și de la distanță, cu vizualizare a datelor în timp real, alerte pentru mentenanță predictivă și schimb de date securizat.

4.4. Rezultate și Contribuții Științifice

Acest capitol prezintă metodele DT aplicate monitorizării și controlului bazate pe IoT Cloud pentru sisteme mecatronice flexibile (A/D/RML și A/DRC), punând accent pe integrarea AR, VR și HIL pentru îmbunătățirea proceselor de modelare, simulare și control. O abordare hibridă a modelării este detaliată printr-o reprezentare precisă a sistemului prin utilizarea DT bazate pe AR/VR. Metodele DT în controlul IoT Cloud permit crearea unor medii interactive prin Node-RED și STPN, sporind adaptabilitatea A/DRC. Controlul în timp real, realizat prin cinematica inversă și HIL, împreună cu modelarea 3D în Siemens NX MCD, optimizează eficiența sistemului.

Contribuțiile principale includ:

- Dezvoltare arhitectură de control multi-nivel, integrând ABB IRB 120 IRM, Siemens NX MCD, TIA Portal și HIL, care susține mentenanța predictivă și validarea sistemului (OB.2, OB.6, OB.7).
- Un sistem A/D/RML bazat pe DT, ce combină un RM 7-DOF, WMR, VSS și A/DML controlat prin PLC, îmbunătățind adaptabilitatea și sustenabilitatea (OB.1, OB.3).
- Proiectare DT pentru o celulă robotică multifuncțională ce integrează Cloud, VPN, IoT și AR/VR, facilitând operațiuni flexibile și durabile (OB.1, OB.3, OB.4).
- Implementarea unui sistem inteligent de control, cu arhitectură modulară DT și rețea multi-PLC, asigurând coordonare sigură în timp real și planificare avansată prin AR/VR (OB.1, OB.2, OB.4).
- Implementare aplicație de realitate virtuală pentru simularea comportamentului robotic și validarea STPN bazată pe HIL, reducând timpul de punere în funcțiune (OB.2, OB.7).
- Abordarea limitărilor DT HIL prin mentenanță predictivă și detectarea defecțiunilor (OB.6, OB.7).

Capitolul 5

Conducerea IoT Cloud-Control pentru A/DRC utilizând cinematica inversă, HIL și DT cu stocarea de date în MongoDB Cloud History

5.1. Protocoale de comunicație utilizate în monitorizarea și conducerea DT A/DRC: OPC UA, PROFINET și IoT

Această secțiune introduce, prezintă și studiază o arhitectură de comunicație multi-protocol a aplicației DT A/DRC, care permite o integrare eficientă între sistemul robotic fizic, mediul DT și Cloud. Tehnologiile și protocoalele OPC UA, PROFINET și IoT sunt utilizate pentru a asigura sincronizarea în timp real și schimbul de date între toate nivelurile A/DRC.

Comunicație și sincronizare bazate pe OPC UA

OPC UA servește drept protocolul /interfața pentru conectarea modelului virtual Siemens NX MCD cu PLC-ul Siemens, permițând simularea Hardware-in-the-Loop (HIL). O listă de mapare a semnalelor este implementată care conectează variabilele interne ale simulării (de ex. unghiuri articulare, stări ale actuatorilor) cu variabilele externe ale PLC-ului, asigurând o comunicare bidirecțională precisă.

Caracteristicile-cheie includ:

- Schimbul de date în timp real cu intervale de actualizare de până la 100 ms.
- Standardizare independentă de echipament, susținând interoperabilitatea.
- Arhitectură client-server securizată, asigurând control și monitorizare fiabile.

PROFINET și OPC UA pentru Integrarea SCADA, PLC și HMI

PROFINET IO este utilizat pentru comunicație deterministă și ciclică între PLC, SCADA și sistemele HMI, gestionând semnale de control în timp real precum feedback-ul senzorilor și comenzile actuatorilor. OPC UA completează această funcționalitate prin monitorizare la nivel înalt, stocarea de date și diagnosticare de la distanță.

Această structură de comunicație pe două niveluri asigură:

- Control de mare viteză la nivel de câmp.
- Monitorizare flexibilă și scalabilă la nivel de supervizare.

Integrare IoT prin Siemens SIMATIC IOT2050

Gateway-ul SIMATIC IOT2050 face legătura între PLC și servicii Cloud precum MongoDB, permițând agregarea și stocarea datelor bazată pe IoT, conversia protocoalelor și accesul I/O de la distanță. Acesta suportă Node-RED pentru logica de control și comunicare bazată pe fluxuri programate de date și interacțiunea cu Cloud-ul, permițând colectarea de date în timp real, redarea istorică a datelor și sincronizarea între DT și sistemul fizic.

5.2. Proiectarea și integrarea sistemelor IoT SCADA și HMI

Sistemele SCADA joacă un rol central în arhitectura DT, oferind o interfață grafică (GUI) pentru monitorizare, control și simulare în timp real. Operatorii pot introduce poziții țintă, vizualiza toate soluțiile cinematice calculate și pot simula mișcarea robotului în cadrul modelului 3D NX MCD. SCADA suportă și redarea datelor istorice, permițând analiza evenimentelor din trecut și optimizarea operațiunilor viitoare. Prin introducerea poziției dorite a end-effector-ului RM-ului, sistemul calculează și afișează pe ecran cele opt soluții cinematice obținute. Matricea de rotație corespunzătoare este redată în timp real, iar soluția corectă este evidențiată distinct cu roșu (Figura 30). Activarea funcției Simulate permite vizualizarea mișcării RM-ului, generată pe baza unghiurilor calculate, în mediul 3D din NX MCD. Utilizatorul poate urmări și analiza în timp real datele DT pe parcursul întregii traiectorii, de la poziția inițială până la destinația finală, incluzând segmentarea mișcării liniare a traiectoriei și calculele de cinematică inversă (Figurile 31,32). Ulterior, datele extrase sunt prezentate grafic în SCADA.

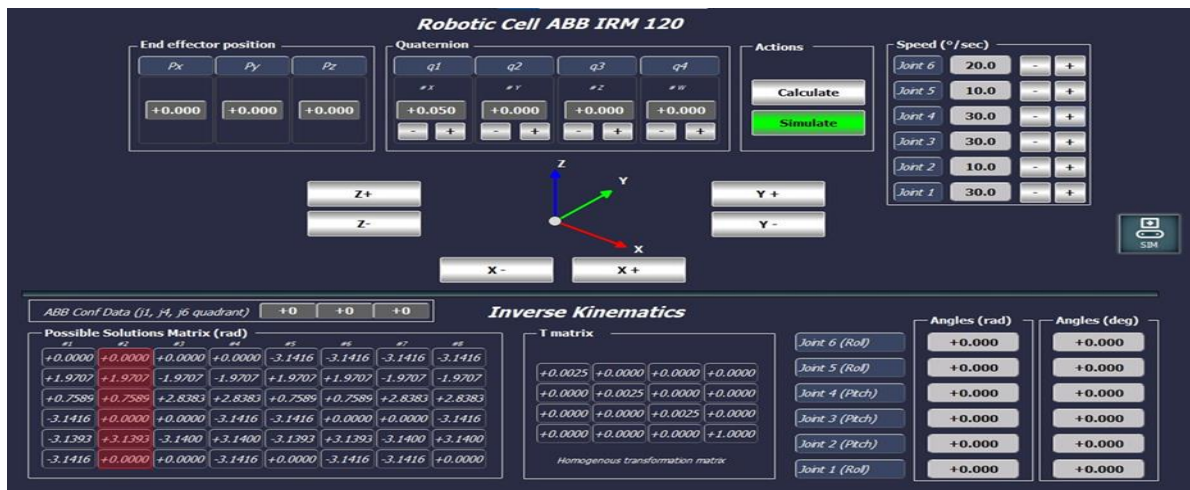


Figura 30. Mimica SCADA pentru cinematică inversă: calcul, testare și simulare DT.

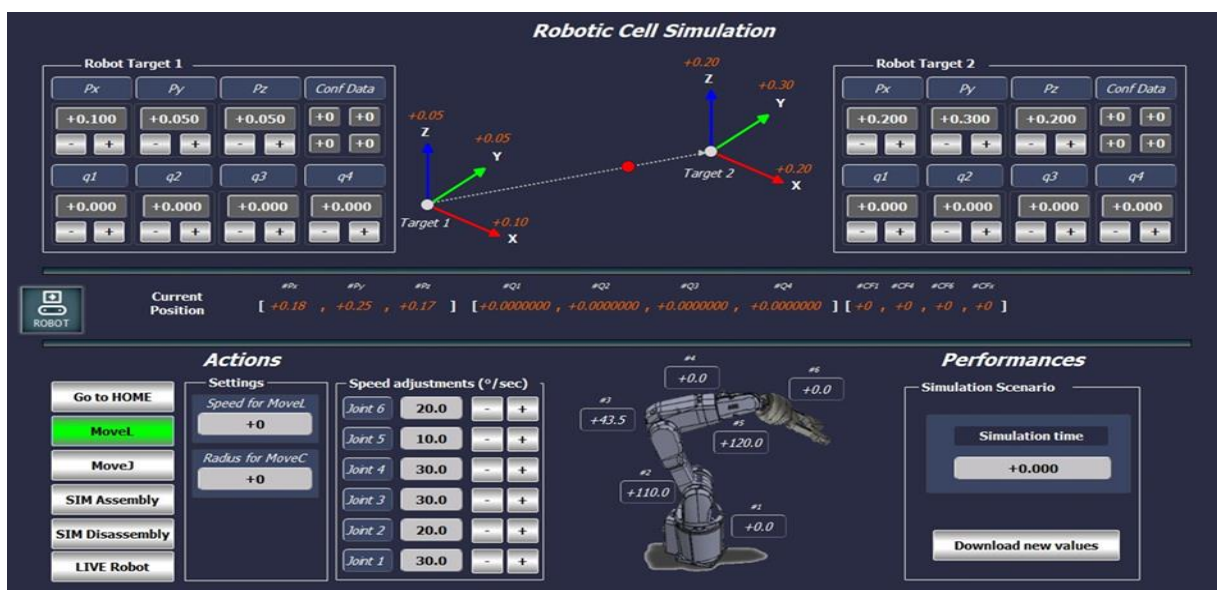


Figura 31. Panou de control SCADA DT pentru operații și controlul mișcării.

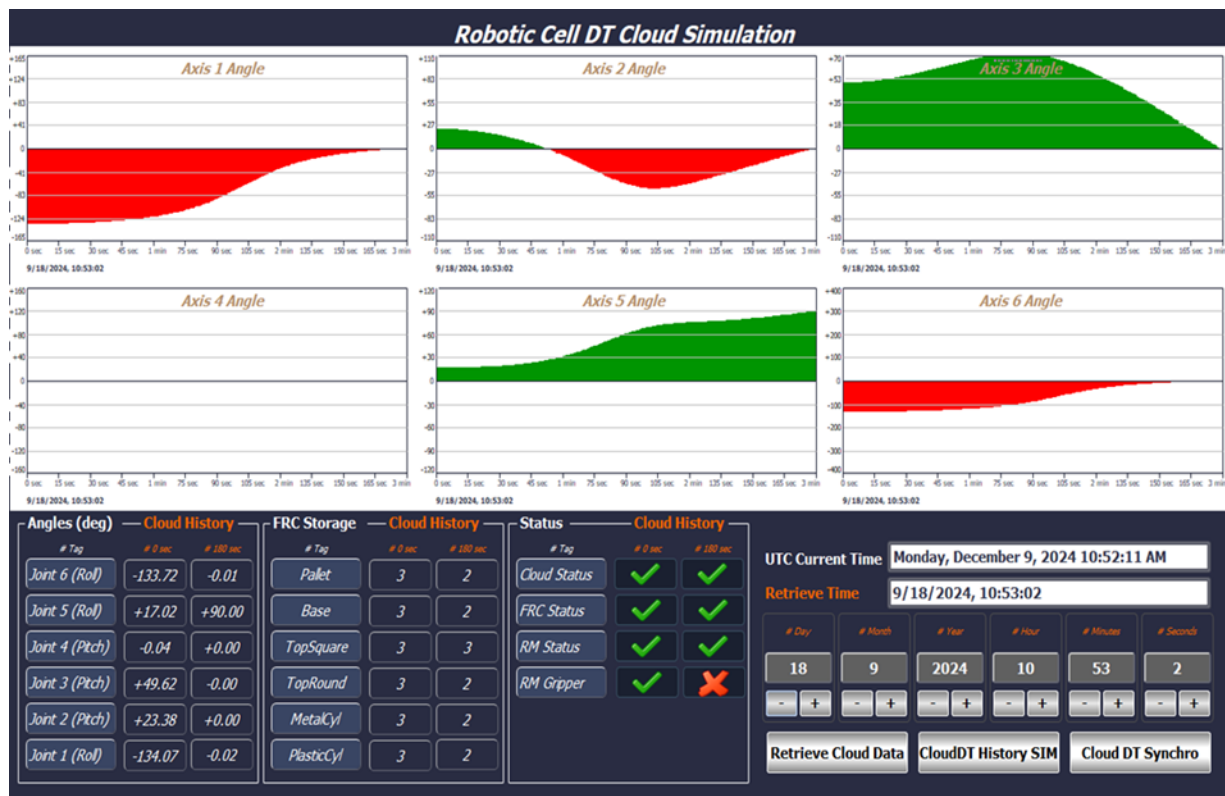


Figura 32. Simulare în Cloud a istoricului SCADA DT.

5.3. Implementarea software în PLC pentru conducerea A/DRC bazată pe Digital Twin

Software-ul PLC, dezvoltat în Siemens TIA Portal, reproduce comportamentul sistemului fizic și interacționează cu DT prin OPC UA (Figura 33).

Acesta include:

- Handler-e I/O virtuale pentru gestionarea schimbului de date între DT și A/DRC fizic.
- PLC Function Blocks pentru calculul unghiurilor articulațiilor prin cinematică inversă.
- Algoritmi de planificare și generare a traiectoriei folosind interpolare polinomială cubică.

PLC-ul suportă atât operarea în timp real, cât și simularea bazată pe date colectate în trecut (Cloud History), cu logică condițională pentru comutarea între moduri. Datele sunt stocate în MongoDB prin Node-RED, permițând o gestionare și analiză robustă a datelor.

Pe baza vitezei liniare specificate, un bloc funcțional dedicat gestionează planificarea traiectoriei și controlul mișcării, segmentând traseul între ținte (*RobTargets*) și realizând interpolarea poziției. Acest bloc, care dezvoltă comanda MoveL și gestionează tranziția robotului RM de la poziția inițială la cea finală, este prezentat în Figura 34.

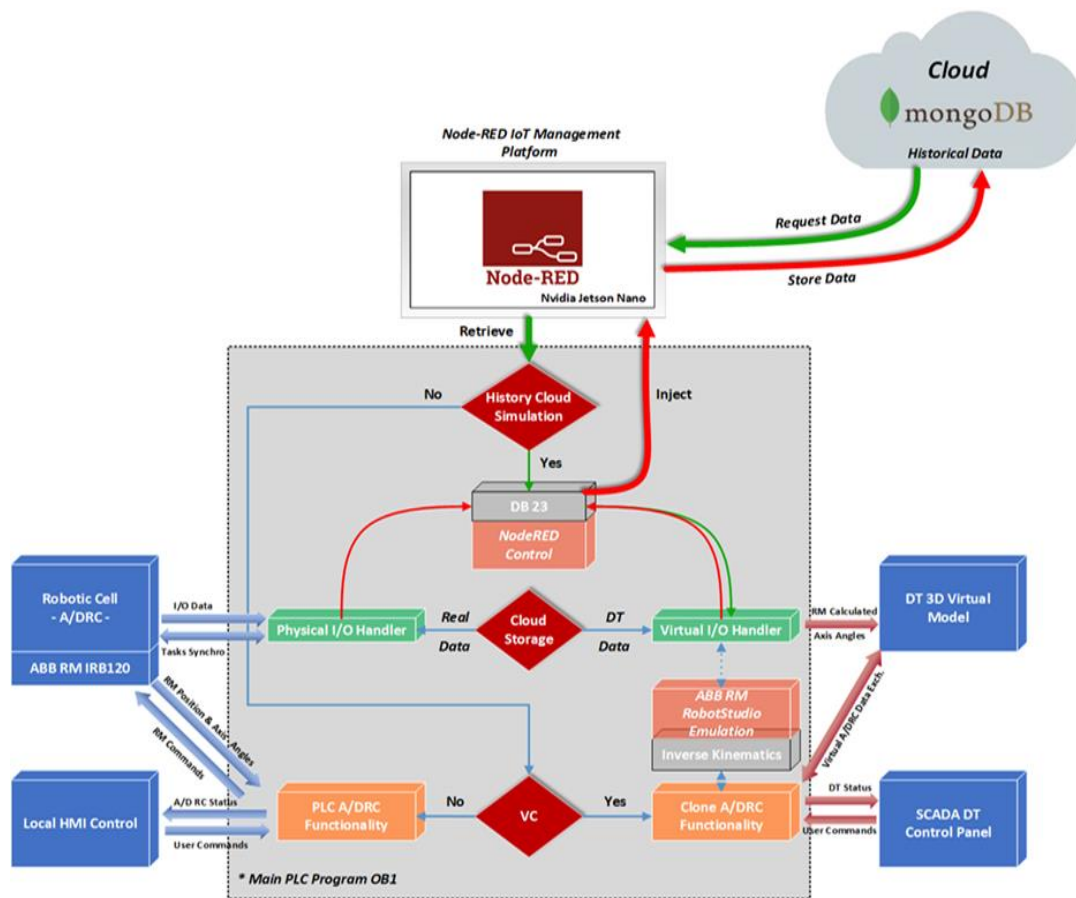


Figura 33. Diagrama de flux și structura programului principal OB1 al PLC-ului Siemens.

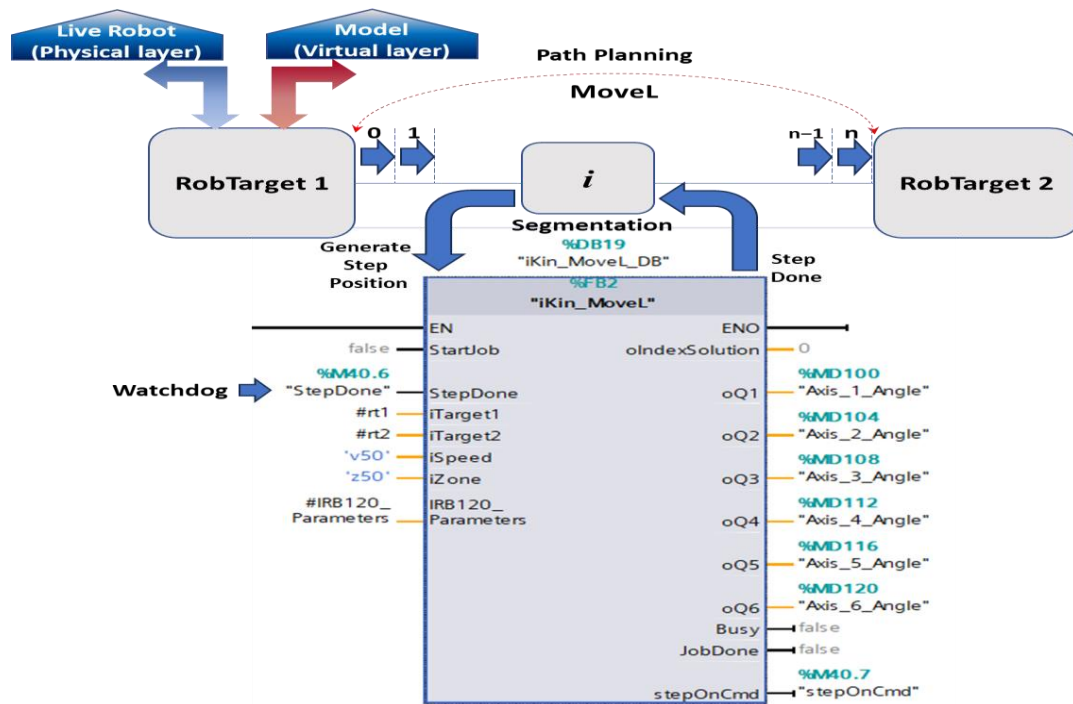


Figura 34. Algoritmul blocului funcțional PLC pentru mișcarea liniară MoveL prin segmentarea traiectoriei.

5.4. Monitorizarea și conducerea A/DRC de la distanță folosind tehnologia Remote HMI VPN Control

Această secțiune descrie o arhitectură de conducere A/DRC securizată, de la distanță (remote), utilizând VPN, Node-RED și MongoDB.

Operatorii pot:

- Monitoriza și controla A/DRC din orice locație.
- Simula task-uri ale celulei robotice utilizând DT și NX MCD.
- Accesa date istorice din Cloud pentru diagnosticare și optimizare.

Node-RED, rulând pe un Jetson Nano, acționează ca server IoT, gestionând fluxurile de date și interacțiunile cu Cloud-ul. Sistemul suportă criptare SSL/TLS, asigurând comunicare securizată și conformitate cu standardele industriale de securitate cibernetică.

5.5. Proiectarea și implementarea MongoDB Cloud History bazat pe IoT și Node-RED pentru stocarea datelor

Acest capitol detaliază integrarea platformei **MongoDB Cloud** și aplicației **Node-RED** pentru gestionarea datelor în timp real și istorice. Utilizarea bazelor de date Cloud-native, a platformelor de edge-computing și a instrumentelor open-source pentru aplicații IoT transformă modul în care sistemele industriale sunt monitorizate, controlate și analizate. În acest context, arhitectura propusă permite o infrastructură robustă și scalabilă pentru A/DRC, utilizând MongoDB Cloud și Node-RED ca gateway IoT și dispozitiv middleware cu platforma Cloud [38] (Figura 35).

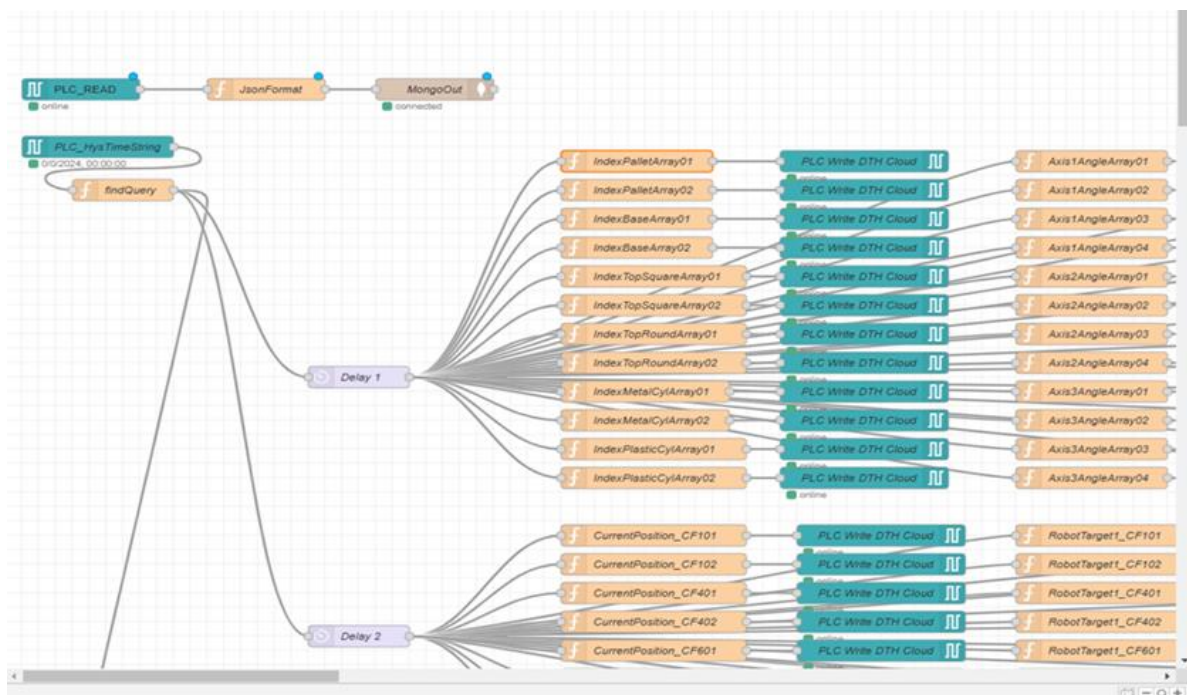


Figura 35. Interacțiunea fluxului Node-RED între Cloud și PLC.

Datele stocate pe platforma MongoDB pot fi ulterior procesate pentru analize avansate și vizualizare, prin aplicații IoT Cloud precum monitorizarea SCADA de la distanță, servere de analiză a datelor și redarea datelor istorice în cadrul aplicațiilor DT (Figura 36). Fiecare task A/DRC generează un set de date compus din aproximativ 64 de câmpuri per înregistrare într-o structură de tip JSON, cu o dimensiune medie a documentului de 1,4 KB (Figura 36).

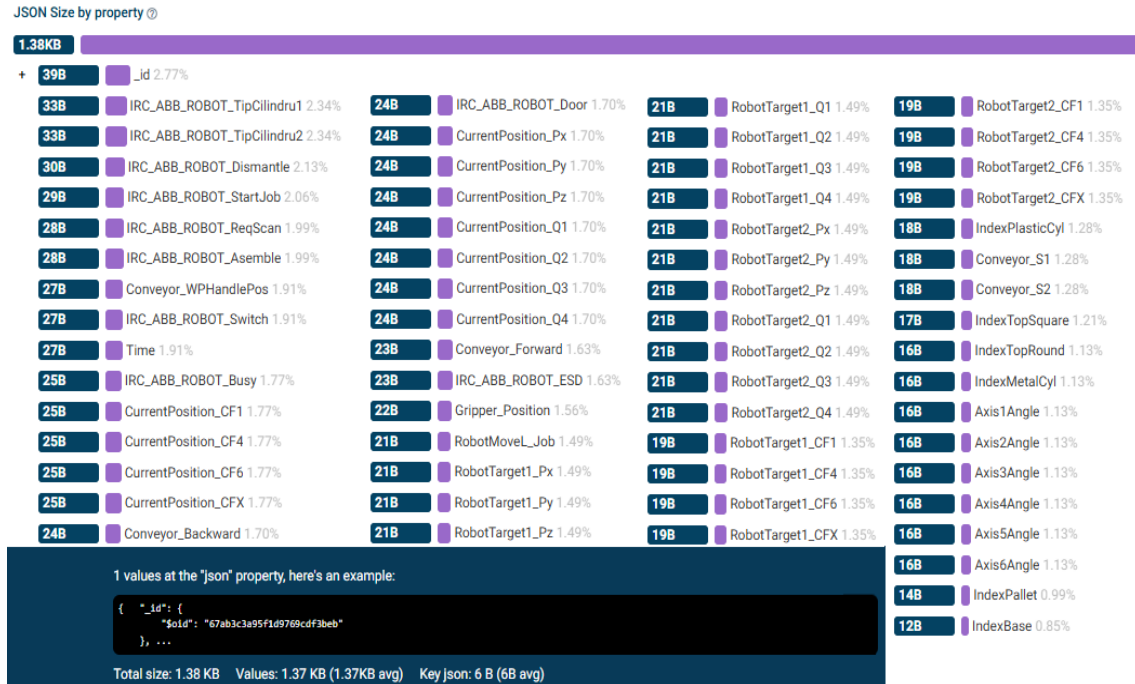


Figura 36. Structura înregistrării JSON în MongoDB pentru A/DRC.

Datorită formatului structurat al datelor JSON, înregistrările pot fi analizate direct sub formă de vizualizări în serii de timp sau redate în cadrul platformei DT SCADA. În plus, datele pot fi exportate sub formă de fișiere JSON brute, pentru stocare pe termen lung sau integrare în sisteme analitice ulterioare. Interacțiunea cu datele istorice din Cloud se realizează printr-o interogare inițiată de utilizator din interfața SCADA, transmisă ulterior către Node-RED. Pe baza unui *timestamp* selectat, Node-RED generează dinamic o interogare către MongoDB. Sistemul permite vizualizarea datelor din trecut (Cloud History), pe o durată de 180 secunde, pentru analiza condițiilor înainte, în timpul și după procesul de A/D selectat (Figura 37).

Prin aplicarea tehnologiei IoT Cloud-Contro, configurația de laborator A/DRC prezentată a demonstrat o latență a comunicației de aproximativ 75 de milisecunde între sistemul fizic și cluster-ul MongoDB Atlas găzduit în Cloud în locația Frankfurt (Figura 38). În ciuda naturii distribuite a bazei de date, această latență nu afectează semnificativ frecvența de stocare a datelor în Cloud (1 înregistrare pe secundă), validând astfel fezabilitatea utilizării MongoDB pentru înregistrarea aproape în timp real a datelor în medii educaționale și de laborator.

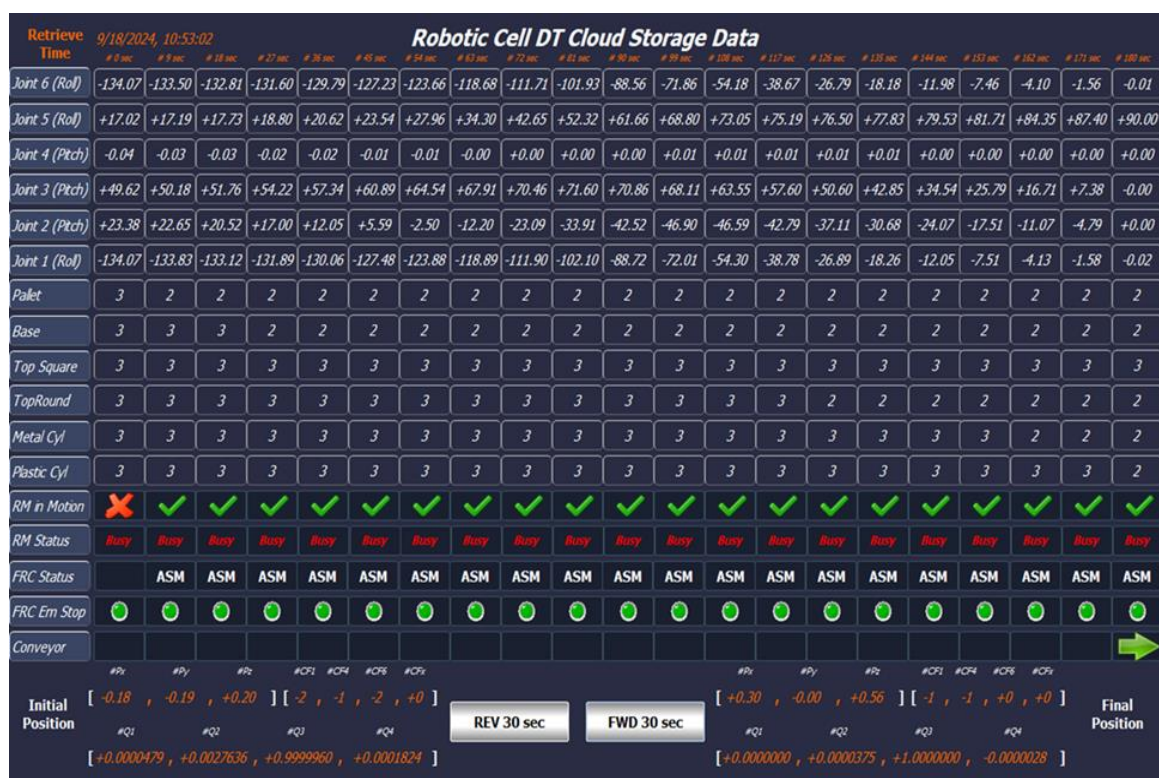


Figura 37. Stocarea datelor în Cloud pentru SCADA și DT.

AWS Latency Test Results



Figura 38. Testul de latență în Cloud pentru A/DRC.

5.6. Rezultate în timp real ale DT și validarea modelului A/DRC virtual

Această secțiune prezintă validarea modelului DT în raport cu sistemul fizic A/DRC. Testele efectuate au validat următoarele:

- DT-ul reproduce cu acuratețe mișcarea robotului, unghiurile articulațiilor și secvențele de sarcini ale A/DRC-ului.
- Comenzile și mișcările de tip MoveL virtuale executate în DT corespund îndeaproape traiectoriilor fizice.
- S-au evidențiat discrepanțele minore cauzate de rotunjiri din calculul cinematicii inverse și întârzieri de comunicație ce sunt neglijabile.

Figurile 39 și 40 ilustrează alinierea dintre traiectoriile digitale și cele fizice, confirmând fiabilitatea DT-ului pentru simulare, testare și optimizare. Figura 41 prezintă traiectoriile virtuale și fizice în spațiul 3D ale robotului ABB 120 IRM corespunzătoare operației de asamblare A/DRC. Similar operației de asamblare A/DRC, în Figura 42 sunt prezentate traiectoriile virtuale și fizice ale robotului ABB 120 IRM pentru A/DRC dezasamblare.

Comparând rezultatele operațiilor de asamblare și dezasamblare din DT A/DRC - executate prin comenzi consecutive de mișcare MoveL - cu pozițiile calculate dorite, modelul virtual propus demonstrează o acuratețe ridicată în urmărirea traiectoriei. Mișcarea emulată în regim DT HIL se aliniază cu cea obținută în sistemul fizic, oferind o aproximare fiabilă pentru urmărirea traiectoriei robotului, poziționarea end-effector-ului și calculul unghiurilor axelor (Figurile 27 și 28).

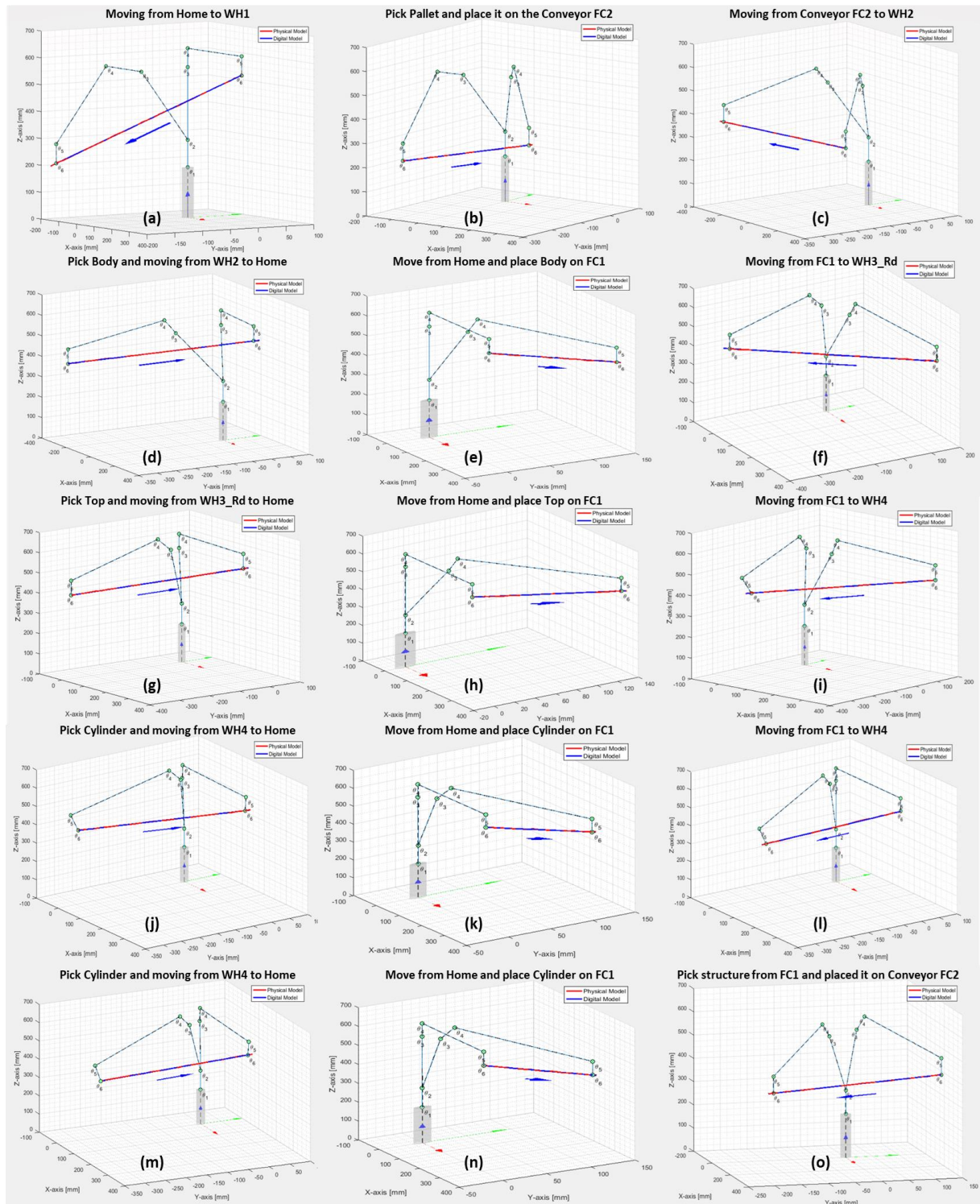


Figura 39. Traiectorii virtuale și fizice în spațiul 3D ale IRM pentru asamblarea în DT A/DRC.

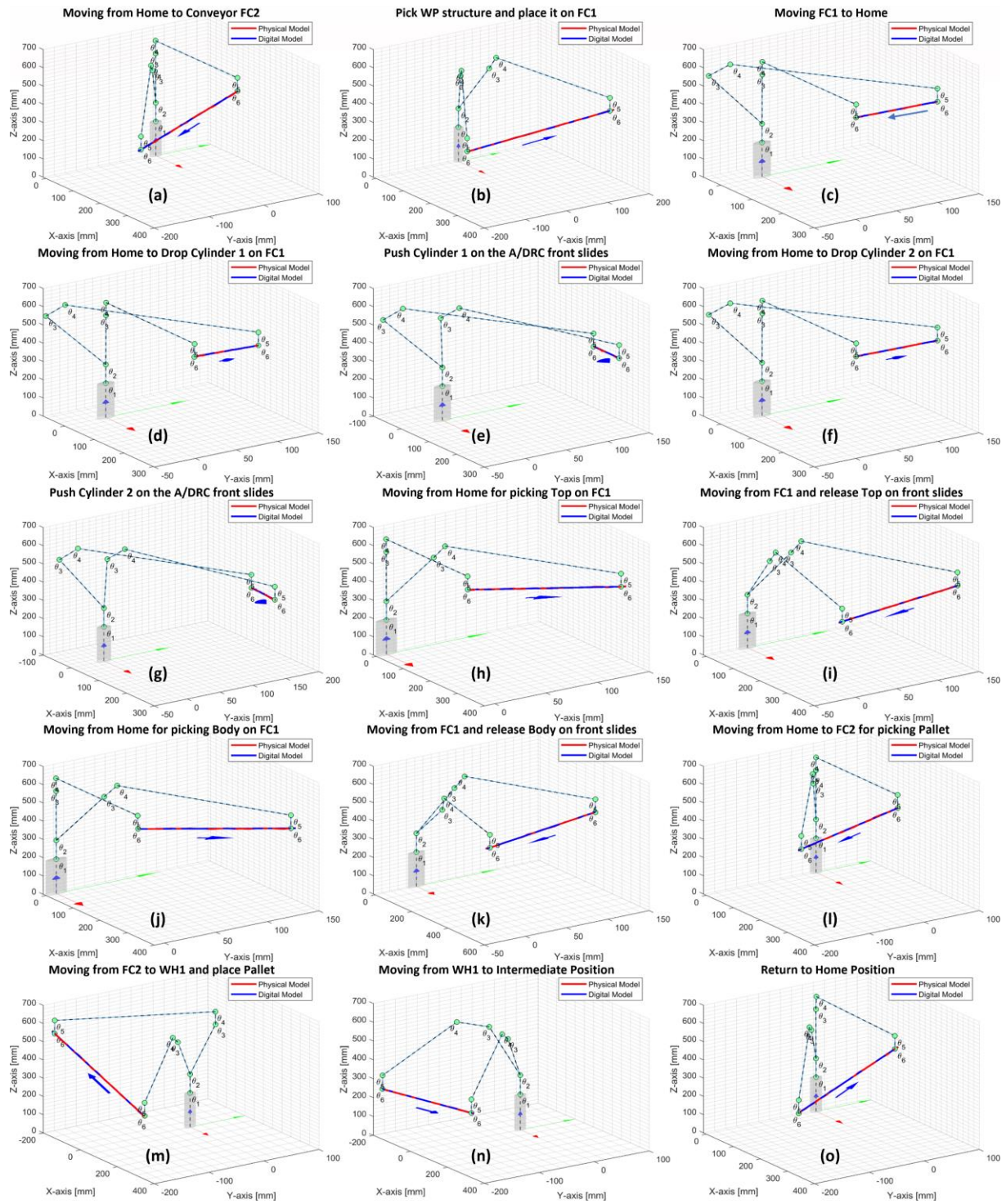


Figura 40. Traiectorii virtuale și fizice în spațiul 3D ale IIR pentru dezasamblarea în DT A/DRC.

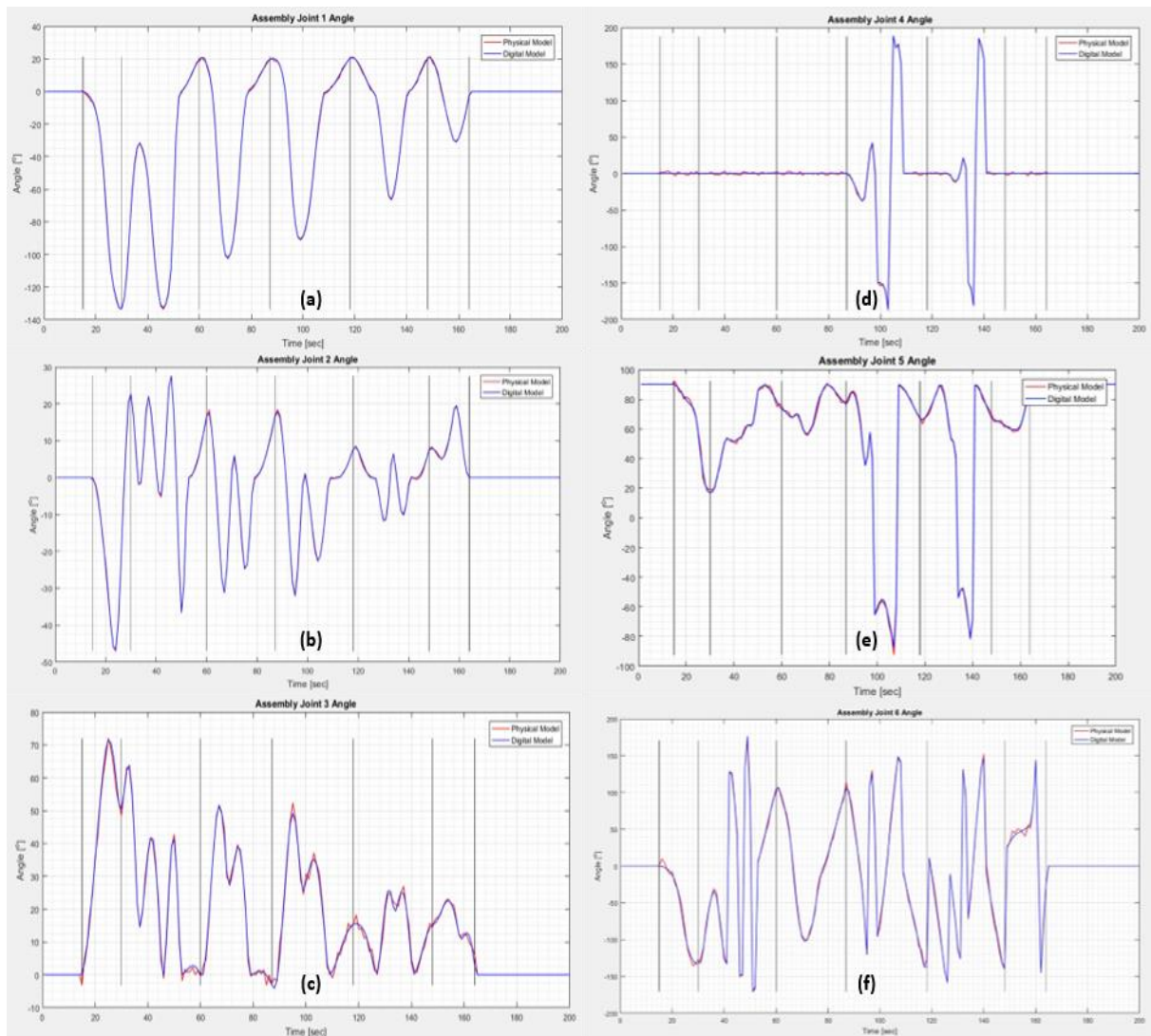


Figura 41. Unghiurile articulațiilor virtuale și fizice ale IRM, împreună cu semnalele de monitorizare STPN pentru asamblarea A/DRC: a) unghiul articulației θ_1 ; b) unghiul articulației θ_2 ; c) unghiul articulației θ_3 ; d) unghiul articulației θ_4 ; e) unghiul articulației θ_5 .

După dezvoltarea modelului digital și rularea simulărilor, implementările în timp real au fost integrate în mediul digital pentru validare și testare. Rezultatele obținute din sistemul fizic A/DRC au fost comparate cu cele din simulare pentru a asigura consistența și acuratețea (Figura 43). Diferențele minore observate în modelul DT provin în principal din algoritmul de cinematică inversă implementat în PLC, cauzate de rotunjirea expresiilor din calculele matriceale complexe și conversiile numerice, precum și de întârzieri minore de comunicație. Totuși, aceste erori se diminuează în timp și nu afectează performanța generală a sistemului. Modelul virtual al robotului ABB 120 IRM a reprodus cu acuratețe și fiabilitate procesul real A/DRC, reflectând fidel dinamica și comportamentul sistemului industrial real.

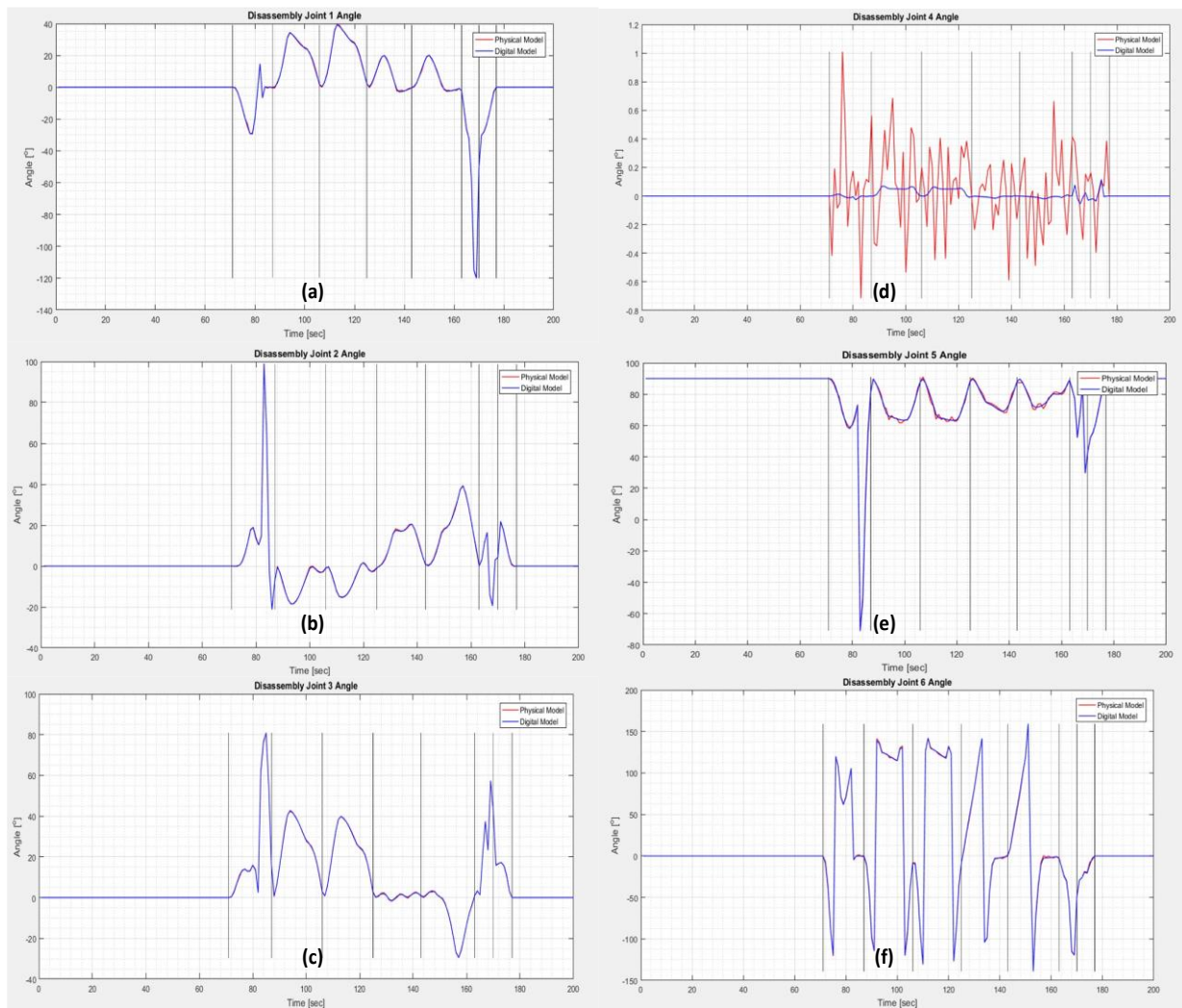


Figura 42. Unghiurile articulațiilor virtuale și fizice ale IRM, împreună cu semnalele de monitorizare STPN pentru dezasamblarea A/DRC: a) θ_1 joint angle; b) θ_2 joint angle; c) θ_3 joint angle; d) θ_4 joint angle; e) θ_5 joint angle; f) θ_6 joint angle. a) unghiul articulației θ_1 ; b) unghiul articulației θ_2 ; c) unghiul articulației θ_3 ; d) unghiul articulației θ_4 ; e) unghiul articulației θ_5 ; f) unghiul articulației θ_6 .

5.7. Rezultate și contribuții științifice

În cadrul acestui capitol a fost realizată cu succes implementarea unui cadru DT HIL pentru sistemul A/DRC, integrând SCADA bazat pe Cloud cu acces VPN, cinematică inversă integrată în logica PLC, MongoDB pentru stocarea datelor istorice și Node-RED pentru managementul IoT.

Contribuțiile-cheie, aliniate cu obiectivele cercetării, includ:

- Integrarea IoT Cloud Control, DT și conducerea ARS pentru monitorizare și control în timp real și de la distanță (OB.1);
- Comunicare modulară DT - Cloud prin Node-RED și protocoale standardizate (OB.1, OB.4);
- Implementare SCADA integrată în DT pentru monitorizare la distanță și control predictiv (OB.1, OB.6);

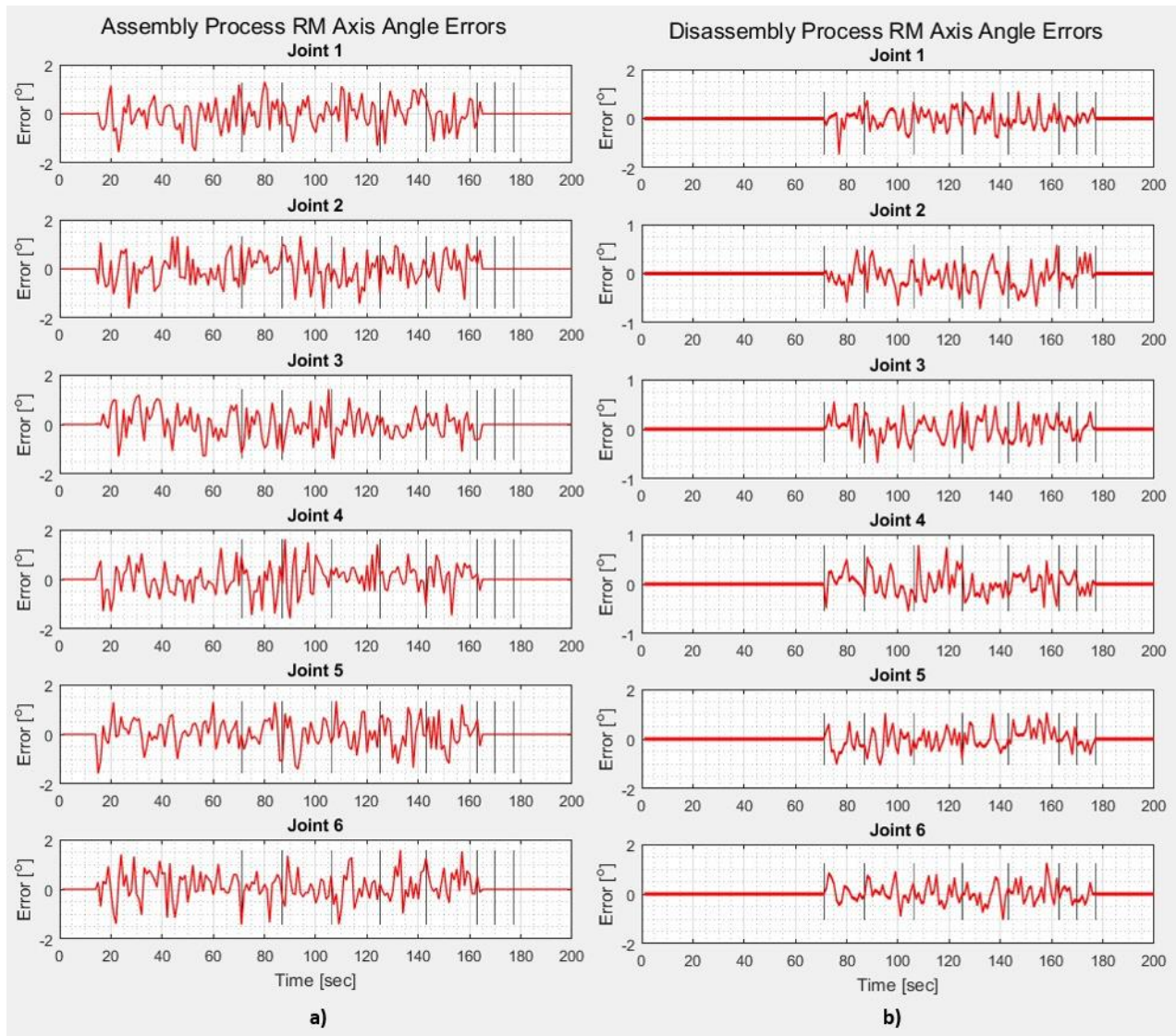


Figura 43. Compararea erorilor unghiurilor articulațiilor IRM între sistemul fizic A/DRC și modelul virtual DT: a) operația de asamblare; b) operația de dezasamblare.

- Mentenanță predictivă asistată de DT și calcul cinematic invers în timp real implementat în PLC pentru A/DRC (OB.6);
- Proiectare arhitectură ierarhică de control IoT-Cloud utilizând edge computing și conectivitate VPN, destinat producției inteligente și sustenabile (OB.1, OB.4, OB.6).

Sistemul demonstrează modul în care DT și IoT prin tehnologiile Cloud pot îmbunătăți eficiența producției, diagnosticarea predictivă și colaborarea la distanță, sprijinind tranziția către Industry 4.0/5.0.

Capitolul 6

Concluzii și contribuții științifice

Prezenta cercetare răspunde progreselor tehnologice propuse de noile concepte din Industry 4.0 și 5.0 prin implementarea și validarea unei metode DT pentru IoT Cloud Control al tehnologiilor de fabricație multifuncționale, integrate pe structuri mecatronice la scară de laborator, asistate de sisteme robotice. Prin integrarea sistemelor CPRS, a strategiilor de control, a programării bazate pe cinematică inversă și a unei arhitecturi IoT-Cloud, studiul contribuie semnificativ la creșterea performanței, adaptabilității și inteligenței mediilor de fabricație mecatronică.

Cercetările au fost desfășurate în laboratoarele Universității „Dunărea de Jos” din Galați, în cadrul proiectului complex PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0290.

O contribuție majoră constă în dezvoltarea unei platforme de control și achiziție de date bazată pe IoT Cloud, aplicabilă tehnologiilor de fabricație multifuncționale în sisteme mecatronice de laborator. Platforma permite monitorizarea în timp real, controlul de la distanță și accesul continuu la datele operaționale. Prin integrarea analizei datelor, sistemul optimizează planificarea sarcinilor, diagnosticul defecțiunilor și mentenanța predictivă, utilizând date istorice stocate în infrastructura Cloud.

Tehnologiile Cloud și Edge computing sunt utilizate pentru a aduce procesarea datelor cât mai aproape de sursa fizică, reducând latența și accelerând procesele decizionale. Pentru asigurarea integrității datelor și securității sistemului, cadrul DT include criptare, protocoale de comunicație securizate și control de acces restricționat.

Din punct de vedere tehnologic, o contribuție esențială este implementarea unei arhitecturi DT HIL pentru o celulă A/DRC, integrând un robot ABB 120 IRM cu 6 DOF, controlat printr-un PLC Siemens S7-1200 și vizualizat 3D în Siemens NX MCD. Soluția analitică de cinematică inversă, dezvoltată ca funcții modulare în PLC, asigură execuția rapidă și fiabilă a sarcinilor, cu adaptabilitate la diverse platforme robotice.

Sistemul SCADA proiectat extinde capabilitățile DT prin monitorizare la distanță, vizualizare în timp real și stocare în Cloud a datelor proceselor fizice și digitale. Aplicația SCADA funcționează ca interfață operațională pentru DT, susținând simularea proceselor, analiza datelor și accesul de la distanță prin Cloud și VPN. De asemenea, contribuie la mentenanța predictivă prin identificarea în timp real a anomaliilor și emiterea de alerte, reducând timpii de nefuncționare și riscurile asociate.

O altă contribuție științifică importantă este integrarea IoT-Cloud prin Node-RED și MongoDB Cloud pentru înregistrarea datelor istorice și strategii de mentenanță predictivă. Aceasta permite supravegherea dinamică a operațiunilor robotice și oferă un cadru scalabil pentru medii industriale distribuite. Platforma VC dezvoltată permite testarea, validarea și optimizarea aplicațiilor robotice înainte de implementarea fizică, reducând timpul și costurile de punere în funcțiune.

Rezultatele experimentale și simulările au evidențiat limitări specifice implementărilor DT, precum fidelitatea modelelor virtuale, calitatea datelor și necesitatea unor protocoale de comunicație robuste. Acestea au fost abordate prin modelare STPN, metode de sincronizare în timp real și infrastructuri IoT securizate. Soluțiile propuse sunt scalabile, adaptabile și pregătite pentru implementare în sisteme industriale de scară largă.

6.1. Contribuții științifice

- Integrarea interfeței de comunicație pentru IoT Cloud Control și a protocoalelor pentru sincronizarea și validarea datelor DT, contribuind direct la atingerea obiectivului OB.1.
- Proiectarea hardware, implementarea și ipotezele de lucru pentru A/D/RML asistat de ARS și A/DRC, îndeplinind obiectivul OB.1.
- Modelarea și controlul CPRS integrate în tehnologii de fabricație multifuncționale au fost proiectate și implementate, contribuind la realizarea obiectivului OB.2.
- Proiectarea și controlul unei arhitecturi multi-nivel pentru tehnologiile A/D/RML și A/DRC cu funcționalități IoT, DT, VC și Cloud au fost finalizate, susținând obiectivele OB.1 și OB.2.
- Introducerea strategiilor de control bazate pe VSS în sisteme mecatronice la scară de laborator a fost realizată, contribuind la atingerea obiectivelor OB.1 și OB.2.
- Modelarea cinematicii, analiza și validarea cu ABB 120 IRM au fost efectuate cu succes, în conformitate cu obiectivele OB.1 și OB.2.
- Studiul metodelor DT utilizate în monitorizarea și controlul IoT Cloud ale sistemelor de fabricație multifuncționale a condus la implementări validate, contribuind la realizarea obiectivelor OB.3, OB.4, OB.5 și OB.6.
- Modelarea și integrarea unui cadru DT bazat pe AR/VR pentru controlul în timp real al A/D/RML asistat de MCPRS, a fost realizată printr-o arhitectură hibridă care integrează modelare SHPN, cinematică inversă și sincronizare în timp real cu CAS, contribuind la atingerea obiectivului OB.3.
- Un DT bazat pe IoT Cloud-Control cu AR/VR și modelare STPN pentru eficientizarea celulei A/DRC, susținând planificarea interactivă și simularea interactivă, în conformitate cu obiectivul OB.4.
- Modelarea și integrarea unui DT bazat pe IoT Cloud Control și VC pentru A/DRC a permis monitorizarea și optimizarea operațiunilor prin simulare HIL și modelare cinematică 3D, contribuind la realizarea obiectivului OB.5.
- Modelul virtual DT și implementarea în PLC pe baza unei abordări analitice bazată pe cinematică inversă pentru ABB 120 IRM au permis replicarea precisă a mișcărilor unui RM cu 6-DOF, susținând obiectivele OB.5 și OB.7.
- Implementarea unui model virtual 3D în Siemens NX MCD pentru DT și control IoT Cloud a facilitat testarea HIL, simularea și mentenanță predictivă, contribuind la atingerea obiectivelor OB.5 și OB.7.
- SCADA Control Panel bazat pe DT pentru integrarea și validarea IoT Cloud a fost dezvoltat în TIA Portal, permițând monitorizare în timp real, control la distanță și analiză de date, în conformitate cu OB.5 și OB.7.
- Integrarea IoT Cloud History și controlul DT pentru eficiență, optimizare, mentenanță predictivă și diagnostic a fost realizată prin MongoDB și Node-RED, contribuind la obiectivele OB.5, OB.6 și OB.7.
- Abordarea limitărilor în implementarea DT cu IoT Cloud Control a evidențiat provocările legate de fiabilitatea modelului și latența comunicației în timp real, fiind analizate în cadrul obiectivelor OB.5 și OB.7.

6.2. Direcții de cercetare viitoare

Pe baza rezultatelor și contribuțiilor dezvoltate în cadrul acestei teze, au fost identificate mai multe direcții de cercetare viitoare menite să îmbunătățească performanța, adaptabilitatea și inteligența sistemelor de fabricație inteligentă. Complexitatea tot mai mare a proceselor industriale, determinată de tranziția către conceptele Industry 4.0 și Industry 5.0, impune evoluții continue în tehnologiile DT și IoT Cloud Control, în special în ceea ce privește adoptarea arhitecturilor inteligente de conducere și control și integrarea sistemelor CPRS. În acest context, sunt propuse următoarele direcții de cercetare:

- Optimizarea sistemelor de fabricație și aplicarea de metode, strategii și algoritmi de implementare a eficienței energetice.
- Îmbunătățirea acurateții modelării DT.
- Abordarea complexității integrării tehnologiilor emergente în proiectarea și operarea celulelor robotice.
- Integrarea cobotilor în celulele robotice.
- Integrarea tehnicilor avansate de AI și a tehnologiilor de mentenanță predictivă.
- Măsuri de securitate cibernetică.

6.3. Diseminarea rezultatelor

Rezultatele obținute în cadrul acestei cercetări au fost diseminate prin publicarea a nouăsprezece (19) lucrări științifice, sub formă de articole în reviste de specialitate și lucrări prezentate la conferințe internaționale, după cum urmează. Autorul tezei figurează ca prim autor în cinci (5) dintre aceste publicații, reflectând contribuția directă și semnificativă la activitatea de cercetare.

- 7 articole publicate în reviste indexate în baza de date ISI Web of Science.
- 9 lucrări prezentate la conferințe internaționale, publicate în IEEE Xplore și indexate în proceeding-uri ISI Web of Science (WOS).
- 3 articole publicate în platforma Preprints, contribuind la diseminarea rapidă a rezultatelor preliminare și la promovarea transparenței științifice.

Această activitate de publicare reflectă angajamentul autorului față de promovarea cercetării în domeniul sistemelor inteligente de fabricație și a tehnologiilor emergente asociate cu Industry 4.0 și 5.0.

6.3.1. Articole științifice publicate în Reviste de specialitate

- [SP1]. **Ionescu, D.**; Filipescu, A.; Simion, G.; Filipescu, A. 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* 2025, 25, 1821, WOS:001453930500001, ISSN:1424-8220, <https://doi.org/10.3390/s25061821>
- [SP2]. **Ionescu, D.**; Filipescu, A.; Simion, G.; Mincă, E.; Cernega, D.; Șolea, R.; Filipescu, A. Communication and Control of an Assembly, Disassembly and Repair Flexible Manufacturing Technology on a Mechatronics Line Assisted by an Autonomous Robotic

- System. Inventions 2022, 7, 43, WOS:000818151300001, ISSN:2411-5134, <https://doi.org/10.3390/inventions7020043>
- [SP3]. Filipescu, A.; Simion, G.; **Ionescu, D.**; Filipescu, A. 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 2024, 24, 7451, WOS:001377771600001, ISSN:1424-8220, <https://doi.org/10.3390/s24237451>
- [SP4]. Simion, G.; Filipescu, A.; **Ionescu, D.**; Filipescu, A. Cloud/VPN-Based Remote Control of a Modular Production System Assisted by a Mobile Cyber–Physical Robotic System - Digital Twin Approach. Sensors 2025, 25, 591, WOS:001405432100001, ISSN:1424-8220, <https://doi.org/10.3390/s25020591>
- [SP5]. Mincă, E.; Filipescu, A.; Cernega, D.; Șolea, R.; Filipescu, A.; **Ionescu, D.**; Simion, G. 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 2022, 22, 8153, WOS:000881435200001, ISSN:1424-8220, <https://doi.org/10.3390/s22218153>
- [SP6]. Simion, G.; Filipescu, A.; **Ionescu, D.**; Șolea, R.; Cernega, D.; Mincă, E.; Filipescu, A. Mobile Visual Servoing Based Control of a Complex Autonomous System Assisting a Manufacturing Technology on a Mechatronics Line. Inventions 2022, 7, 47, WOS:000858232500001, ISSN:2411-5134, <https://doi.org/10.3390/inventions7030047>
- [SP7]. Filipescu, A.; **Ionescu, D.**; Filipescu, A.; Mincă, E.; Simion, G. Multifunctional Technology of Flexible Manufacturing on a Mechatronics Line with IRM and CAS, Ready for Industry 4.0. Processes 2021, 9, 864, WOS:000654500500001, ISSN:2227-9717, <https://doi.org/10.3390/pr9050864>

6.3.2. Lucrări științifice publicate în proceeding-uri ale Conferințelor Internaționale

- [SP8]. **D. Ionescu**, A. Filipescu, G. Simion, R. Șolea, A. Filipescu and A. Serbencu, "PLC Inverse Kinematics Model-Driven Digital Twin Focused on HIL for a Flexible Robotic Cell," 2024 18th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), Dubai, United Arab Emirates, 2024, pp. 1195-1200, WOS:001435120000191, ISSN:2474-2953, <https://doi.org/10.1109/icarcv63323.2024.10821631>
- [SP9]. A. Filipescu, I. Stamatescu, G. Simion, **D. Ionescu** and A. Filipescu, "IoT-Cloud based Control of a Flexible Assembly/Disassembly Mechatronic System in the Framework of Industries 4.0 and 5.0," 2024 IEEE 18th International Conference on Control & Automation (ICCA), Reykjavík, Iceland, 2024, pp. 534-539, WOS:001294388500088, ISSN:1948-3449, <https://doi.org/10.1109/icca62789.2024.10591866>
- [SP10]. A. Filipescu, G. Simion, **D. Ionescu** and A. Filipescu, "Remote Control of a Flexible Robotic Cell as a Cyber Physical System for Assembly and Disassembly Based on SCADA and Industry 4.0," 2024 32nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Chania - Crete, Greece, 2024, pp. 634-639, ISSN:2473-3504, <https://doi.org/10.1109/med61351.2024.10566234>
- [SP11]. A. Filipescu, E. Minca, D. Cernega, R. Solea, A. Filipescu, G. Simion and **D. Ionescu**, "Digital Twin Based a Processing Technology Assisted by a MCPRS, Ready for Industry 5.0," 2023 27th International Conference on System Theory, Control and Computing

- (ICSTCC), Timisoara, Romania, 2023, pp. 297-302, ISSN:2473-5698, <https://doi.org/10.1109/icstcc59206.2023.10308478>
- [SP12]. A. Filipescu, D. Cernega, R. Solea, A. Filipescu, E. Minca, **D. Ionescu** and G. Simion, "Modeling and Control an A/DT Served by an ACPS based on SCADA, Industry 4.0 and 5.0," 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Sinaia, Romania, 2023, pp. 1-8, ISSN:1946-0759, <https://doi.org/10.1109/etfa54631.2023.10275349>
- [SP13]. A. Filipescu, R. Șolea, D. C. Cernega, **D. Ionescu**, G. Simion and A. Filipescu, "Complex Autonomous System Assisting a Manufacturing Technology on a Mechatronics Line. A Digital Twin Approach," 2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 2022, pp. 157-162, WOS: 000889980600028, ISSN:2372-1618, <https://doi.org/10.1109/icstcc55426.2022.9931812>
- [SP14]. A. Filipescu, D. C. Cernega, E. Minca, R. Șolea, **D. Ionescu** and G. Simion, "Digital Twin for a Mechatronics Line with Integrated Mobile Robotic Systems," 2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 2022, pp. 163-169, WOS:000889980600029, ISSN:2372-1618, <https://doi.org/10.1109/icstcc55426.2022.9931782>
- [SP15]. **D. Ionescu**, D. Cernega, R. Șolea, A. Filipescu, G. Simion and A. Filipescu, "CAS and IRM Integrated into a Multifunctional Flexible Manufacturing Technology on an A/D/RML," 2021 25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Iasi, Romania, 2021, pp. 541-546, WOS:000859487900089, ISSN:2372-1618, <https://doi.org/10.1109/icstcc52150.2021.9607127>
- [SP16]. **D. Ionescu**, "Trajectory - Tracking Cascade Control of a Nonholonomic WMR based on Kinematic and Dynamic Model, " 2019 6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), Galati, Romania, 2019, 9, ISBN:978-1-7281-2906-8/19/\$31.00 ©2019 IEEE.

6.3.3. Articole științifice publicate pe platforma Preprints

- [SP17]. **Ionescu, D.**; Filipescu, A.; Simion, G.; Filipescu, A, "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 2025, 25, 1821, <https://doi.org/10.20944/preprints202502.0693.v1>
- [SP18]. Simion, G.; Filipescu, A.; **Ionescu, D.**; Filipescu, A., "Cloud/VPN Based Remote Control of a Modular Production System Assisted by a Mobile Cyber Physical Robotic System—Digital Twin Approach, " Sensors 2025, 25, 591, <https://doi.org/10.20944/preprints202412.0302.v1>
- [SP19]. Filipescu, A.; Simion, G.; **Ionescu, D.**; Filipescu, A., "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 2024, 24, 7451, <https://doi.org/10.20944/preprints202410.1345.v1>

Bibliografie

- [1] Ma, Xin & Tao, Fei & Zhang, Meng & Wang, Tian & Zuo, Ying. (2019). *Digital twin enhanced human-machine interaction in product lifecycle*. Procedia CIRP. 83. 789-793. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.330>.
- [2] Botín-Sanabria, D.M.; Mihaita, A.-S.; Peimbert-García, R.E.; Ramírez-Moreno, M.A.; Ramírez-Mendoza, R.A.; Lozoya-Santos, J.d.J. *Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review*. Remote Sens. 2022, 14, 1335. <https://doi.org/10.3390/rs14061335>
- [3] Florescu, A. *Digital Twin for Flexible Manufacturing Systems and Optimization Through Simulation: A Case Study*. Machines 2024, 12, 785. <https://doi.org/10.3390/machines12110785>
- [4] Kritzinger, Werner & Karner, Matthias & Traar, Georg & Henjes, Jan & Sihn, Wilfried. (2018). *Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification*. IFAC-PapersOnLine. 51. 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.
- [5] Negri, Elisa; Fumagalli, Luca; Macchi, Marco. (2017). *A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems*. Procedia Manufacturing. 11. 939-948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>.
- [6] Guerra-Zubiaga, David & Bondar, Alex & Escobedo, Gilberto & Schumacher, Arthur. (2019). *Digital Twin in a Manufacturing Integrated System: Siemens TIA and PLM Case Study*. <http://dx.doi.org/10.1115/IMECE2019-11023>.
- [7] Chryssolouris G. *Manufacturing Systems - Theory and Practice*. New York, NY: Springer Verlag, 2005. 2-nd edition.
- [8] Tolio, T. *Design of Flexible Production Systems - Methodologies and Tools*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009.
- [9] Filipescu, A., Jr. *Contributions to Electric Drive of the Flexible Manufacturing Lines and Integrated Robots*. Ph.D. Thesis, "Dunarea de Jos" University of Galati, Galati, Romania, 2017.
- [10] Carlos-Mancilla, M.A.; Luque-Vega, L.F.; Guerrero-Osuna, H.A.; Ornelas-Vargas, G.; Aguilar-Molina, Y.; González-Jiménez, L.E. *Educational Mechatronics and Internet of Things: A Case Study on Dynamic Systems Using MEIoT Weather Station*. Sensors 2021, 21, 181. <https://doi.org/10.3390/s21010181>.
- [11] Florescu, A.; Barabas, S.A. *Modeling and Simulation of a Flexible Manufacturing System - A Basic Component of Industry 4.0*. Appl. Sci. 2020, 10, 8300. <https://doi.org/10.3390/app10228300>.
- [12] Berriche, A.; Mhenni, F.; Mlika, A.; Choley, J.-Y. *Towards Model Synchronization for Consistency Management of Mechatronic Systems*. Appl. Sci. 2020, 10, 3577. <https://doi.org/10.3390/app10103577>.
- [13] Minca, E.; Filipescu, A.; Voda, A. *Modelling and control of an assembly/disassembly mechatronics line served by mobile robot with manipulator*. Control Eng. Pract. 2014, 31, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.06.005>.
- [14] Filipescu, A.; Filipescu, A., Jr. *Simulated Hybrid Model of an Autonomous Robotic System Integrated into Assembly/Disassembly Mechatronics Line*. IFAC Proc. Vol. 2014, 47, 9223–9228. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00556>
- [15] Dragomir, F.; Mincă, E.; Dragomir, O.E.; Filipescu, A. *Modelling and Control of Mechatronics Lines Served by Complex Autonomous Systems*. Sensors 2019, 19, 3266. <https://doi.org/10.3390/s19153266>.
- [16] Filipescu, A.; Mincă, E.; Filipescu, A.; Coandă, H.-G. *Manufacturing Technology on a Mechatronics Line Assisted by Autonomous Robotic Systems, Robotic Manipulators and Visual Servoing Systems*. Actuators 2020, 9, 127. <https://doi.org/10.3390/act9040127>.
- [17] Filipescu, Adrian; Minca, E. Filipescu, Adriana *Mechatronics Manufacturing Line with Integrated Autonomous Robots and Visual Servoing Systems*. In Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, and Robotics, Automation and

- Mechatronics (CIS-RAM 2019), Bangkok, Thailand, 18–20 November 2019; pp. 620–625. <https://doi.10.1109/CIS-RAM47153.2019.9095848>.
- [18] Minca, E.; Filipescu, A.; Coanda, H.G.; Dragomir, F.; Dragomir, O.E.; Filipescu, A. *Extended Approach for Modeling and Simulation of Mechatronics Lines Served by Collaborative Mobile Robots*. In Proceedings of the 22nd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 10–12 October 2018; pp. 335–341. <https://doi.10.1109/ICSTCC.2018.8540713>.
- [19] F.F. Chen and E.E. Adams, "The Impact of Flexible Manufacturing Systems on Productivity and Quality", IEEE Transactions of Engineering Management, vol. 38, pp. 33–45, 1991. <http://dx.doi.org/10.1109/17.65758>
- [20] Boothroyd, G. and Althing, L., *Design for assembly and disassembly*, Annals of CIRP 41(2), pp: 625–636, 1992. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63249-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63249-1)
- [21] Radaschin, A., Filipescu, A., Minzu, V., Minca, E., and Filipescu, A., Jr., *Adaptive disassembly sequence control by using mobile robots and system information*, Proceeding of 15th IEEE International Conference in System Theory, Control and Computing, pp: 499–505, 14–16 Oct., Sinaia, Romania, 2011, ISBN: 978-973-621-323-6;
- [22] Radaschin, A., Voda, A., Minca E., and Filipescu, A., (2012) *Task Planning Algorithm in Hybrid Assembly/Disassembly Process*, In Proceeding of 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, May 23–25, 2012, Bucharest, ISSN: 1474-6670; ISBN: 978-3-902661-98-2, pp: 571–576. <https://doi.org/10.3182/20120523-3-RO-2023.00336>
- [23] Radaschin A., *Contribuții la conducerea inteligentă a roboților mobili utilizați în liniile flexibile de fabricație*, PhD Thesis, "Dunarea de Jos" University of Galati, Galati, 2012.
- [24] Filipescu, A., Minca, E., Filipescu, A., Jr., Petrea, G., *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, Year 2012: Volume 35, Number 1 electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics, ISSN 1221-454X, pp:17–22.
- [25] Filipescu, A., Jr., Petrea, G., Filipescu, A., Filipescu, S., *Modeling and Control of a Mechatronics System Served by a Mobile Platform Equipped with Manipulator*, Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, July 28–30, 2014, Nanjing, China, pp: 6577–6582, ISBN:978-988-15638-4-2, IEEE Catalog number CFP:1441A-CDR.DOI: [10.1109/ChiCC.2014.6896078](https://doi.org/10.1109/ChiCC.2014.6896078)
- [26] Filipescu, A., Jr., Petrea, G., Filipescu, A., Minca, E., Filipescu S., *Discrete modelling based control of a processing/reprocessing mechatronics line served by an autonomous robotic system*, The 4th International Symposium on Electrical, and Electronics Engineering, ISEEE 2013, 11–13, Oct, Galati, 2013, ISBN: 978-1-4799-2442-4/13/\$31.00 ©2013 IEEE.
- [27] Petrea, G., Filipescu, A., Minca, E., Voda, A., Filipescu, A., Jr., Serbencu, A., *Hybrid modelling based control of a processing/reprocessing mechatronics line served by an autonomous robotic system*, Proceedings of the 16th IEEE, International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC2013 11–13, Oct. Sinaia, 2013, pp: 410–415, ISBN: 978-1-4799-2228-4/13/\$31.00 ©2013 IEEE.
- [28] Petrea, G., Filipescu, A., Minca, E., Voda, A., Filipescu, A., Jr., *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, Year 2013, Volume 36, Number 1, pp:13–18, Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics, ISSN 1221-454X.
- [29] Guerrero, L. V.; López, V. V.; Mejía, J. E. (2014). *Virtual Commissioning with Process Simulation (Tecnomatix)*. Computer-Aided Design and Applications, 11(sup1), S11–S19. <https://doi.org/10.1080/16864360.2014.914400>

- [30] Maia, R. F., Bálsamo, A. J., Lopes, G. A. W., Massote, A. A., & Lima, F. (2020). *Evaluation of OPC-UA communication in an autonomous advanced manufacturing cell implementation*. *Gestão & Produção*, 27(4), e5414. <https://doi.org/10.1590/0104-530X5414-20>
- [31] Saha, O.; Dasgupta, P. *A Comprehensive Survey of Recent Trends in Cloud Robotics Architectures and Applications*. *Robotics* 2018, 7, 47. <https://doi.org/10.3390/robotics7030047>
- [32] SIMATIC SCADA Systems. Available online: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/scada.html> (accessed on 20 January 2025).
- [33] Node-RED web-based flow editor for remote control, Node-RED 4.0 released - News - Node-RED Forum (nodered.org). Available online: <https://discourse.nodered.org/t/node-red-4-0-released/88815> (accessed on 20 January 2025).
- [34] OpenCV. Available online: <https://opencv.org> (accessed on 20 January 2025).
- [35] Microsoft Visual Studio. Available online: <https://www.visualstudio.com/vs/cplusplus> (accessed on 20 January 2025).
- [36] ABB RobotStudio Desktop Robotics. Available online: <https://new.abb.com/products/robotics/software-and-digital/robotstudio/robotstudio-desktop> (accessed on 20 January 2025).
- [37] Roy, S.; Vo, T.; Hernandez, S.; Lehrmann, A.; Ali, A.; Kalafatis, S. *IoT Security and Computation Management on a Multi-Robot System for Rescue Operations Based on a Cloud Framework*. *Sensors* 2022, 22, 5569. <https://doi.org/10.3390/s22155569>
- [38] Nițulescu, I.-V.; Korodi, A. *Supervisory Control and Data Acquisition Approach in Node-RED: Application and Discussions*. *IoT* 2020, 1, 76-91. <https://doi.org/10.3390/iot1010005>
- [39] Omid, S.A.; Baig, M.J.A.; Iqbal, M.T. *Design and Implementation of Node-Red Based Open-Source SCADA Architecture for a Hybrid Power System*. *Energies* 2023, 16, 2092. <https://doi.org/10.3390/en16052092>
- [40] G. Da Silverira, D. Borenstein and F.S. Fogliatto, "Mass Customization: Literature Review and Research Directions", *International Journal of Production Economics*, vol. 72, pp. 1-13, 2001.
- [41] Hadi Barhaghtalab, Mojtaba & Meigoli, Vahid & Haghighi, Mohammad & Nayeri, Seyyed & Ebrahimi, Arash. (2018). *Dynamic analysis, simulation, and control of a 6-DOF IRB-120 robot manipulator using sliding mode control and boundary layer method*. *Journal of Central South University*. 25. 2219-2244. [10.1007/s11771-018-3909-2](https://doi.org/10.1007/s11771-018-3909-2).
- [42] Shihsen Peng & Mengchu Zhou (2003) *Sensor-based stage Petri net modelling of PLC logicprograms for discrete-event control design*, *International Journal of Production Research*, 41:3, 629-644, DOI:[10.1080/0020754021000042364](https://doi.org/10.1080/0020754021000042364)
- [43] Ravankar, A.; Ravankar, A.A.; Kobayashi, Y.; Hoshino, Y.; Peng, C.-C. *Path Smoothing Techniques in Robot Navigation: State-of-the-Art, Current and Future Challenges*. *Sensors* 2018, 18, 3170. <https://doi.org/10.3390/s18093170>.
- [44] Jun-Ku Lee, Jin-Bae Park, and Yoon-Ho Choi. *Tracking Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robot Based on New Sliding Surface with Approach Angle*. 3rd IFAC Symposium on Telematics Applications. The International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea. November 11-13, 2013. <https://doi.org/10.3182/20131111-3-KR-2043.00018>
- [45] Bong Seok Park, Sung Jin Yoo, Jin-Bae Park, and Yoon-Ho Choi. *Adaptive neural sliding mode control of nonholonomic wheeled mobile robots with model uncertainty*. *Control Systems Technology*, IEEE Transactions on, 17(1):207-214, 2009. [http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2008.922584](https://dx.doi.org/10.1109/TCST.2008.922584)
- [46] Vadim I. Utkin, Jurgen Guldner, and Jingxin Shi. *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*. CRC Press, second edition, 2009. ISBN 13:978-1-4200-6560-2. <https://doi.org/10.1201/9781420065619>

- [47] Ebrahim Samer El youssef, Nardenio Almeida Martins, Edson Roberto De Pieri, Ubirajara Franco Moreno. *PD-Super-Twisting Second Order Sliding Mode Tracking Control for a Nonholonomic Wheeled Mobile Robot*. Proceedings of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014.
- [48] Wei, B. A Tutorial on Robust Control, *Adaptive Control and Robust Adaptive Control - Application to Robotic Manipulators*. Inventions 2019, 4, 49. <https://doi.org/10.3390/inventions4030049>
- [49] Ciubucciu, G.; Filipescu, A.; Filipescu, A., Jr.; Filipescu, S.; Dumitrascu, B. *Control and Obstacle Avoidance of a WMR Based on Sliding-Mode, Ultrasounds and Laser*. In Proceedings of the 12th IEEE Int. Conf. on Control and Automation (ICCA), Kathmandu, Nepal, 1–3 June 2016; pp. 779–784, ISBN: 978-1-5090-1737-9. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2016.7505373>
- [50] Liu, J.; Pu, J.; Sun, L.; He, Z. *An Approach to Robust INS/UWB Integrated Positioning for Autonomous Indoor Mobile Robots*. Sensors 2019, 19, 950. <https://doi.org/10.3390/s19040950>
- [51] C. Berger, B. Rumpe, B. *Autonomous Driving-5 Years after the Urban Challenge: The Anticipatory Vehicle as a Cyber-Physical System*. In Proceedings of the 27th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2012), Essen, Germany, 3–7 September 2012. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.0413>
- [52] J. Kim, H. Kim, K. Lakshmanan, R.R. Rajkumar, *Parallel scheduling for cyber-physical systems: Analysis and case study on a self-driving car*. In Proceedings of the ACM/IEEE 4th International Conference on Cyber-Physical Systems, Philadelphia, PA, USA, 8–11 April 2013; ACM: New York, NY, USA; pp. 31–40. <https://doi.org/10.1145/2502524.2502530>
- [53] M. J. Bradley, E.M. Atkins, *Optimization and Control of Cyber-Physical Vehicle Systems*, Sensors 2015, 15, 23020-23049. <https://doi.org/10.3390/s150923020>.
- [54] Petrea, G., “Contribuții la conducerea liniilor de fabricație flexibilă deservite de roboți mobili echipați cu manipolatoare și sisteme servoing vizuale”, Teză de doctorat, Universitatea “Dunarea de Jos” din Galați, 2018.
- [55] Gasparetto, A.; Zanotto, V. *A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators*. Mech. Mach. Theory 2007, 42, 455–471. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2006.04.002>
- [56] Kim, J.; Park, J.; Chung, W. *Self-Diagnosis of Localization Status for Autonomous Mobile Robots*. Sensors 2018, 18, 3168. <https://doi.org/10.3390/s18093168>
- [57] Brassai, S.T.; Iantovics, B.; Enăchescu, C. *Optimization of Robotic Mobile Agent Navigation*. Stud. Inform. Control 2012, 21, 6. <http://dx.doi.org/10.24846/v21i4y201206>
- [58] Gasparetto, A., Boscariol, P., Lanzutti, A., Vidoni, R. (2015). *Path Planning and Trajectory Planning Algorithms: A General Overview*. In: Carbone, G., Gomez-Bravo, F. (eds) Motion and Operation Planning of Robotic Systems. Mechanisms and Machine Science, vol 29. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14705-5_1
- [59] Konstantinov, S.; Assad, F.; Ahmad, B.; Vera, D.A.; Harrison, R. *Virtual Engineering and Commissioning to Support the Lifecycle of a Manufacturing Assembly System*. Machines 2022, 10, 939. <https://doi.org/10.3390/machines10100939>
- [60] Deng, L.; Wilson, W.; Janabi-Sharifi, F. *Dynamic performance of the position-based visual servoing method in the cartesian and image spaces*. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, NV, USA, 27–31 October 2003; pp. 510–515. <https://doi.org/10.1109/IROS.2003.1250680>
- [61] Song, R.; Li, F.; Fu, T.; Zhao, J. *A Robotic Automatic Assembly System Based on Vision*. Appl. Sci. 2020, 10, 1157. <https://doi.org/10.3390/app10031157>
- [62] Corke, P.I.; Spindler, F.; Chaumette, F. *Combining Cartesian and polar coordinates in IBVS*. In Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO, USA, 11 December 2009; pp. 5962–5967. <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2009.5354569>

- [63] Chaumette, F., *A first step toward visual servoing using image moments*, Proc. of IEEE / RSJ IROS, (2002), pp. 378-383. <https://inria.hal.science/inria-00352087v1>
- [64] Chaumette, F., *Image moments: a general and useful set of features for visual servoing*, IEEE Trans. on Robotics, 20(4), (2004), pp. 713-723. <http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2004.829463>
- [65] Corke, P., Hutchinson, S., *A new partitioned approach to image based visual servo control*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 17(4), (2001), pp. 507–515. <http://dx.doi.org/10.1109/70.954764>
- [66] Hutchinson, S., Hager, G. and Corke, P., *A tutorial on visual servo control*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12(5), (1996), pp. 651–670. <https://doi.org/10.1109/70.538972>
- [67] Chesi, G. and Vicino, A., *Visual servoing for large camera displacements*. IEEE Transactions on Robotics, 20(4), (2004), pp. 724–735. <https://doi.org/10.1109/TRO.2004.829465>
- [68] L. Bascetta and P. Rocco, "Two-time scale visual servoing of eye-in-hand flexible manipulators," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 22, no. 4, pp. 818-830, Aug. 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2006.878946>.
- [69] Copot, C. *Control Techniques for Visual Servoing Systems*. Ph.D. Thesis, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, Iasi, Romania, 2012.
- [70] Petrea, G.; Filipescu, A.; Solea, R.; Filipescu, A., Jr. *Visual Servoing Systems Based Control of Complex Autonomous Systems Serving a P/RML*. In Proceedings of the 22nd IEEE, International Conference on System Theory, Control and Computing, (ICSTCC), Sinaia, Romania, 10–12 October 2018; pp. 323–328. <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2018.8540749>
- [71] Chen, Z.-Y.; Chen, C.-T. *A Remote Controlled Robotic Arm That Reads Barcodes and Handles Products*. Inventions 2018, 3, 17. <https://doi.org/10.3390/inventions3010017>
- [72] Karimov, A.; Kopets, E.; Kolev, G.; Leonov, S.; Scalera, L.; Butusov, D. *Image Preprocessing for Artistic Robotic Painting*. Inventions 2021, 6, 19. <https://doi.org/10.3390/inventions6010019>
- [73] F. Chapelle, and P. Bidaud, "Closed form solutions for inverse kinematics approximation of general 6R manipulators," Mechanism and machine theory, vol. 39, pp. 323-338, Mar. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2003.09.003>
- [74] Luo, S., Chu, D., Li, Q., & He, Y. (2022). *Inverse Kinematics Solution of 6-DOF Manipulator Based on Multi-Objective Full-Parameter Optimization PSO Algorithm*. Frontiers in Neurorobotics, 16, 791796. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.791796>
- [75] Cristoiu, C.; Nicolescu, A *a new approach for forward kinematic modeling of industrial robots*. Res. Sci. Today 2017, 13, 136.
- [76] Hartenberg, R. S.; Denavit, J. *A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices*. Journal of applied mechanics, vol. 77, pp. 215-221, June 1955, <https://doi.org/10.1115/1.4011045>
- [77] Rocha, Carlos; Tonetto, Cristiane; Dias, Altamir. (2011). *A comparison between the Denavit-Hartenberg and the screw-based methods used in kinematic modeling of robot manipulators*. Robotics and Computer-integrated Manufacturing - ROBOT COMPUT-INTEGR MANUF. 27. 723-728. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.12.009>.
- [78] Seven, O.F.; Ankarali, A. (2019). *Inverse kinematics analysis of IRB120 robot arm*. SETSCI Proc. ISAS '19, vol. 4, pp.383-390.
- [79] Nicolescu, A.F.; Ilie, F.M.; Alexandru T.G. *Forward and inverse kinematics study of industrial robots taking into account constructive and functional parameters modeling*. Proceedings in Manufacturing Systems, Volume 10, Issue 4, 2015, 157–16; ISSN 2067-9238.
- [80] Almaged, M. (2017). *Forward and Inverse Kinematic Analysis and Validation of the ABB IRB 140 Industrial Robot*. International Journal of Electronics, Mechanical and Mechatronics Engineering, 7(2), 1383–1401.

- [81] Lee C. S. G.; Ziegler, M. *Geometric approach in solving inverse kinematics of PUMA robots*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-20, no. 6, pp. 695-706, Nov. 1984, <https://doi.org/10.1109/TAES.1984.310452>
- [82] MathWorks. Available online: <https://www.mathworks.com> (accessed on 20 January 2025).
- [83] J. J. E. Slotine and W. Li, "*Applied nonlinear control*," in Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1991.
- [84] Ebrahim Samer Elyoussef, Edson Roberto De Pieri, Ubirajara F. Moreno, Marc Jungers. *Super-Twisting Sliding Modes Tracking Control of a Nonholonomic Wheeled Mobile Robot*. 10th IFAC Symposium on Robot Control International Federation of Automatic Control. Dubrovnik, Croatia; 2012. <https://doi.org/10.3182/20120905-3-HR-2030.00124>
- [85] Boiko, I., Fridman, L., Pisano, A., Usai, E. (2008). *A Comprehensive Analysis of Chattering in Second Order Sliding Mode Control Systems*. In: Bartolini, G., Fridman, L., Pisano, A., Usai, E. (eds) *Modern Sliding Mode Control Theory*. Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol 375. Springer, Berlin, Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-79016-7_2
- [86] 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, Sep. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2003.11.011>
- [87] Bartolini, G., Ferrara, A., Pisano, A., & Usai, E. (2001). *On the convergence properties of a 2-sliding control algorithm for non-linear uncertain systems*. International Journal of Control, 74(7), 718–731. <https://doi.org/10.1080/00207170010025230>.
- [88] 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, Feb. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.09.003>
- [89] B. Koo, Y. Yoo, S. Won, *Super-twisting algorithm based sliding mode controller for a refrigeration system*, Proceedings of 12th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju Island, pp. 34–38, 2012.
- [90] J. Li, L. Yan, *Finite-Time Terminal Sliding Mode Tracking Control for Piezoelectric Actuators*, 2014, pp. 1–9 (2014). <http://dx.doi.org/10.1155/2014/760937>
- [91] V. Utkin, "*Variable structure systems with sliding modes*," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 22, no. 2, pp. 212–222, 1977. <https://doi.org/10.1109/TAC.1977.1101446>
- [92] Norman I. Badler, Deepak Tolani - "*Real-Time Inverse Kinematics of the Human Arm*", University of Pennsylvania, January 1996. <https://doi.org/10.1162/pres.1996.5.4.393>
- [93] F. Pereira and L. Gomes, "*Combining Data-Flows and Petri Nets for Cyber-Physical Systems Specification*," in Designing Embedded Systems with the SIGNAL Programming Language, Springer, 2016, pp. 149–169. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-31165-4_7
- [94] 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*," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 53, no. 2, pp. 990-1002, Feb. 2023, doi: [10.1109/TSMC.2022.3170489](https://doi.org/10.1109/TSMC.2022.3170489).
- [95] C. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>
- [96] 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. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.038>
- [97] Mittal S, Khan MA, Romero D, Wuest T. *Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. 2017;233(5):1342-1361. [doi:10.1177/0954405417736547](https://doi.org/10.1177/0954405417736547).
- [98] Segovia, M.; Garcia-Alfaro, J. Design, *Modeling and Implementation of Digital Twins*. Sensors 2022, 22, 5396. <https://doi.org/10.3390/s22145396>.

- [99] Moiceanu, G.; Paraschiv, G. *Digital Twin and Smart Manufacturing in Industries: A Bibliometric Analysis with a Focus on Industry 4.0*. Sensors 2022, 22, 1388. <https://doi.org/10.3390/s22041388>.
- [100] Zizic, M.C.; Mladineo, M.; Gjeldum, N.; Celent, L. *From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology*. Energies 2022, 15, 5221. <https://doi.org/10.3390/en15145221>.
- [101] Nahavandi, S. *Industry 5.0 - A Human-Centric Solution*. Sustainability 2019, 11, 4371. <https://doi.org/10.3390/su11164371>.
- [102] Kallrath, J. *Planning and scheduling in the process industry*. In *Advance Planning and Scheduling Solution in Process Industry*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2003; pp. 201–227. <http://dx.doi.org/10.1007/s00291-002-0101-7>
- [103] He, Y.; Stecke, K.E.; Smith, M.L.; *Robot and machine scheduling with state-dependent part input sequencing in flexible manufacturing systems*. Int. J. Prod. Res. 2016, 54, 6736–6746. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1161252>
- [104] Barczak, A.; Dembińska, I.; Marzantowicz, Ł. *Analysis of the Risk Impact of Implementing Digital Innovations for Logistics Management*. Processes 2019, 7, 815. <https://doi.org/10.3390/pr7110815>.
- [105] Sirphyco Simulateur de Réseaux de Petri, Sirphyco-Simulateur-de-Reseaux-de-Petri. Available online: <https://www.toucharger.com> (accessed on 20 January 2025).
- [106] Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J. and Hicks, B. (2019) *Characterising the Digital Twin: A Systematic Literature Review*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 29, 36-52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- [107] Bahani, Abderrahim & Ech-Chhibat, Moulay El & Ait el Attar, Hicham & Samri, Hassan. (2023). *The Inverse Kinematics Evaluation of 6-DOF Robots in Cooperative Tasks Using Virtual Modeling Design and Artificial Intelligence Tools*. The International Journal of Robotics Research. 12. 121-130. <http://dx.doi.org/10.18178/ijmerr.12.2.121-130>.
- [108] M. Schluse and J. Rossmann, "From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems," 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), Edinburgh, UK, 2016, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/SysEng.2016.7753162>.
- [109] Pacheco-Gutierrez, S.; Niu, H.; Caliskanelli, I.; Skilton, R. *A Multiple Level-of-Detail 3D Data Transmission Approach for Low-Latency Remote Visualisation in Teleoperation Tasks*. Robotics 2021, 10, 89. <https://doi.org/10.3390/robotics10030089>
- [110] Kleppe, Adam L., and Olav Egeland. "Inverse kinematics for industrial robots using conformal geometric algebra." (2016): 63-75. <http://dx.doi.org/10.4173/mic.2016.1.6>
- [111] Siemens NX Mechatronics Concept Designer (MCD). Available online: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/cad-online/> (accessed on 20 January 2025).
- [112] Totally Integrated Automation Portal, TIA Portal V17. Available online: <https://www.siemens.com/tia-portal> (accessed on 20 January 2025).
- [113] Arenas-Rosales, F.; Martell-Chavez, F.; Sanchez-Chavez, I.Y.; Paredes-Orta, C.A. *Virtual UR5 Robot for Online Learning of Inverse Kinematics and Independent Joint Control Validated with FSM Position Control*. Robotics 2023, 12, 23. <https://doi.org/10.3390/robotics12010023>
- [114] VNC (Virtual Network Computing), RealVNC® Remote Access Software for Desktop and Mobile|RealVNC. Available online: <https://www.realvnc.com> (accessed on 20 January 2025).