

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI"
DIN IAȘI



CONTRIBUȚII ÎN DOMENIUL MĂNUȘILOR MECATRONICE DESTINATE RECUPERĂRII NEUROMOTORII

Kinetoterapeut principal: Elena Mihai (căsătorită) NECHIFOR

Conducător de doctorat : Prof. dr. ing. Marian-Silviu POBORONIUC

IAȘI, 2025

CONTRIBUȚII ÎN DOMENIUL MĂNUȘILOR MECATRONICE DESTINATE RECUPERĂRII NEUROMOTORII

Elena Mihai (căsătorită NECHIFOR)

domeniul Inginerie Electrică

Președinte comisie doctorat:
Conducător de doctorat:
Poboroniuc

Referenți oficiali:

Prof.dr.ing. Gheorghe Grigoraș
Prof.dr.ing. Marian-Silviu

Prenume Nume
Prenume Nume
Prenume Nume

Mulțumiri,

Finalizarea acestei teze de doctorat nu ar fi fost posibilă fără sprijinul, inspirația și încurajarea primite de la oameni deosebiți, cărora le port recunoștință și ale căror contribuții doresc să le consemnez cu respect și emoție.

În primul rând, adresez cele mai profunde mulțumiri conducătorului meu de doctorat, Prof. dr. ing. Marian-Silviu Poboroniuc, pentru îndrumarea științifică riguroasă, pentru răbdarea cu care mi-a oferit sfaturi și sugestii, dar mai ales pentru modul în care mi-a insuflat încrederea de a merge mai departe atunci când drumul cercetării părea anevoios. Exigența sa academică, dublată de deschiderea spre dialog și sprijinul constant, au constituit pentru mine un model de profesionalism și integritate.

Mulțumirile mele se îndreaptă, de asemenea, către profesorii și cercetătorii din cadrul Facultății de Inginerie Electrică, Energetică și Informatică Aplicată a Universității Tehnice "Gheorghe Asachi" din Iași, care au contribuit prin sugestiile și observațiile lor la consolidarea bazei științifice a acestei lucrări. Exprim, de asemenea, recunoștința mea domnului inginer Gabriel-Florentin Chiriac pentru sprijinul acordat în această activitate de cercetare.

Nu pot să nu îmi exprim profunda gratitudine față de familia mea, care a fost și rămâne fundamentul acestui parcurs. Părinților mei le sunt profund recunoscătoare pentru educația și valorile cu care m-au crescut, oferindu-mi permanent un exemplu de dăruire și perseverență. Soțului meu îi mulțumesc pentru înțelegere, răbdare și sprijin necondiționat, pentru încurajările neconținute și pentru faptul că mi-a fost alături în momentele cele mai solicitante. Copilului nostru îi dedic această lucrare, ca semn al iubirii neclintite și al dorinței de a-i fi model prin muncă și perseverență. Răbdarea, încurajările și încrederea lor mi-au oferit forța de a depăși obstacolele și de a ajunge la finalul acestui demers.

Tuturor le transmit cele mai sincere mulțumiri și întreaga mea recunoștință.

Elena Nechifor

Iași, 2025

Cuprins

Capitolul 1. Introducere.....	4
1.1. Importanța temei	7
1.2. Tipologia și prevalența accidentului vascular cerebral – date epidemiologice	Error! Bookmark not defined.
1.3. Studiul structurii și dinamicii pieței dispozitivelor medicale.....	Error! Bookmark not defined.
1.4. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 2. Noțiuni fundamentale de anatomie și biomecanică a mâinii.....	8
2.1. Mecanisme de control	Error! Bookmark not defined.
2.2. Modelarea matematică a mâinii	10
2.3. Dinamica și acționarea	Error! Bookmark not defined.
2.3. Forța musculară	Error! Bookmark not defined.
2.4. Taxonomia tiparelor de prehensiune	Error! Bookmark not defined.
2.5. Neuroplasticitatea.....	Error! Bookmark not defined.
2.6. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 3. Intervențiile de reabilitare destinate mâinii în cadrul recuperării neurologice.....	11
3.1. Evoluția clinică a accidentului vascular cerebral	Error! Bookmark not defined.
3.2. Evaluarea pacienților post-AVC	Error! Bookmark not defined.
3.3. Obiectivele reabilitării mâinii.....	Error! Bookmark not defined.
3.4. Intervenții terapeutice pentru diminuarea spasticității ..	Error! Bookmark not defined.
3.4.1. Stretching-ul	Error! Bookmark not defined.
3.5. Stimularea electrică funcțională (FES) în reabilitarea mâinii post AVC	Error! Bookmark not defined.
3.6. Aplicabilitatea terapiei cu oglindă în neuroreabilitarea membrului superior	Error! Bookmark not defined.
3.7. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
Capitol 4. Contextul actual al sistemelor de acționare ale dispozitivelor utilizate în reabilitarea neurologică	12

4.1. Acționare electrică (electromecanică)	Error! Bookmark not defined.
4.2. Acționare pneumatică (cu aer comprimat)	Error! Bookmark not defined.
4.3. Acționare hidraulică	Error! Bookmark not defined.
4.4. Acționare prin cabluri (tendon-driven systems)	Error! Bookmark not defined.
4.5. Acționare hibridă	Error! Bookmark not defined.
4.6. Acționare prin materiale inteligente	Error! Bookmark not defined.
4.7. Integrarea mediilor imersive (VR, AR și MR) în recuperarea neurologică	Error! Bookmark not defined.
Bookmark not defined.	
4.7.1. Realitatea virtuală (VR) în neuroreabilitare	Error! Bookmark not defined.
4.7.2. Realitatea mixtă (MR)	Error! Bookmark not defined.
4.7.3. Realitatea augmentată în neuroreabilitare	Error! Bookmark not defined.
4.8. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 5. Propunerea unui sistem original pentru recuperarea mâinii, MANOREHAB	13
5.1. Introducere	13
5.2. Scopul cercetării	13
5.3. Arhitectura și funcționalitatea sistemului MANOREHAB	14
5.3.1. Proiectarea actuatorului pneumatic	14
5.3.2. Proiectarea mânușii pneumatice	15
5.3.3. Proiectarea sistemului pneumatic	16
5.3.4. Sensor presiune / Vaccum (vid)	Error! Bookmark not defined.
5.3.5. Funcția de comutare	Error! Bookmark not defined.
5.3.6. Teste Actuator	Error! Bookmark not defined.
5.3.7. Modelarea traiectoriei unui actuator pneumatic în funcție de forma întâlnită, dedusă prin senzorii de presiune/vacuum.....	Error! Bookmark not defined.
5.3.8. Principiul de funcționare al actuatorului pneumatic de tip burduf segmentat	Error! Bookmark not defined.
Bookmark not defined.	
5.4. Descriere arhitectura hardware (electrică)	19
5.5. Realizarea schemei electrice în SEE Electrical	21

5.5.1. Descrierea fluxului de lucru în arhitectura software	23
5.5.2. Unity & Microsoft Visual Studio	Error! Bookmark not defined.
5.5.3. Microsoft HoloLens 2	24
5.5.4. Definirea gradelor de libertate la HoloLens 2	25
5.5.5. Control HoloLens 2	26
5.5.6. Maparea spațiului	29
5.6. Integrarea și interacțiunea hologramei sistemului MANOREHAB	30
5.7. Integrarea sistemului MANOREHAB în mediul Unity	32
5.8. Utilizare AR-HoloLens 2 în sistemul MANOREHAB	33
5.9. Configurarea rețelei și a serverului web.....	36
5.10. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 6. Realizarea testelor pe utilizatori umani	38
6.1. Obiectivele testării:	39
6.1.1. Protocol experimental	39
6.2. Instrumente de evaluare utilizate.....	40
6.3. Rezultatele obținute pe utilizatori umani	40
6.4. Interpretarea rezultatelor testării sistemului MANOREHAB	42
6.5. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 7. Contribuții originale și perspective viitoare	42
7.1. Sinteza contribuțiilor și direcțiilor viitoare	Error! Bookmark not defined.
7.2. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 8. Valorificarea rezultatelor	45
8.1. Articole	46
8.2. Premii	46
8.3. Direcții viitoare de cercetare	47
ANEXA 1 - Premii obținute pe perioada doctoratului	
ANEXA 2 – Program conectare Hololens2 cu EPS	32

ANEXA 3 – Program Mișcare Mână

ANEXA 4 – Program Urmărire mișcare degete

Bibliografie

Capitolul 1. Introducere

1.1. Importanța temei

În contextul actual, caracterizat de o dinamică fără precedent a progresului tehnologic, sistemele mecatronice se configurează drept un domeniu de excelență în sfera cercetării și dezvoltării ingineresti, situat la intersecția strategică a patru piloni fundamentali: mecanica, electronica, automatizarea și informatica.

Un domeniu în care mecatronica își demonstrează în mod elocvent potențialul transformator este medicina de reabilitare, aceasta dobândind un statut strategic în contextul creșterii continue a prevalenței bolilor cronice, a leziunilor neurologice și traumatice, precum și al imperativului reintegrării funcționale și sociale a pacienților.

Conceptul de reabilitare robotizată desemnează ansamblul de sisteme mecatronice avansate, echipate cu mecanisme de acționare, senzori și module de control electronic, proiectate pentru a asista, ghida sau aplica o rezistență controlată mișcărilor pacientului în cadrul unui protocol terapeutic prestabilit.

Aceste sisteme operează pe baza unor arhitecturi de control în buclă închisă, utilizând feedback senzorial pentru monitorizarea parametrilor cinematici și dinamici, precum poziția, viteza, accelerația și forțele exercitate asupra segmentelor corporale implicate.

Sistemele de reabilitare robotizată de ultimă generație integrează funcționalități avansate, precum feedback multimodal (vizual, auditiv, haptic), algoritmi de control adaptiv și învățare automată, medii imersive bazate pe realitate virtuală sau augmentată, precum și interfețe om-mașină optimizate din punct de vedere ergonomic.

Reabilitarea robotizată își găsește aplicabilitatea predominantă în recuperarea funcțională post-accident vascular cerebral (AVC), în paralizii cerebrale, în patologiiile măduvei spinării, în traumatismele ortopedice, precum și în bolile neurodegenerative cu afectare motorie progresivă.

Accidentul vascular cerebral (AVC) constituie una dintre principalele cauze de dizabilitate motorie la nivel global, exercitând un impact major asupra funcționalității membrelor superioare, cu afectare particulară a mâinii și degetelor.

Datele epidemiologice recente (GBD 2021) indică faptul că incidența totală a AVC a crescut cu peste **70%** din 1990 până în prezent, cu o povară disproporționată în țările cu venituri mici și medii, unde accesul la prevenție și tratament acut este limitat [3], [6].

Capitolul 2. Noțiuni fundamentale de anatomie și biomecanică a mâinii

În cadrul activităților vieții cotidiene, mâinile reprezintă un element funcțional central, constituind unul dintre principalele mecanisme prin care omul percepe și influențează mediul înconjurător.

Funcția lor este duală: pe de o parte, facilitează percepția senzorială a mediului - incluzând detecția tactilă, aprecierea temperaturii și percepția texturii, iar pe de altă parte, permit manipularea precisă a obiectelor și operarea diverselor dispozitive, fiind principalul instrument mecanic al ființei umane.

De asemenea, mâinile au un rol esențial în transmiterea mesajelor non-verbale și contribuie în mod semnificativ la calitatea interacțiunilor dintre oameni.

În consecință, pentru ca un program de reabilitare a membrului superior să fie eficient în restabilirea funcționalității și a calității vieții pacienților, este imperativă recuperarea mobilității mâinii.

Pentru a înțelege în profunzime mecanismele mișcării umane, este esențială cunoașterea unor concepte fundamentale de anatomie, disciplina științifică ce studiază forma, structura și organizarea corpului uman, atât la nivel macroscopic, cât și microscopic.

Anatomia furnizează baza necesară pentru descrierea corectă a pozițiilor, segmentelor și articulațiilor, precum și a relațiilor funcționale dintre acestea.

Biomecanica mișcării umane reprezintă ramura științei care descrie, analizează și cuantifică mișcarea corpului, utilizând principii din mecanică, fiziologie și anatomie.

În cazul membrului superior, principiile biomecanicii sunt fundamentale pentru conceperea și aplicare a exoscheletelor robotice. O înțelegere aprofundată a aspectelor biomecanice precum gradele de libertate ale articulațiilor, amplitudinea mișcărilor fiziologice, distribuția vectorilor de forță și momentele articulare permite proiectarea unor dispozitive capabile să reproducă cât mai fidel mișcările naturale.

Această compatibilitate funcțională și ergonomică dintre utilizator și sistemul robotic reprezintă o condiție esențială atât pentru obținerea unor rezultate terapeutice eficiente, cât și pentru asigurarea confortului pacientului pe parcursul procesului de reabilitare.

Mâna umană constituie un ansamblu anatomic și funcțional deosebit, capabil să asigure atât finețea mișcărilor necesare activităților de precizie, cât și forța prinderilor puternice.

Din punct de vedere structural, este alcătuită din 27 de oase, organizate în trei categorii: carpiene (8), metacarpiene (5) și falange (14). Oasele carpiene sunt organizate în două rânduri proximal (scafoid, semilunar, piramidal și pisiform) și distal (trapez, trapezoid, capitat și hamat)

iar, prin asocierea cu structurile ligamentare, dau naștere unor arcuri care asigură mâinii atât stabilitatea necesară, cât și o flexibilitate ridicată [1,2].

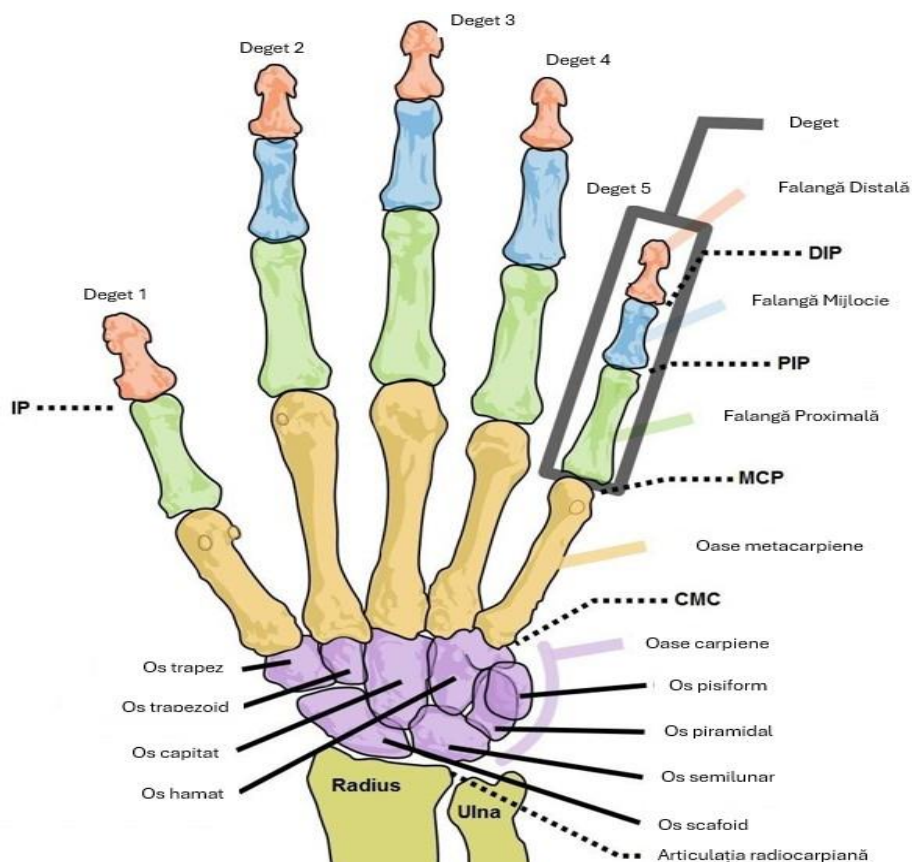


Figura 2.1. Sistemul osos al mâinii umane (adaptare după [3]).

Oasele carpiene sunt unite prin articulații intercarpiene, articulate proximal cu radiusul și ulna prin articulația radiocarpiană și distal cu metacarpalele prin articulațiile carpometacariene (CMC).

Rol funcțional și biomecanic

- **Articulațiile CMC** asigură orientarea de bază a degetelor în plan spațial; policele, prin articulația CMC selară, permite formarea celor trei tipuri majore de prindere: **prehensiune de forță** (*power grip*), **prehensiune de precizie** (*precision grip*) și **prehensiune laterală** (*key grip*).
- **Articulațiile MCP** reglează flexia și extensia mâinii, fiind implicate atât în prinderea globală, cât și în adaptarea la forme neregulate.
- **Articulațiile PIP și DIP** modulează presiunea exercitată asupra obiectelor și permit ajustări milimetrice ale poziției segmentului terminal al degetului.

2.2. Modelarea matematică a mâinii

Modelarea matematică a mâinii are un rol central în domenii variate, de la robotică și inginerie mecatronică până la neuroștiințe și recuperare medicală. În robotică, reproducerea dexterității umane constituie o provocare majoră, iar descrierea matematică a structurii și mișcărilor mâinii este esențială pentru proiectarea unor dispozitive antropomorfe sau exoschelete.

În reabilitarea medicală, în special în cazul pacienților cu accident vascular cerebral sau boli neuromusculare, modelele matematice sunt utilizate pentru a ghida dezvoltarea protocoalelor de terapie asistată robotic și pentru a integra datele biomecanice în aplicații de realitate augmentată sau mixtă.

Scopul acestui capitol este de a oferi o prezentare narativă, dar matematic riguroasă, a modului în care poate fi realizată modelarea mâinii. Vom aborda progresiv anatomia și gradele de libertate, formalismul cinematic, descrierea mișcărilor prin parametrii Denavit–Hartenberg (DH) și prin metoda Product of Exponentials (PoE), relația dintre viteze și forțe exprimată prin Jacobieni, modelarea contactului și a prinderilor (grasp), ecuațiile dinamice ale mișcării, rolul acționării tendon-musculare și reducerea dimensionalității prin așa-numitele „synergies”.

Descrierea matematică a poziției și orientării segmentelor se face folosind transformări omogene, iar două metode consacrate sunt:

- **Denavit–Hartenberg (DH)** – utilizează patru parametri pentru a descrie relația dintre două segmente consecutive. Este simplă și foarte utilizată în robotică.
- **Product of Exponentials (PoE)** – folosește reprezentarea mișcărilor prin exponențiale de șuruburi (twists), fiind elegantă și generală

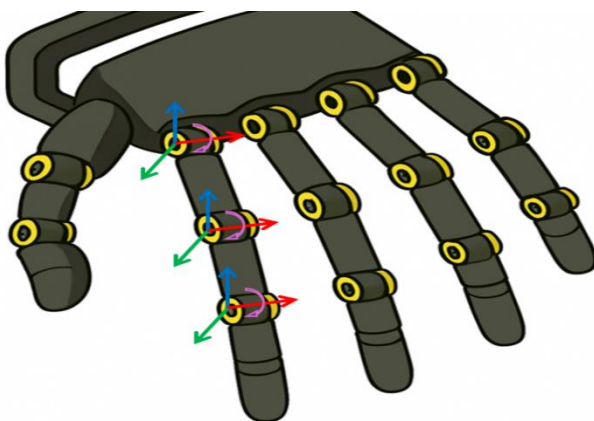


Figura 2.7. Model cinematic al mâinii.

Capitolul 3. Intervențiile de reabilitare destinate mâinii în cadrul recuperării neurologice

Reabilitarea neurologică a mâinii constituie un element central și deosebit de complex al terapiei după accident vascular cerebral (AVC), post-traumatism cranio-cerebral sau în afecțiuni neurodegenerative (ex. scleroză multiplă, boala Parkinson, distrofii musculare).

Mâna este esențială pentru independența funcțională, iar recâștigarea mobilității și a dexterității are un impact major asupra calității vieții pacientului.

Recuperarea funcționalității mâinii în contextul afecțiunilor neurologice reprezintă un proces complex și multidimensional, în care intervențiile terapeutice trebuie instituite precoce, adaptate evoluției clinice și susținute pe termen lung.

Instituirea timpurie a tratamentului recuperator are un rol fundamental, deoarece primele săptămâni și luni după un accident vascular cerebral sau un traumatism cranio-cerebral reprezintă perioada cu cel mai înalt potențial de neuroplasticitate.

În această etapă, reorganizarea corticală și formarea de noi circuite neuronale sunt stimulate prin mobilizare precoce și prin implicarea activă a pacientului în programe personalizate de exerciții.

În concluzie, reabilitarea mâinii în afecțiunile neurologice nu poate fi redusă la o singură metodă, ci reprezintă rezultatul integrării mai multor tipuri de intervenții. Instituirea precoce a terapiei, mobilizarea sistematică, exercițiile funcționale orientate pe sarcini, controlul spasticității prin mijloace farmacologice și fizicale, utilizarea stimulării electrice funcționale, valorificarea terapiei cu oglinda și susținerea procesului de neuroplasticitate conturează un cadru complex, dar necesar, pentru recuperarea optimă a funcției mâinii.

Astfel, abordarea terapeutică devine una holistică, în care fiecare tehnică contribuie la același obiectiv final: recâștigarea independenței funcționale și îmbunătățirea calității vieții pacientului.

Capitol 4. Contextul actual al sistemelor de acționare ale dispozitivelor utilizate în reabilitarea neurologică

Un element central în proiectarea dispozitivelor de reabilitare a mâinii îl constituie mecanismul de acționare, prin care se generează și se transmite forța necesară mobilizării articulațiilor. Alegerea tipului de acționare influențează în mod direct performanța funcțională, gradul de portabilitate, siguranța pacientului și fidelitatea reproducerii mișcărilor naturale.

În literatura de specialitate sunt descrise mai multe soluții tehnologice, fiecare cu avantaje și limitări specifice în realizarea activităților vieții cotidiene.

Analiza tipurilor de acționări aplicate în reabilitarea neurologică a mâinii evidențiază faptul că fiecare tehnologie – electrică, pneumatică, hidraulică, pe cabluri, hibridă sau bazată pe materiale inteligente – prezintă avantaje și limitări specifice, iar integrarea lor cu realitatea virtuală (VR) și realitatea mixtă (RM) conturează noi perspective pentru terapii personalizate și mai eficiente.

Această convergență între robotică, neuroștiințe și tehnologii digitale confirmă direcția viitoare a reabilitării, orientată spre soluții multimodale, capabile să combine susținerea mecanică, feedback-ul senzorial și implicarea activă a pacientului într-un mediu motivațional.

În România, însă, integrarea acestor tehnologii se află încă într-o etapă incipientă, ceea ce subliniază necesitatea unor cercetări aplicative menite să valideze atât eficiența, cât și fezabilitatea utilizării sistemelor robotizate în practica clinică.

Totodată, lipsa unor protocoale terapeutice standardizate și insuficiența datelor obiective care să sprijine deciziile clinice rămân provocări majore ce trebuie depășite pentru a facilita implementarea pe scară largă a acestor soluții.

Astfel, acționarea hibridă nu reprezintă doar o combinație tehnică, ci o filozofie de design orientată spre obținerea unor dispozitive cu funcționalitate sporită, adaptabile la nevoile pacientului și capabile să ofere o recuperare personalizată.

Această categorie de soluții are un potențial major de a redefini viitorul reabilitării neurologice, prin îmbinarea inteligenței biologice cu suportul mecanic și electronic al tehnologiilor moderne.

Capitolul 5. Propunerea unui sistem original pentru recuperarea mâinii, MANOREHAB

5.1. Introducere

Recuperarea funcției mâinii constituie o provocare majoră în domeniul reabilitării neurologice, având în vedere complexitatea biomecanică a acestui segment și rolul său esențial în activitățile vieții cotidiene.

Progresele recente în domeniul mecatronicii și al tehnologiilor digitale au favorizat apariția unor soluții inovatoare de sprijin în antrenamentul motor, capabile să ofere exerciții mai precise, interactive și adaptabile nevoilor pacienților.

5.2. Scopul cercetării

Scopul cercetării de față se concentrează pe proiectarea, dezvoltarea și validarea sistemului mecatronic MANOREHAB, un instrument inovator care marchează un progres semnificativ în domeniul reabilitării funcției motorii a mâinii.

Originalitatea acestui sistem constă în îmbinarea realității augmentate, prin intermediul ochelarilor Microsoft HoloLens 2, cu o mânășă pneumatică, capabilă să susțină și să ghideze mișcările de flexie și extensie ale mâinii și degetelor.

Ochelarii HoloLens 2 facilitează proiecția unor holograme tridimensionale interactive direct în câmpul vizual al utilizatorului, acestea fiind corelate în timp real cu mișcările executate prin intermediul mânășii.

Mânășa integrează un mecanism de control pneumatic de mare precizie, care reglează presiunea aerului pentru a furniza o asistență activă, adaptată nivelului de performanță al utilizatorului.

Convergența acestor tehnologii creează un cadru imersiv și motivant, în care subiectul este stimulat să repete mișcări funcționale esențiale, favorizând atât procesele de neuroplasticitate, cât și reînvățarea strategiilor motorii.

În cadrul laboratorului Universității Tehnice „Gheorghe Asachi” din Iași s-au desfășurat etapele de concepție și de evaluare experimentală ale sistemului MANOREHAB.

Această etapă a constituit un pas esențial pentru validarea tehnologică a platformei și pentru fundamentarea unor cercetări ulterioare în contexte clinice.

Studiul de față a vizat testarea sistemului pe subiecți sănătoși, cu scopul de a evalua

acuratețea mecanismului de acționare, ergonomia dispozitivului, precum și gradul de interactivitate oferit de componenta de realitate augmentată.

Rezultatele obținute reprezintă o etapă esențială în procesul de validare tehnologică a sistemului și constituie baza necesară pentru integrarea sa ulterioară în protocoale de reabilitare destinate pacienților cu afecțiuni neurologice.

În acest sens, cercetarea de față se aliniază tendințelor actuale din domeniu, orientate către dezvoltarea unor soluții complexe și interdisciplinare, aflate la confluența dintre inginerie, neuroștiințe și tehnologiile emergente, cu obiectivul de a crește calitatea și eficiența intervențiilor de recuperare.

5.3. Arhitectura și funcționalitatea sistemului MANOREHAB

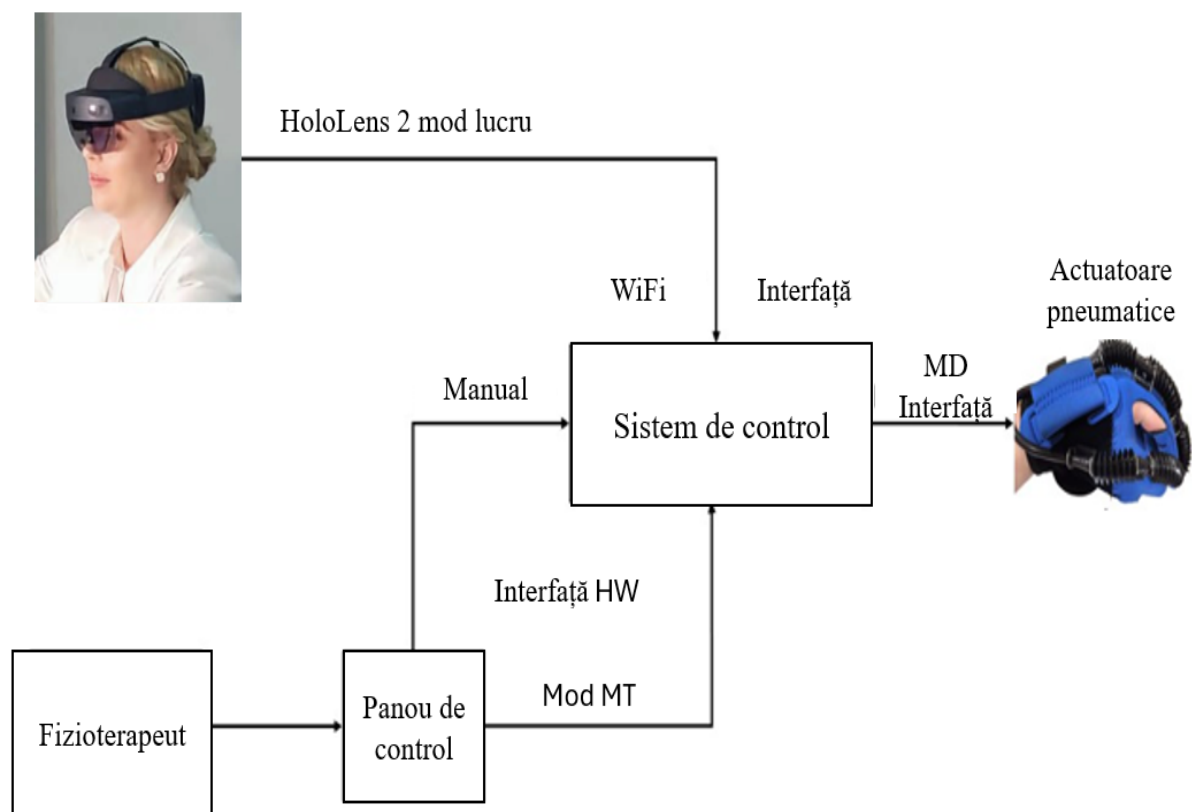


Figura 5.1. Arhitectura Sistem mecatronic MANOREHAB.

5.3.1. Proiectarea actuatorului pneumatic

Mișcările principale ale degetelor umane sunt reprezentate de flexie și extensie, realizate prin rotația articulațiilor digitale. În cazul policelui, adducția și abducția au un rol funcțional deosebit, fiind esențiale pentru realizarea prehensiunii, motiv pentru care acestea trebuie

integrate în proiectarea mânușilor robotice moi.

Deși policele dispune de grade de libertate (DOF) mai complexe comparativ cu celelalte degete, mișcările sale fundamentale pot fi reproduse în mod satisfăcător printr-o simplificare adecvată a modelării biomecanice.

În plus, articulațiile fiecărui deget prezintă frecvent o mișcare cuplată, mai ales în timpul flexiei și extensiei. Pornind de la aceste considerente, am implementat mișcările de flexie/extensie printr-un design structural optimizat, bazat pe un mecanism pneumatic subacționat simplu, care asigură atât eficiență mecanică, cât și reducerea complexității de comandă.

Actuatoarele pneumatice moi utilizate în literatura de specialitate pentru dezvoltarea mânușilor robotice (vezi Fig. 5.2 (a)) sunt, de regulă, fabricate din cauciuc siliconic și au o structură formată dintr-o cameră de aer, un strat limitativ flexibil inelastic și elemente de armare.

În funcție de arhitectura lor, acestea pot realiza mișcări de îndoire sau de îndoire cu torsiune, fiind astfel clasificate drept actuatoare de îndoire sau actuatoare de îndoire cu torsiune.

Cu toate acestea, majoritatea acestor sisteme utilizează drept sursă principală de acționare un compresor de aer. Atunci când actuatorul dispune de un singur compartiment pneumatic, acesta este capabil să genereze activ doar o mișcare, revenirea la poziția inițială realizându-se pasiv, prin evacuarea presiunii.

Modelul recent dezvoltat, Actuatorul Pneumatic Pozitiv–Negativ (PNPA), combină funcționalități de flexie/extensie și adducție/abducție, având ca obiectiv reproducerea fidelă a mobilității fiziologice a degetelor și a policelui.

În etapa de proiectare, burdufurile și conectorii sunt dimensionați în funcție de particularitățile anatomice ale degetelor.

5.3.2. Proiectarea mânușii pneumatice

Pentru a asigura confortul în utilizare și ușurința de echipare pentru pacient, mânușa a fost proiectată în *Autodesk Maya*, având ca obiectiv integrarea modelului atât în software-ul *Unity* – utilizat pentru generarea hologramei vizualizate prin ochelarii *HoloLens 2* – cât și pentru simularea mișcărilor și evaluarea rezistenței materialelor. Mânușa este realizată dintr-un material textil moale, elastic și rezistent la uzură (vezi Fig. 5.4 (a)).

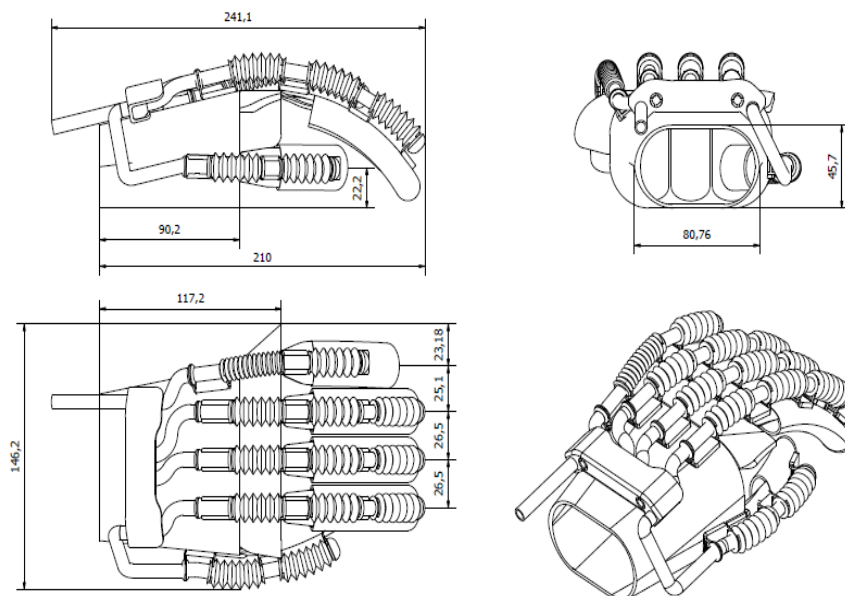


Figura 5.3. Mănușă pneumatică proiectată în Autodesk Maya.

Designul deschis al mănușii permite o fabricare rapidă și adaptabilă, în funcție de dimensiunile anatomice ale mâinii fiecărui pacient, oferind astfel un grad ridicat de personalizare. Exceptând articulațiile distale ale celor cinci degete, unde se menține un înveliș tip degetar pentru a asigura stabilizarea, întreaga suprafață palmară rămâne deschisă, crescând confortul și ventilarea locală.

Pentru fixare, se utilizează benzi de tip scai, aplicate la nivelul încheieturii și în zona palmei, în proximitatea articulațiilor metacarpofalangiene, ceea ce conferă stabilitate suplimentară în timpul exercițiilor de reabilitare și facilitează aplicarea și îndepărtarea dispozitivului.

Designul adoptat prezintă și avantajul suplimentar de a menține permeabilitatea aerului și de a conserva funcția senzorială a mâinii în raport cu mediul extern.

5.3.3. Proiectarea sistemului pneumatic

Pentru a răspunde cerințelor de proiectare printr-o configurație pneumatică simplă și ușor de controlat, a fost elaborată schema circuitului pneumatic prezentată în Figura 5.6.

Sistemul integrează o micropompă de aer capabilă să furnizeze atât presiune pozitivă, cât și negativă, având un debit maxim de 5 L/min și un interval de presiune la ieșire cuprins între -90 și 150 kPa.

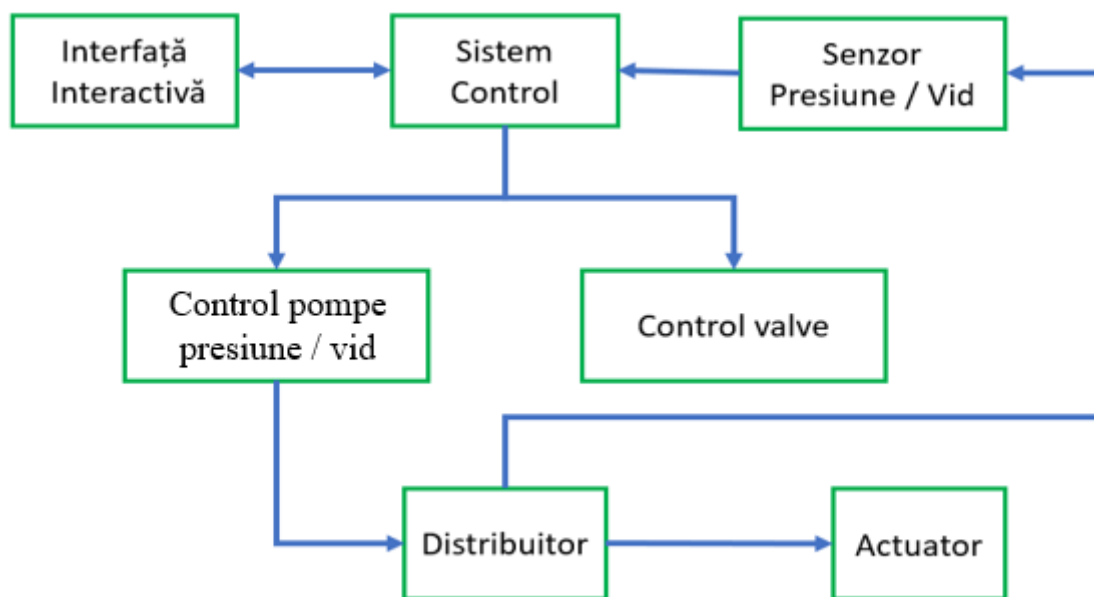


Figura 5.5. Schemă control pneumatic al sistemului MANOREHAB.

Pentru asigurarea protecției mecanice, a fost implementat un senzor de presiune PQ7834 (IFM), care previne depășirea valorilor maxime admise de actuator.

Distribuitorul pneumatic dispune de cinci ieșiri, ceea ce permite alimentarea și controlul simultan al mai multor actuatori, precum și reglarea independentă a debitului și a presiunii.

Întregul tablou pneumatic a fost conceput exclusiv din componente miniaturizate sau de dimensiuni reduse, fapt ce conferă ansamblului un design compact și portabilitate sporită.

Dimensiunile sistemului sunt $L = 500 \text{ mm}$, $l = 300 \text{ mm}$, $h = 110 \text{ mm}$, cu o greutate totală de aproximativ 5 kg.

Aceste caracteristici asigură o portabilitate ridicată permițând efectuarea antrenamentelor de recuperare cu condiția existenței unei surse de alimentare de 220V AC.

De asemenea, a fost dezvoltată o metodă de control (Figurile 5.5 și 5.6) care facilitează interacțiunea om-mașină printr-o interfață interactivă, integrând un controler de viteză și un senzor de presiune.

Acest sistem permite desfășurarea atât a antrenamentului asistat, cât și a antrenamentului cu impedență, oferind posibilitatea configurării individualizate a parametrilor în funcție de cerințele specifice procesului de reabilitare.

Presurizarea actuatorului :

- Pompa 1 generează aer comprimat.
- Electrovalva YV1 este acționată (comandă ON), iar aerul comprimat este direcționat prin poziția deschisă a valvei YV1 spre camera actuatorului.

- Aerul intră și umflă burdufurile pneumatice, generând o mișcare de flexie a degetelor.
- Senzorul de presiune monitorizează nivelul presiunii interne.

Depresurizarea actuatorului :

- Pompa 2 acționează pentru a genera vacuum.
- Electrovalva YV2 este activata (ON), iar aerul este evacuat din cilindru prin valva YV2 către pompa de vacuum.
- Această extracție de aer duce la scăderea presiunii și realizează extensia degetelor

Supapele de sens:

- Aceste elemente sunt integrate pe liniile de presiune și vacuum pentru a preveni refluxul aerului și pentru a asigura menținerea valorii prestabilite a presiunii pe durata intervalelor dintre comenzi.

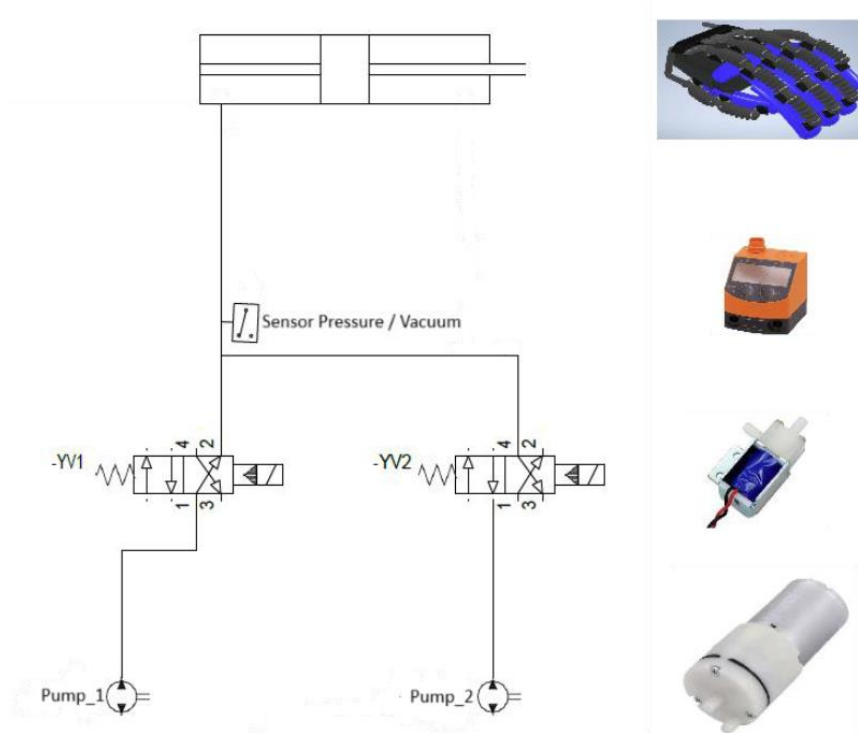


Figura 5.6. Arhitectura pneumatică.

5.4. Descriere arhitectura hardware (electrică)

Proiectarea unui sistem automatizat capabil să controleze un actuator pe baza comenzilor transmise printr-o interfață intuitivă și inteligentă constituie o provocare actuală în domeniul ingineriei electrice și al tehnologiilor de reabilitare asistată.

În acest cadru, sistemul analizat integrează un microcontroler ESP32 și dispozitivul de realitate augmentată HoloLens 2, cu scopul de a facilita o interacțiune avansată de tip om-mașină.

Prin intermediul comunicației wireless, utilizatorul poate controla în mod direct și sigur un ansamblu de echipamente electromecanice, eliminând necesitatea contactului fizic sau a comenzilor tradiționale prin butoane.

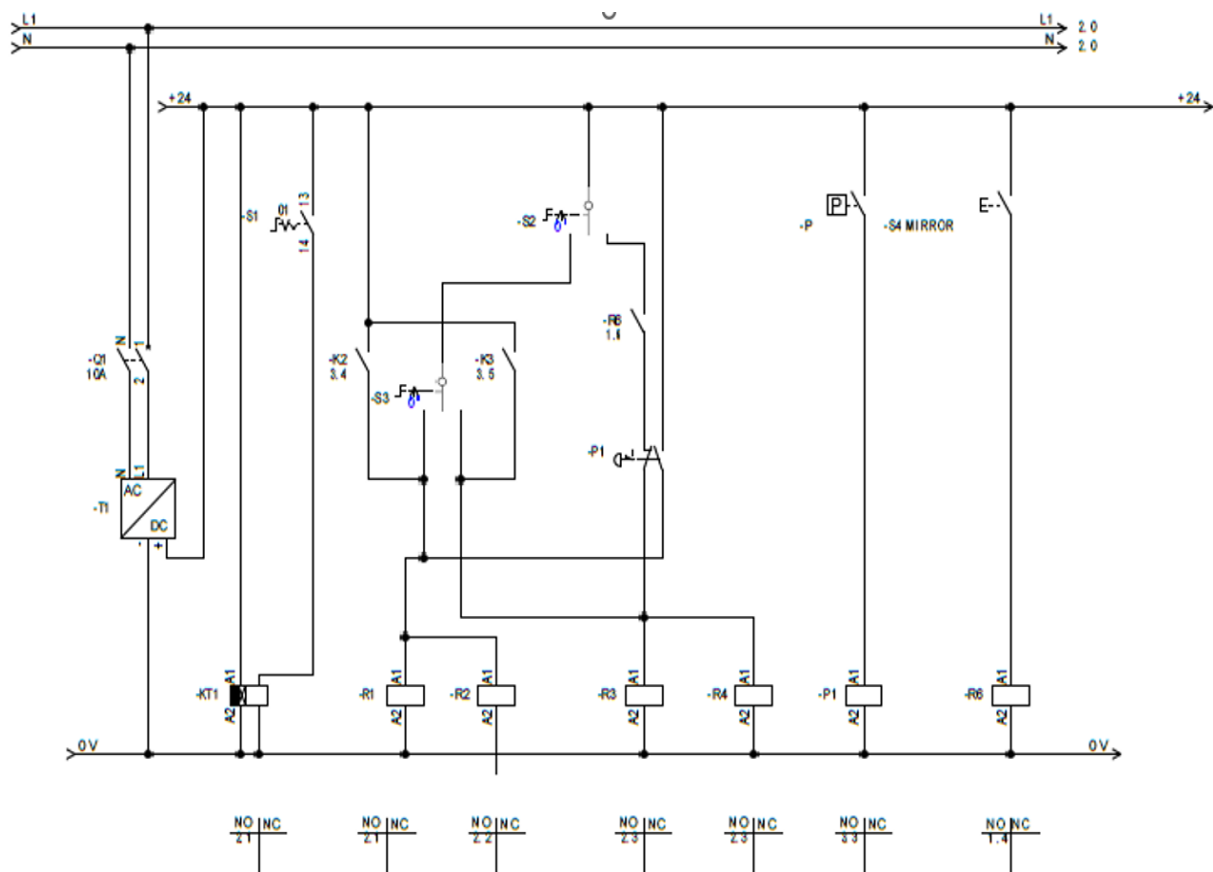


Figura 5.18. Schemă electrică – comandă releu.

Sistemul este construit dintr-o serie de unități hardware interconectate, nucleul său fiind reprezentat de microcontrolerul ESP32, dotat cu facilități moderne de comunicație wireless și flexibilitate ridicată în rularea algoritmilor de control în timp real.

Dispozitivul HoloLens 2, dotat cu senzori de mișcare, funcționalități de recunoaștere gestuală și suport extins pentru aplicații de realitate augmentată, transmite comenzi către microcontrolerul ESP32 pe baza interacțiunii utilizatorului cu interfața virtuală.

Astfel, sistemul realizează o legătură directă între gesturile naturale ale pacientului sau terapeutului și funcționarea echipamentelor electromecanice, contribuind la crearea unui mediu de reabilitare mai interactiv, sigur și personalizat.

Comenzile transmise către sistem pot avea diferite niveluri de complexitate: binar (pornire/oprire), incremental (reglarea vitezei sau a poziției) sau logic secvențial (executarea unui program automatizat în mai multe etape).

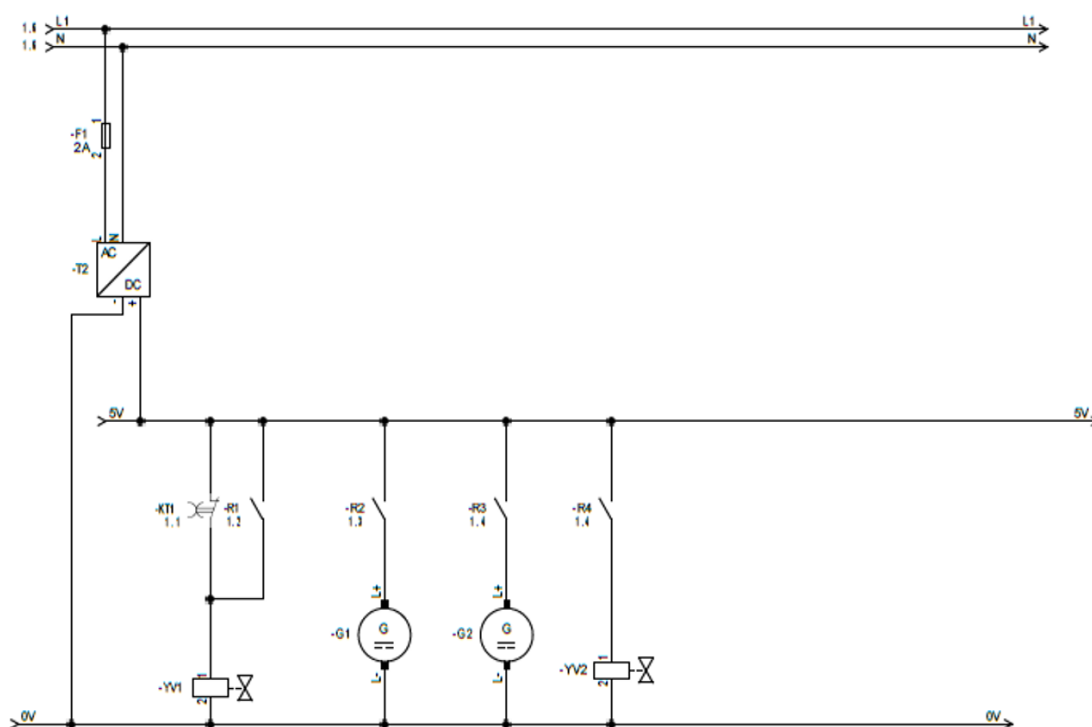


Figura 5.19. Schemă electrică – comandă motoare și electrovalve.

Funcționarea fiecărui releu este comandată de un semnal digital generat de microcontrolerul ESP32 și transmis prin pinurile sale de ieșire.

Conform normelor de protecție electrică, alimentarea releelor este separată de cea a microcontrolerului, ceea ce garantează integritatea circuitului logic și siguranța utilizatorului.

Algoritmul de control este integrat direct în codul microcontrolerului ESP32, dezvoltat în C++ (utilizând mediul Arduino sau ESP-IDF), și include mecanisme de decizie bazate pe automate cu stări finite, secvențe de temporizare, condiții logice complexe și protocoale de siguranță.

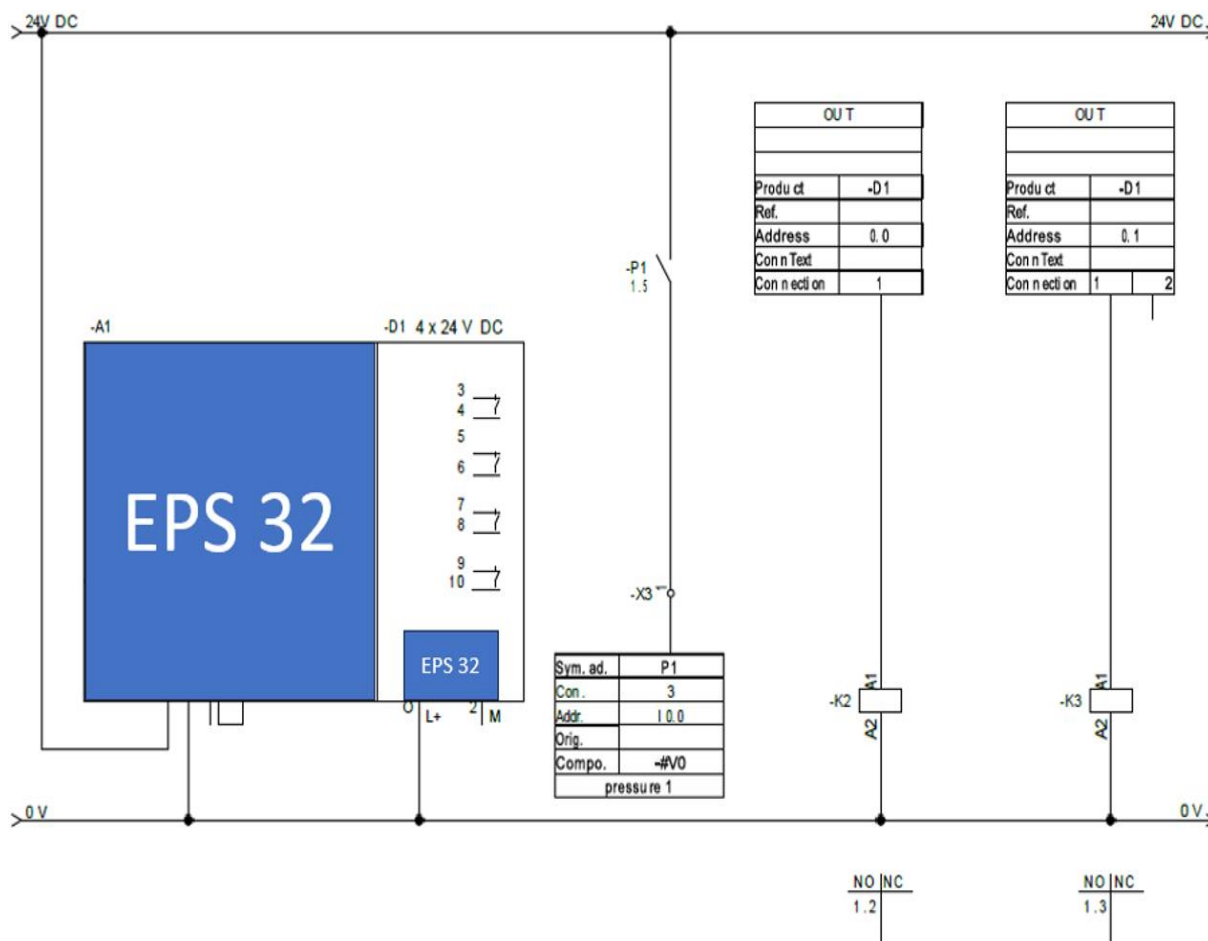


Figura 5.20. Schemă electrică – conectare microcontroler EPS 32 cu interfața I/O.

O astfel de structură oferă un nivel ridicat de flexibilitate în configurarea funcționării sistemului, permițând definirea unor scenarii adaptate contextului, precum oprirea automată în cazul pierderii semnalului sau în situații de activare accidentală.

5.5. Realizarea schemei electrice în SEE Electrical

Pentru realizarea documentației tehnice și pentru testarea conformității sistemului electric s-a recurs la aplicația SEE Electrical, furnizată de compania IGE+XAO. Acest program profesional este destinat proiectării instalațiilor electrice și oferă funcționalități dedicate pentru proiecte de automatizare industrială, tablouri de comandă, cablaje, sisteme de protecție și semnalizare.

Alegerea platformei SEE Electrical a fost motivată de necesitatea elaborării unei scheme electrice clare și corect structurate, realizată în conformitate cu standardele internaționale IEC 81346 și IEC 60617.

5.5. Arhitectura Software

Realitatea mixtă (MR) reprezintă un ansamblu de tehnologii care îmbină elemente specifice realității virtuale (VR) și realității augmentate (AR), cu scopul de a genera o experiență interactivă și imersivă, în care informațiile digitale sunt integrate și suprapuse mediului real [3].

Această tehnologie permite utilizatorilor să interacționeze cu obiecte și personaje virtuale care par integrate în mediul real și care răspund în timp real la acțiunile acestora (vezi Fig. 5.21).

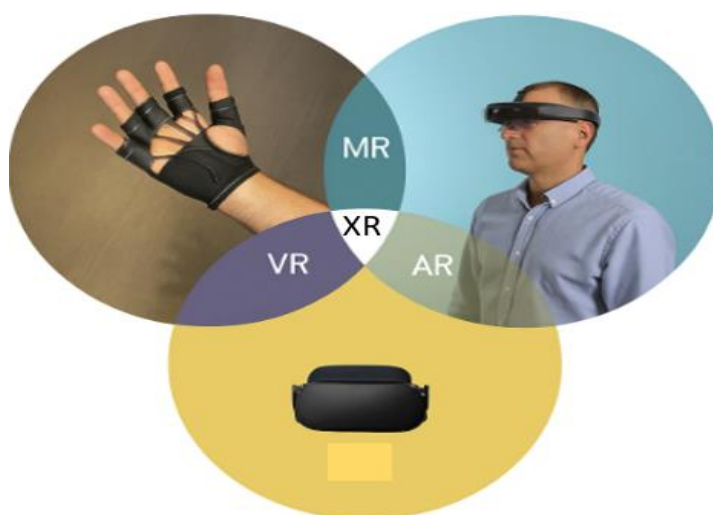


Figura 5.21. Ilustrare interacțiunea între grupurile tehnologice.

Realitatea mixtă (MR) se distinge de realitatea virtuală (VR) prin faptul că aceasta din urmă plasează utilizatorul într-un mediu digital complet generat artificial, accesibil printr-o cască specializată, în timp ce MR combină elemente reale cu cele virtuale într-o singură experiență [4].

Spre deosebire de aceasta, MR combină elemente virtuale cu mediul real, suprapunându-le și integrându-le într-un mod care permite interacțiunea simultană atât cu obiectele fizice, cât și cu cele generate digital [5].

Această capacitate este posibilă datorită utilizării unor tehnologii avansate, precum senzori de mișcare, camere performante și afișaje de înaltă rezoluție, care permit sistemului să perceapă și să interpreteze mediul real al utilizatorului, adăugând în același timp elemente

virtuale [3].

Implementarea conceptului de Digital Twin permite personalizarea experienței în funcție de particularitățile fiecărui utilizator, prin dezvoltarea unui cadru interactiv care conectează mână pneumatică fizică cu modelul său virtual, element care susține accelerarea și optimizarea procesului de învățare [6].

În același timp, realitatea mixtă a înregistrat în ultimii ani progrese considerabile și continuă să se dezvolte, evidențiind un potențial semnificativ de aplicare într-o varietate de domenii [7].

5.5.1. Descrierea fluxului de lucru în arhitectura software

Aplicația integrează sistemul MANOREHAB și conceptul de Digital Twin (DT), așa cum este prezentat în Figura 24, care ilustrează principalele componente ale arhitecturii: (1) Digital Twin și (2) dezvoltarea de aplicații DT și MR în cadrul ecosistemului Unity [6]. Avantajele acestei abordări se regăsesc la fiecare nivel.

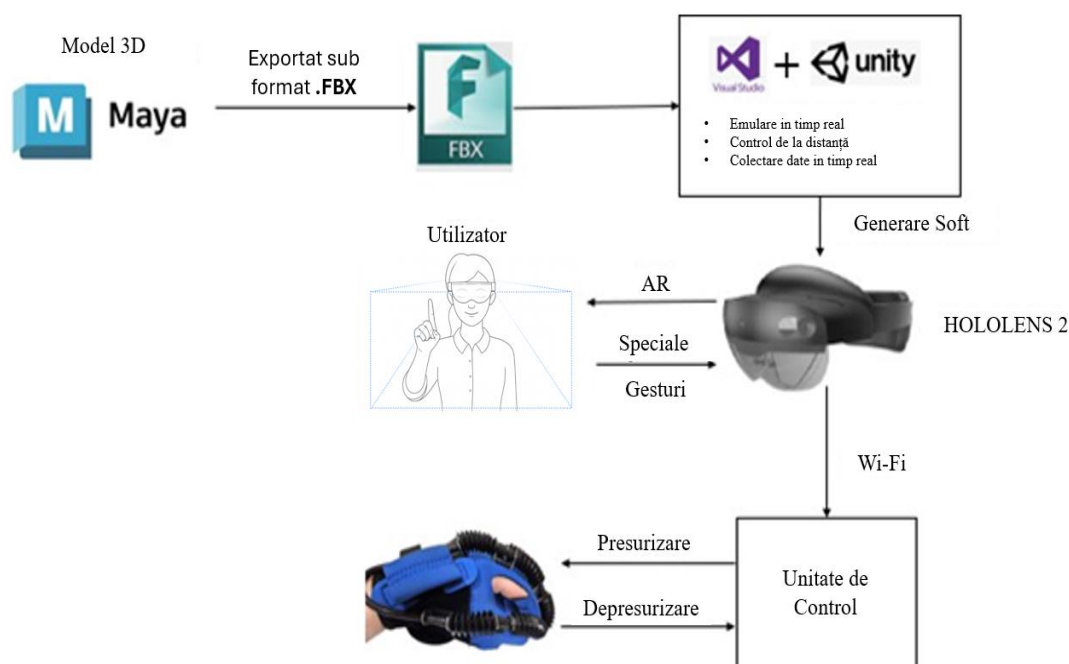


Figura 5.22. Conexiune sistem MANOREHAB și Digital Twin.

La nivelul fizic, este creată o hologramă a mânușii, reprezentată la scară 1:1 față de dispozitivul real, prin utilizarea unor instrumente de modelare 3D, precum **Autodesk Inventor**, pentru generarea modelului Digital Twin [16].

În etapa următoare, modelul DT este exportat sub format **.FBX** și integrat într-un motor de joc multiplatformă, cum este **Unity** [17].

Comportamentul fizic al mânușii este reprodus în Digital Twin, iar funcționalități suplimentare sunt implementate prin intermediul scripturilor asociate.

Ulterior, aplicația este implementată pe un dispozitiv de tip head-mounted display (HoloLens 2), ceea ce permite utilizatorului să vizualizeze și să interacționeze direct cu sistemul într-un mediu de realitate mixtă [18].

5.5.3. Microsoft HoloLens 2

Căștile special concepute pentru experiențe de realitate mixtă sau augmentată sunt indispensabile. Acestea integrează tangibilul cu digitalul, permițând utilizatorilor să experimenteze și să interacționeze cu ambele domenii într-un mediu coerent. Acestea permit indivizilor să interacționeze simultan atât cu entități tangibile, cât și cu cele virtuale.

Exemple importante de căști:

- **Microsoft HoloLens:** HoloLens de la Microsoft este un aparat portabil care suprapune holograme generate de computer peste vizualizarea utilizatorului asupra mediului fizic. Generează o hartă tridimensională a vecinătății și urmărește utilizatorul utilizând camere, senzori și o cameră de adâncime. Dispune de difuzoare integrate și utilizează tehnologie audio spațială.
- **Magic Leap One** (24 a) facilitează calculul 3D imersiv prin integrarea componentelor digitale și fizice. Se utilizează camere, proiectoare și senzori. Aparatul de protecție urmărește capul, ochii și gesturile pentru a facilita interacțiunile interactive. În plus, posedă capacități audio spațiale.
- **Meta 2:** Meta 2 (24 b) integrează experiențele digitale și fizice ale utilizatorului. Dispune de un ecran expansiv, un ecran de înaltă rezoluție și utilizează camere și senzori pentru a urmări fiecare mișcare a utilizatorului. Meta 2 oferă un sistem audio excepțional și facilitează interacțiunea autentică cu obiecte virtuale.



Figura 5.23. Modele caști realitate augmentată a) Magic Leap One și b) Meta 2.

5.5.4. Definirea gradelor de libertate la HoloLens 2

Gradele de libertate (Degrees of Freedom – DOF) reprezintă numărul de parametri independenți necesari pentru a descrie în mod complet starea, configurația sau mișcarea unui sistem mecanic.

Un corp aflat în spațiu liber poate efectua deplasări independente pe cele trei axe ortogonale longitudinală, verticală și transversală corespunzătoare translațiilor înainte–înapoi, sus–jos și stânga–dreapta.

Acestea constituie primele trei grade de libertate fundamentale asociate mișcării de translație.

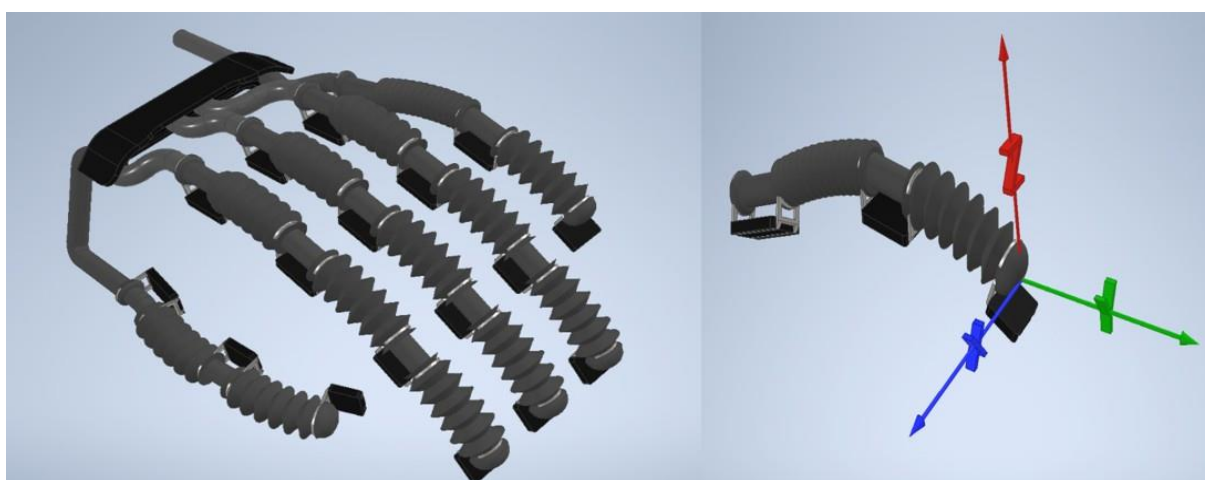


Figura 5.26. Ilustrare grade de libertate.

Pe lângă translațiile pe cele trei axe, un obiect poate realiza rotații independente în jurul acestora, definite prin rulu (încălinare laterală), tangaj (încălinare antero-posterioară) și girație (rotație în plan orizontal) [28].

Împreună, cele trei translații și cele trei rotații formează cele șase grade de libertate (6DOF) necesare pentru descrierea completă a mișcării unui corp rigid, așa cum este ilustrat în Figura 28. Prin integrarea principiului 6DOF, HoloLens 2 este capabil să monitorizeze cu acuratețe mișcările corpului uman.

Această capacitate are un rol esențial în arii variate, de la proiectarea inginerescă și robotică, până la reabilitarea neurologică, unde analiza și controlul gradelor de libertate sunt indispensabile pentru păstrarea stabilității, îmbunătățirea performanței și atingerea unui nivel ridicat de precizie.

În domeniul roboticii, gradele de libertate influențează direct complexitatea algoritmilor de control, precum și diversitatea sarcinilor pe care un robot le poate executa. Obținerea unui

nivel înalt de precizie și control nu este posibilă fără un număr adecvat de grade de libertate.

În concluzie, gradele de libertate reprezintă un element fundamental în aplicațiile de realitate mixtă (MR), realitate augmentată (AR) și robotică, inclusiv în cadrul sistemului mecatronic MANOREHAB.

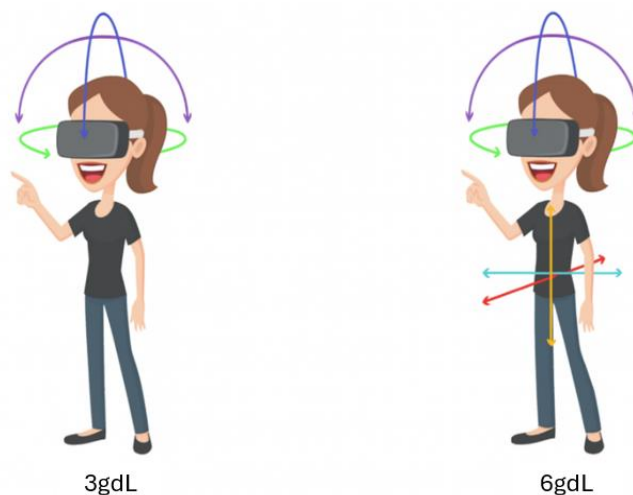


Figura 5.27. Ilustrare grade de libertate cand HoloLens este montat.

Acestea influențează direct amplitudinea mișcărilor posibile, realismul interacțiunilor, nivelul de precizie, adaptabilitatea la diverse scenarii și capacitatea de toleranță la erori a unui dispozitiv sau sistem.

Prin extinderea gradelor de libertate, se pot crea experiențe mai imersive, se facilitează execuția unor activități complexe și se optimizează funcționalitatea tehnologiilor emergente, oferind un nivel superior de flexibilitate și control în procesele de reabilitare și în aplicațiile robotice.

5.5.5. Control HoloLens 2

Pe măsură ce realitatea participantului se aliniază din ce în ce mai mult cu o experiență de realitate mixtă prin încorporarea hologramelor, elementul de interacțiune devine crucial [28]-

Conceptele menționate anterior delimitează principalele categorii de intrări pentru dispozitivul HoloLens 2. Pe baza informațiilor referitoare la orientarea și poziția capului, sistemul calculează vectorul privirii, reprezentat sub forma unui fascicul proiectat înainte, pornind din zona ochilor [29].

Această funcționalitate este utilizată frecvent în aplicații pentru recunoașterea

hologramelor, facilitarea navigării și verificarea atenției utilizatorului asupra obiectelor din mediul virtual sau din cel real. În astfel de contexte, un cursor vizual indică poziția vectorului de privire, sporind gradul de interacțiune.

Integrarea urmăririi privirii în HoloLens 2 (vezi Fig. 5.27) oferă utilizatorului o modalitate intuitivă și naturală de interacțiune cu conținutul holografic [29].

Totuși, experiența de realitate mixtă nu se bazează exclusiv pe componenta vizuală, ci este completată de recunoașterea gesturilor și a comenzilor vocale, ceea ce contribuie la o interacțiune complexă și imersivă.

Mișcări ale mâinilor detectate de HoloLens2

În timp ce privirea dictează în primul rând punctul focal într-o aplicație holografică, gesturile amplifică cadrul de interacțiune prin încorporarea aspectului acțiunii. Dispozitivul HoloLens 2 identifică următoarele gesturi ca intrări principale: o atingere cu degetul, un gest de pornire (vezi Fig. 5.26) și o mișcare a razei mâinii (vezi Fig. 5.27).

Figura 5.28 demonstrează că utilizatorul execută gestul de atingere cu degetul aducând vârful degetului arătător în contact cu vârful degetului mare, menținând în același timp mâna într-o orientare verticală.

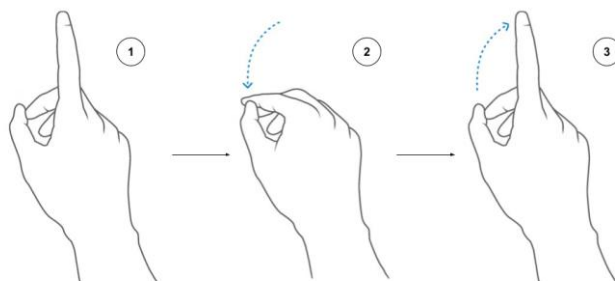


Figura 5.28. Gesturi utilizate pentru control in HoloLens 2.

Această acțiune își propune să efectueze o selecție similară cu cea executată prin apăsarea unui buton pe un mouse convențional în cadrul unui program normal de calculator.

Utilizatorul poate alege holograme și le poate ajusta poziția în zona virtuală utilizând această mișcare în timp ce își poziționează degetele, așa cum este ilustrat în pasul 2 din Figura 5.29.

Dispozitivul HoloLens 2 dispune de un gest particular, cunoscut sub numele de gestul de pornire, care este utilizat pentru a accesa și naviga prin meniul de pornire. Această acțiune poate fi executată atunci când utilizatorul își întinde mâna cu palma orientată spre interior,

moment în care un buton va apărea pe încheietura mâinii. Apăsarea acestui buton va deschide meniul, așa cum este ilustrat în partea stângă a Figurii 5.29.

Meniul de operare poate fi accesat prin executarea unei mișcări de atingere cu aerul, în timp ce privirea utilizatorului este concentrată pe butonul de pe încheietura mâinii, așa cum este ilustrat în partea dreaptă a Figurii 5.29.



Figura 5.29. Accesare meniu HoloLens2.

HoloLens 2 utilizează gestul razei mâinii drept gest standard principal [30], permițând selectarea și manipularea hologramelor ori a meniurilor aflate în câmpul vizual extins al utilizatorului. Pentru a executa această operațiune, utilizatorul trebuie să întindă mâna cu palma orientată spre exterior, rezultând o rază cu un cursor care iese din palma utilizatorului [31].

Mișcarea de contact cu aerul, ilustrată în partea dreaptă a Figurii 5.29, este utilizată pentru a apuca obiecte aflate la distanță.

Utilizatorii pot executa sarcini precum selectarea, apucarea, redimensionarea sau modificarea conținutului holografic mișcându-și mâinile și aliniind raza cu un obiect virtual. Gesturile mâinii au loc într-un cadru gestual definit.

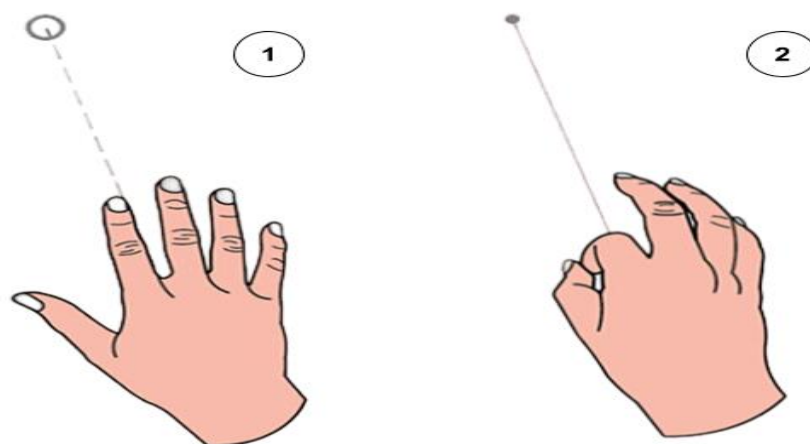


Figura 5.30. Gestul raza mâinii - reinterpretare din [32].

Prin intermediul camerelor de detecție a gesturilor, HoloLens 2 configurează o regiune activă în fața sa, în interiorul căreia mișcările executate de utilizator pot fi recunoscute. Cadrul este stabilit aproximativ de la nas până la talie, în funcție de înălțimea participantului [32], așa cum se arată în Figura 5.30.

Dispozitivul HoloLens utilizează datele provenite de la senzori și camere pentru a defini un cadru gestual și pentru a asista utilizatorii în efectuarea corectă a interacțiunilor. Prin intermediul camerelor integrate, HoloLens 2 creează în fața dispozitivului un spațiu virtual activ, destinat detectării și interpretării gesturilor utilizatorului.

Cadrul este stabilit aproximativ de la nas până la talie, în funcție de înălțimea participantului [26], așa cum se arată în Figura 5.30.

HoloLens își propune să asiste utilizatorii în executarea corectă a gesturilor și în parametrizarea senzorilor și camerelor dispozitivului, oferind un cadru gestual.

5.5.6. Maparea spațiului

Capacitățile de cartografiere spațială ale HoloLens 2 sunt esențiale pentru ca dispozitivul să observe și să interacționeze cu mediul său. Cartografierea spațială oferă o reprezentare cuprinzătoare a suprafețelor reale din vecinătatea HoloLens, permițând dezvoltatorilor să creeze o experiență de realitate mixtă convingătoare [33].

Determinarea adâncimii în cazul HoloLens 2 este posibilă printr-un sistem combinat de senzori time-of-flight și camere de detecție, care furnizează date precise privind distanța dintre dispozitiv și mediul său fizic.

Pe baza luminii infraroșii emise și a duratei de întoarcere

a acesteia, sistemul calculează cu precizie distanța până la suprafețele fizice.

Mediul utilizatorului este scanat în mod continuu pe parcursul deplasării, ceea ce permite generarea unei reprezentări tridimensionale detaliate a împrejurimilor [34].

Ulterior, observatorul suprafețelor spațiale analizează mediul pentru a identifica eventualele modificări și actualizează modelul 3D. Un element fundamental în procesul de detectare a coliziunilor îl constituie cartografierea spațială.

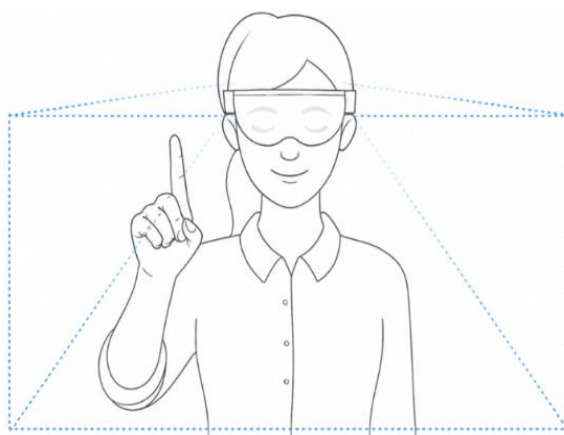


Figura 5.31. Cadrul gestual.

Odată ce mesh-ul camerei a fost generat, HoloLens este capabil să recunoască interacțiunile și coliziunile dintre obiectele virtuale și mediul fizic, reflectând principiile de bază ale realității mixte (MR) [35].

Un avantaj suplimentar al cartografierii spațiale este caracterul său persistent: chiar și după oprirea dispozitivului, mediul anterior mapat rămâne salvat, ceea ce contribuie la îmbunătățirea și continuitatea experienței utilizatorului.

5.6. Integrarea și interacțiunea hologramei sistemului MANOREHAB

Folosirea modelului Digital Twin pentru a transpune sistemul MANOREHAB în platforma Unity oferă posibilitatea simulării comportamentului său într-un mediu de realitate mixtă, caracterizat prin siguranță crescută și interactivitate sporită. Acest lucru poate fi utilizat pentru a îmbunătăți înțelegerea funcționalității sistemului și pentru a supraveghea datele sale interne.

Contribuția principală la dezvoltarea aplicației AR a provenit din kiturile de dezvoltare software (SDK) limitate care stau la baza Unity și sunt esențiale pentru executarea proceselor menționate anterior. Pentru a iniția dezvoltarea de aplicații folosind motorul de joc Unity, este esențial să se instaleze Unity Hub.

Programul independent reprezintă elementul central de coordonare pentru activitățile și proiectele derulate în cadrul Unity.



Figura 5.32. Cartografiere spațială realizată de dispozitivul HoloLens 2.

După instalare, un nou proiect poate fi inițiat selectând butonul Proiect nou, așa cum este ilustrat în Figura 5.32.

Inițial, este necesar să se verifice acuratețea versiunii Editor (1). Pasul următor implică selectarea tipului de aplicație (2), iar pentru o aplicație AR, trebuie aleasă opțiunea 3D.

Ulterior, numele și locația proiectului pot fi selectate din Setările proiectului (3) [36], după care proiectul poate fi inițiat făcând clic pe butonul Creare proiect (4) [37].

După clic pe butonul Creare proiect, se afișează fereastra proiectului Unity prezentată în Figura 5.33 (b) Fazele ulterioare în dezvoltarea unei aplicații AR implică stabilirea proiectului și încorporarea SDK-urilor esențiale: OpenXR și MRTK.

5.7. Integrarea sistemului MANOREHAB în mediul Unity

Reprezentarea digitală a sistemului holonomic MANOREHAB a fost integrată în ecosistemul Unity prin importarea componentelor sale dintr-un model CAD în format .FBX.

Modelul CAD a fost convertit într-o colecție de poligoane și materiale denumite GameObjects în Unity. După construirea acestor GameObjects, robotul de tip DT este pregătit pentru calibrare pentru a reproduce comportamentul mânușii în lumea reală.

Mai mult, aceste GameObjects posedă mai multe atribute care pot fi modificate în timpul acestui proces, cum ar fi orientarea, poziția, materialul, animațiile sau scara; în plus, pot avea asociate scripturi C# care pot anima mânășă de tip DT. Figura 5.35 ilustrează toate componentele enumerate anterior cu mediul Unity.

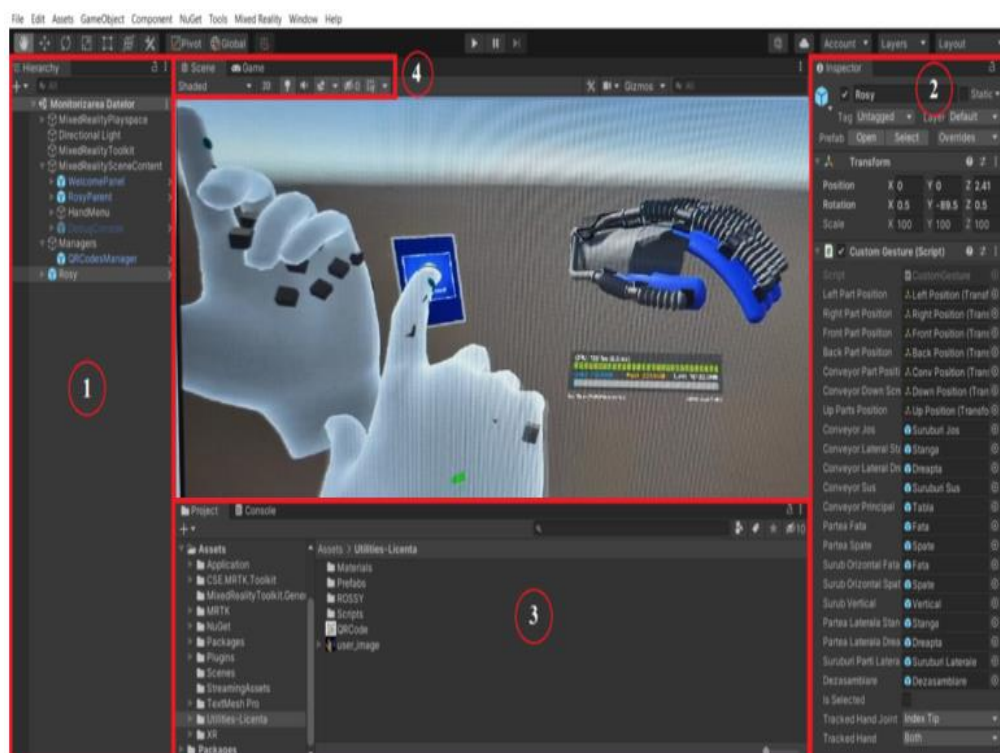


Figura 5.35. Vedere principală din Unity.

MANOREHAB are 3 moduri de operare ilustrate în diagrama prezentată în Fig. 6 prezintă funcționarea sistemului de rehabilitare. Acesta utilizează diferite metode de control pentru a ajuta la mișcarea mâinii folosind actuatori.

Sistemul încorporează trei surse principale de intrare: o casă HoloLens 2, un panou de control operat de fizioterapeut și un mecanism Mirror Therapy. Aceste intrări interacționează cu o unitate de control a sistemului hardware (HW), care ulterior transmite semnale către actuatori pentru executarea mișcării.

- **Modul AR HoloLens 2** — servește ca o interfață bazată pe realitate augmentată pentru controlul sistemului. Căștile comunică cu unitatea de control a sistemului HW printr-o interfață Wi-Fi. Acest mod permite operarea hands-free, implicând utilizând comenzi gestuale și/sau vocale pentru a controla mișcările actuatorilor (vezi Fig. 5.38.).
- **Modul manual** — În acest mod, fizioterapeutul interacționează cu sistemul prin intermediul unui panou de control. Panoul de control trimite comenzi direct către unitatea de control a sistemului HW printr-o interfață hardware. Acest mod asigură intervenția directă din partea fizioterapeutului, permițându-i să ajusteze comportamentul sistemului în funcție de nevoile utilizatorului / pacientului.
- **Mod „terapie în oglindă ”** — Permite replicarea mișcărilor membrului sănătos la membrul afectat/paretic. Panoul de control transmite semnale către unitatea de control sistemului HW, care apoi le transmite către actuatore, asigurând mișcarea sincronizată pentru membrele superioare, cu accent deosebit pe restabilirea funcționalității mâinilor.

5.8. Utilizare AR-HoloLens 2 în sistemul MANOREHAB

Integrarea căștii HoloLens 2 în cadrul sistemului MANOREHAB marchează o etapă importantă în evoluția tehnologiilor destinate reabilitării neurologice asistate. Această soluție de control inovatoare, bazată pe realitate augmentate (AR), permite pacientului sau fizioterapeutului să interacționeze direct cu sistemul mecatronic într-un mod natural, intuitiv și complet fără contact fizic.

Utilizarea HoloLens 2 nu se limitează la controlul simplu al mișcărilor dispozitivului robotic, ci se extinde către o interacțiune imersivă, care combină comanda vizuală, feedback-ul în timp real și adaptarea dinamică la progresul utilizatorului.

Procesul de operare debutează prin activarea căștii HoloLens 2 și a sistemului MANOREHAB. După montarea dispozitivului pe capul utilizatorului, acesta inițiază cartografierea mediului înconjurător utilizând senzori de profunzime, camere video și sistemul integrat de urmărire a privirii.

Paralel cu aceste procese, unitatea de comandă a ansamblului robotic, implementată cu un microcontroller ESP32, este pornită și pregătită pentru a prelua instrucțiuni prin intermediul

conexiunii Wi-Fi. Interfața dintre cele două module se realizează printr-un protocol de comunicație bidirecțional de tip WebSocket, care asigură schimbul rapid și fiabil al comenzilor și al feedback-ului de stare.

În urma conectării, HoloLens 2 activează aplicația AR, care introduce în câmpul vizual al utilizatorului o interfață grafică interactivă. Aceasta constă în suprapunerea unor butoane, meniuri, animații și elemente grafice peste mediul real, creând percepția integrării componentelor virtuale în spațiul fizic.

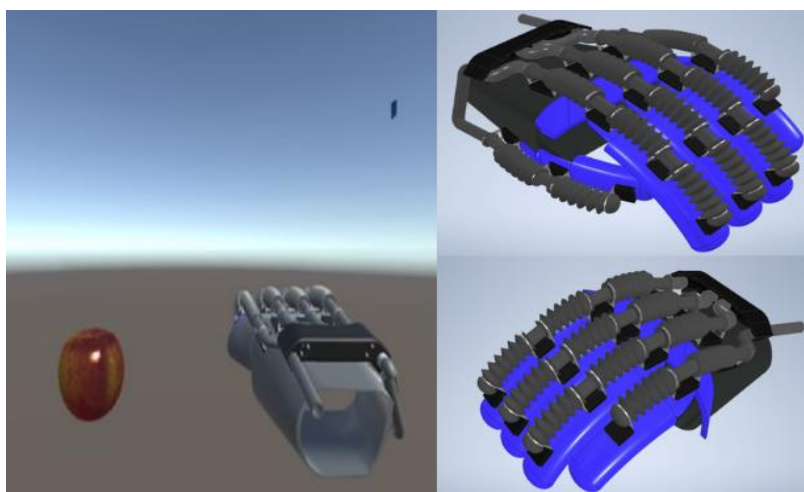


Figura 5.37. Vedere utilizzator.

Pentru ca această suprapunere să fie corect aliniată cu structurile reale ale sistemului MANOREHAB, este necesară o etapă de calibrare. Aceasta poate fi realizată fie manual, prin ajustarea coordonatelor interfeței, fie automat, utilizând markeri vizuali de tip QR plasați pe elementele sistemului mecatronic. Odată finalizată calibrarea, utilizatorul poate iniția interacțiunea cu sistemul.



Figura 5.38. Configurare interacțiune HoloLens2 și utilizator.

Utilizatorul are la dispoziție diverse modalități de control, toate naturale și accesibile: focalizarea privirii asupra unui obiect virtual, efectuarea unor gesturi cu mâna (de tip air tap, hold, swipe) ori pronunțarea unor comenzi verbale, de exemplu „start exercițiu”, „închide mâna” sau „stop”.

Aceste mecanisme de interacțiune reduc efortul cognitiv și motric necesar, aspect deosebit de valoros în cazul pacienților cu deficite motorii sau tulburări de coordonare.

Prin selectarea comenzilor disponibile în interfața AR, aplicația transmite microcontrolerului instrucțiuni precise, responsabile de activarea servoactuatorilor integrate în mănușa pneumatică. Acestea generează mișcări biomecanice programate să reproducă fidel deschiderea și închiderea mâinii umane, asigurând un control fin asupra parametrilor esențiali: forța, viteza și poziția fiecărui deget.

În funcție de protocolul terapeutic selectat, mișcările pot fi coordonate pentru întreaga mână, realizându-se astfel exerciții sincronizate și standardizate.

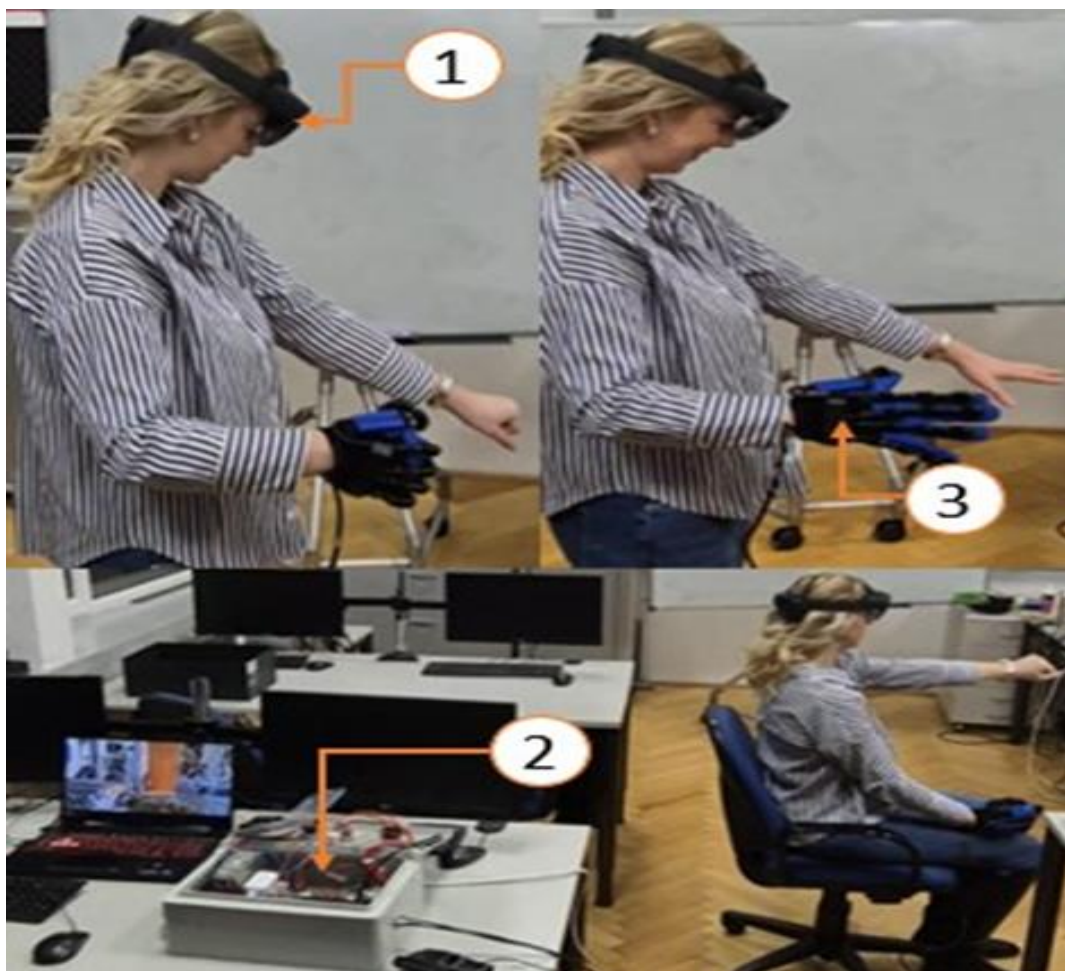


Figura 5.39. Teste laborator în timpul dezvoltării conceptului.

Totuși, aplicarea clinică a acestei abordări este condiționată de anumite limitări tehnice. Un aspect limitativ îl constituie autonomia bateriei HoloLens 2, care, la o durată de 2–3 ore, poate îngreuna desfășurarea intervențiilor terapeutice extinse.

De asemenea, funcționarea optimă presupune existența unei conexiuni Wi-Fi stabile; în medii clinice aglomerate, interferențele pot afecta performanța comunicării. Un aspect suplimentar este reprezentat de procesul de calibrare inițială, care necesită precizie pentru a asigura suprapunerea corectă a elementelor virtuale peste structurile fizice reale.

În plus, costul relativ ridicat al dispozitivului HoloLens 2 constituie un obstacol important pentru implementarea sa pe scară largă în unitățile medicale convenționale.

Această abordare permite desfășurarea unor exerciții terapeutice mai eficiente, mai motivante și mai ușor de adaptat la nevoile fiecărui pacient. Deși există încă provocări tehnologice care trebuie depășite, direcția este clară: viitorul reabilitării neuro-motorii este unul augmentat, personalizat și susținut de interfețe inteligente precum HoloLens 2 [38].

5.9. Configurarea rețelei și a serverului web

Pentru a asigura comunicarea între interfața MR (HoloLens 2) și unitatea de control (ESP32), este creată o rețea wireless dedicată. Această rețea funcționează fără conexiune la internet și este configurată special pentru a asigura un canal de comunicație rapid, stabil și cu latență minimă. ESP32 funcționează ca punct de acces WiFi (Access Point) [38] sau se poate conecta la un router local preconfigurat ca în figura 5.40.

În ambele cazuri, HoloLens 2 se conectează la aceeași rețea și trimite cereri HTTP către IP-ul local al microcontrolerului. Pe ESP32 este implementat un server web asincron, utilizând biblioteca ESPAsyncWebServer. Această bibliotecă permite gestionarea eficientă a multiplelor cereri simultane fără blocarea firului principal de execuție, aspect critic în aplicațiile în timp real, cum este reabilitarea motrică.

Serverul este inițializat pe portul 80, standard pentru comunicațiile HTTP. Aplicația Unity de pe HoloLens trimite cereri precum GET /open-hand sau GET /close-hand, care sunt mapate în ESP32 către funcții ce activează sau dezactivează ieșiri digitale conectate la releele ce controlează actuatorii mânușii. Figura 5.40 ilustrează această arhitectură de actuator mecatronic.

Pentru a facilita comunicarea dintre aplicația Unity, dezvoltată pentru casca HoloLens 2, și microcontrolerul ESP32, au fost definite patru endpoint-uri HTTP, fiecare corespunzând unei funcții specifice.

Această structură simplă, bazată pe cereri HTTP standard, permite o integrare eficientă între platforma software Unity și partea hardware controlată de ESP32, asigurând un răspuns rapid și sigur al sistemului mecatronic.

În plus, această abordare este extensibilă, permițând definirea ulterioară a unor endpoint-uri suplimentare pentru funcționalități mai avansate (ex: control proporțional, citire senzori, logare date etc.).

Timpul de execuție a mișcărilor este controlat în aplicația Unity conform unui model temporal bine definit, care asigură fluiditatea și realismul tranzițiilor. Durata dorită pentru acțiunile de deschidere și închidere a mâinii a fost setată la 2 secunde, reprezentând un Pe parcursul execuției, timpul scurs este actualizat constant în cadrul metodei Update() prin utilizarea variabilei Time.deltaTime, care măsoară intervalul de timp dintre cadre.

Rezultatele experimentale obținute în cadrul testelor de laborator au evidențiat un timp mediu de răspuns de aproximativ 100 de milisecunde între comanda trimisă din interfața HoloLens și declanșarea efectivă a acțiunii în sistemul mecatronic.

Această valoare indică o performanță ridicată și o capacitate reală de funcționare în aplicații de control al mișcării în timp real, precum cele necesare în reabilitarea neuromotorie asistată.



Figura 5.43. Demonstratie EUROINVENT 2025 și câmpul (VR) vizualizat de utilizator (ecran laptop stânga).

Capitolul 6. Realizarea testelor pe utilizatori umani

Înainte de aplicarea sistemului MANOREHAB pe pacienți post-AVC, a fost realizată o etapă de testare preliminară pe subiecți sănătoși.

Această fază a avut rolul de a valida funcționalitatea tehnică a echipamentului, de a evalua siguranța utilizării și de a identifica eventualele disconforturi sau limitări ergonomice.

Prin includerea unui lot de 30 de participanți cu vârste cuprinse între 20-60 ani (17 femei și 13 bărbați), fără antecedente de afecțiuni neurologice sau musculoscheletale, a fost posibilă analiza comparativă a mișcărilor efectuate în mod natural cu cele generate prin intermediul sistemului robotic, ceea ce contribuie la calibrarea precisă a actuatorilor și a interfeței de control. De asemenea, testarea pe beneficiari sănătoși a permis evaluarea fiabilității componentelor pneumatice și electronice, verificarea răspunsului senzorilor și optimizarea algoritmilor de control în condiții standardizate.

Această etapă a fost esențială pentru a reduce riscurile în faza clinică și pentru a adapta protocolul de utilizare la nevoile ulterioare ale pacienților.

În plus, voluntarii sănătoși au oferit feedback subiectiv privind nivelul de confort, imersiune și interacțiune cu interfața HoloLens 2, aspecte care pot influența direct complianța și eficiența intervenției de reabilitare.

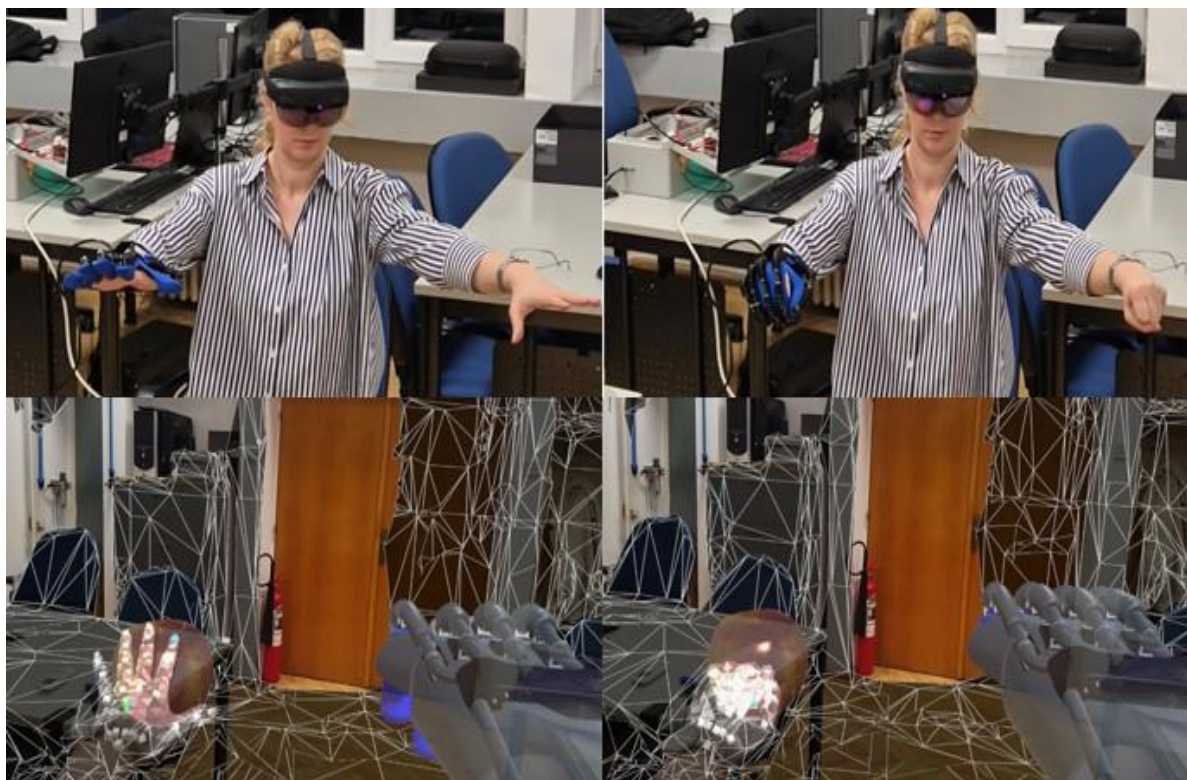


Figura 6.1. Testare laborator IEEIA a Universității Tehnice „Gheorghe Asachi” din Iași.

6.1. Obiectivele testării:

- verificarea performanței actuatorilor pneumatici și a stabilității sistemului de control;
- evaluarea gradului de confort al mânușii robotice moi în timpul utilizării;
- analiza interacțiunii utilizator–interfață prin HoloLens 2 și identificarea eventualelor limitări;
- monitorizarea apariției posibilelor efecte adverse (oboseală oculară, disconfort musculoscheletal, amețeli).

6.1.1. Protocol experimental

Fiecare subiect a parcurs o sesiune de testare cu durata de aproximativ 15–20 de minute, structurată în trei etape:

- Familiarizare** – acomodarea cu mânușa robotică și cu interfața HoloLens 2.
- Exerciții motorii** – execuția mișcărilor de flexie–extensie și abducție–adducție ale degetelor, asistate pneumatic.
- Feedback și evaluare** – completarea unor chestionare standardizate privind confortul și utilizabilitatea.

Se observă că sistemul este foarte ușor de utilizat și se adaptează rapid la diferite categorii de utilizatori, indiferent de vârstă sau dimensiuni antropometrice. Această caracteristică confirmă versatilitatea și accesibilitatea sa, facilitând integrarea în contexte diverse de demonstrare și aplicare practică.



Figura 6.2. Utilizator minor la EUROINVENT 2025.

6.2. Instrumente de evaluare utilizate

- **Scala Analog Vizuală (*Visuale Analogue Scale (VAS)*)**
- **Chestionarul Scala de utilizabilitate (*System Usability Scale (SUS)*)**
- **Chestionar experiența utilizatorului (*User Experience Questionnaire (UEQ)*)**

Monitorizare: subiecții au fost supravegheați permanent pe parcursul testării, iar datele privind eventualele reacții adverse (disconfort, oboseală oculară, instabilitate) au fost documentate.

Scopul acestei etape a fost obținerea de date preliminare privind siguranța, ergonomia și utilizabilitatea sistemului în condiții controlate, înainte de extinderea aplicațiilor către pacienți post-AVC.

6.3. Rezultatele obținute pe utilizatori umani

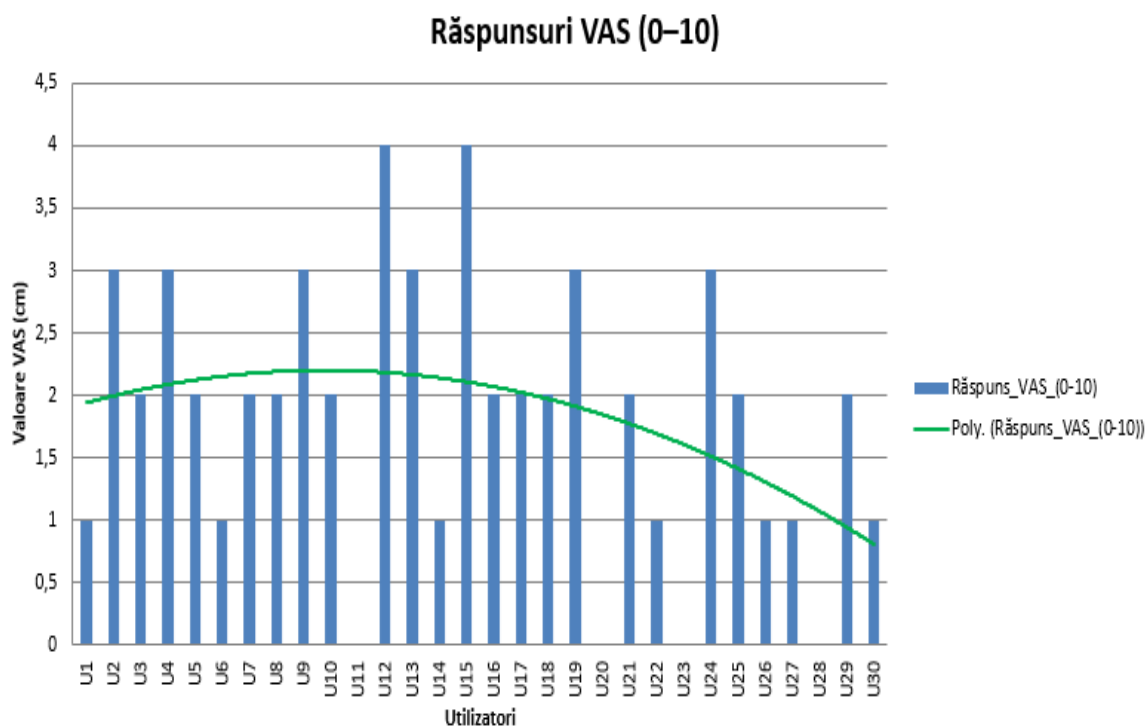


Figura 6.3. Grafic rezultate Scala Analog Vizuală (VAS).

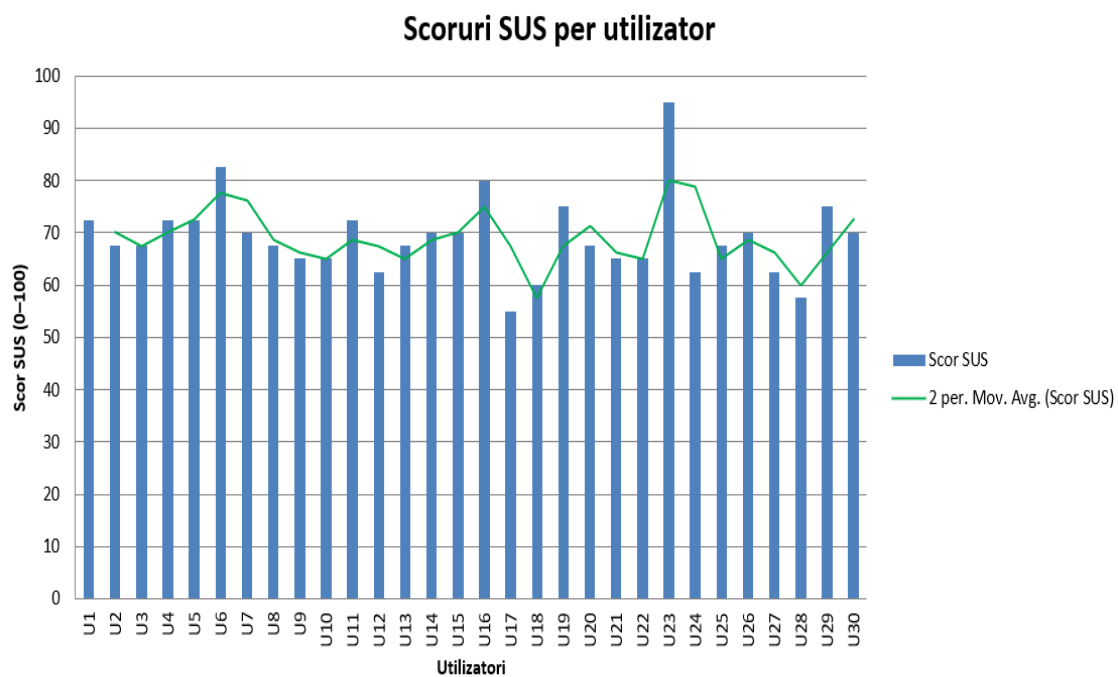


Figura 6.4. Grafic rezultate chestionar Scala de utilizabilitate (SUS).

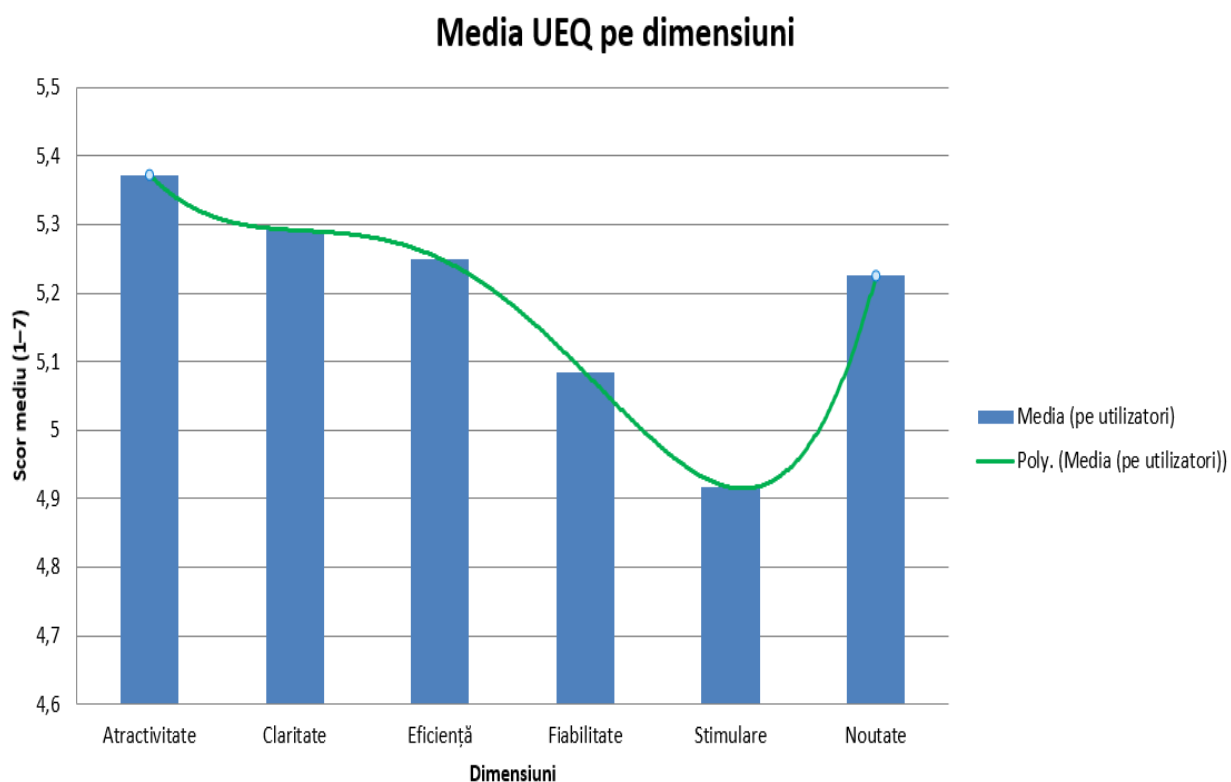


Figura 6.5. Grafic rezultate scale pentru evaluarea experienței utilizatorului (UEQ).

6.4. Interpretarea rezultatelor testării sistemului MANOREHAB

Testarea sistemului **MANOREHAB** pe un lot de 30 de utilizatori sănătoși a avut ca obiectiv principal evaluarea experienței de utilizare, a gradului de confort și a percepției generale asupra funcționalității și atractivității sistemului. Pentru aceasta, au fost aplicate trei instrumente recunoscute internațional: scala **VAS (Visual Analogue Scale, 0–10)**, chestionarul **SUS (System Usability Scale, 0–100)** și **UEQ (User Experience Questionnaire, 1–7)**.

Analiza răspunsurilor VAS a arătat valori reduse (media ~2 cm), ceea ce sugerează un nivel scăzut de disconfort și o bună toleranță la utilizarea sistemului. Această constatare susține ideea că MANOREHAB poate fi utilizat în siguranță și fără dificultăți majore, aspect esențial pentru o eventuală aplicare în contexte clinice.

Rezultatele obținute prin chestionarul SUS au indicat o **utilizabilitate bună**, cu o medie generală de aproximativ 70 de puncte, peste pragul internațional de 68 considerat reper pentru sisteme eficiente. Majoritatea utilizatorilor au perceput interacțiunea cu sistemul ca fiind intuitivă și bine structurată, ceea ce demonstrează că designul și logica de funcționare sunt adecvate și accesibile chiar și fără o pregătire tehnică prealabilă.

În ceea ce privește experiența globală a utilizatorului, măsurată prin UEQ, toate dimensiunile au obținut scoruri medii peste 5, ceea ce reflectă o percepție pozitivă generală. Cele mai ridicate valori au fost înregistrate la *Atractivitate* și *Claritate*, indicând faptul că sistemul este perceput ca fiind plăcut vizual și ușor de înțeles.

Dimensiunile *Eficiență* și *Noutate* au confirmat caracterul practic și inovativ al sistemului, iar *Fiabilitatea* a arătat că utilizatorii au perceput o bună coerență și consistență în funcționare.

Dimensiunea *Stimulare* a obținut cel mai scăzut scor relativ, dar s-a menținut în zona pozitivă; această valoare mai redusă poate fi explicată prin testarea pe persoane sănătoase, pentru care exercițiile nu reprezintă o provocare funcțională reală. Se anticipează că, în cazul pacienților cu deficite motorii, această dimensiune va înregistra valori superioare, având în vedere relevanța terapeutică directă a exercițiilor.

În ansamblu, datele obținute confirmă că sistemul MANOREHAB este:

- **sigur și bine tolerat** (rezultatele VAS),
- **ușor de utilizat și eficient** (scorurile SUS),
- **atractiv, inovativ și cu potențial clinic semnificativ** (scorurile UEQ).

Capitolul 7. Contribuții originale și perspective viitoare

Progresele recente în domeniul reabilitării neurologice se îndreaptă tot mai mult spre integrarea tehnologiilor avansate robotică, realitate augmentată și inteligență artificială pentru a oferi pacienților cu deficiențe motorii o recuperare funcțională eficientă și personalizată.

În acest context, sistemul MANOREHAB se distinge printr-o serie de contribuții originale care îl diferențiază de alte platforme existente, dar și în raport cu potențialul de implementare în practica clinică.

Această secțiune își propune să evidențieze principalele inovații aduse de MANOREHAB, cu accent pe integrarea dintre interacțiunea om-mașină și potențialul terapeutic derivat din aceasta.



Figura 7.2. Demonstrarea sistemului MANOREHAB cu integrarea HoloLens 2 în cadrul evenimentului EuroInvent 2025.

Contribuțiile prezentate în cadrul acestei teze demonstrează o abordare complexă și integrată a problematicei recuperării neuromotorii a mâinii. Studiul critic asupra sistemelor existente a oferit o bază solidă pentru contextualizarea principiilor de neuroreabilitare și pentru identificarea celor mai adecvate soluții mecatronice și de acționare, în funcție de particularitățile clinice și tehnice. Modelarea matematică a acțiunii de prehensiune și calculul forțelor la nivelul mâinii au constituit fundamentul teoretic necesar pentru dimensionarea și proiectarea unor

dispozitive eficiente și sigure.

Pe această bază conceptuală, dezvoltarea prototipului MANOREHAB – incluzând proiectarea mânușii pneumatice, adaptarea actuatorilor, arhitectura pneumatică și sistemul de control, integrarea cu HoloLens 2 și testarea pe utilizatori sănătoși a confirmat fezabilitatea tehnică și relevanța practică a soluției propuse.

Rezultatele obținute validează direcția de cercetare și deschid perspective pentru extinderea testărilor în contexte clinice, optimizarea designului și explorarea unor sisteme hibride capabile să personalizeze terapia și să maximizeze beneficiile recuperării neuromotorii a mâinii.

Prin ansamblul contribuțiilor sale originale, sistemul MANOREHAB se poziționează ca o soluție de vârf în domeniul reabilitării neurologice asistate robotic. Inovația constă nu doar în utilizarea unor tehnologii de ultimă generație precum realitatea mixtă sau encoderele de feedback ci și în modul în care aceste tehnologii sunt integrate armonios într-un flux terapeutic coerent, modular și personalizabil.

Din perspectiva cercetării aplicate, MANOREHAB oferă un cadru excelent pentru explorarea potențialului sinergic dintre robotică, MR și neuroplasticitatea funcțională, deschizând noi direcții de investigare în reabilitarea post-AVC și în alte patologii neurologice.

Capitolul 8. Valorificarea rezultatelor

Pe parcursul stagiului doctoral, activitatea de cercetare s-a concretizat prin diseminarea sistematică a rezultatelor obținute, atât prin publicarea de articole științifice în volume ale conferințelor naționale și internaționale, cât și prin prezentări orale susținute în cadrul unor manifestări științifice de prestigiu.

Mai mult decât atât, am avut o implicare activă și esențială în proiectarea, dezvoltarea și testarea unui echipament mecatronic inovator, destinat recuperării funcționale a persoanelor cu dizabilități neuromotorii.

Această contribuție a presupus integrarea unor tehnologii avansate, optimizarea prototipurilor și validarea lor, demonstrând atât aplicabilitatea practică, cât și potențialul de transfer tehnologic al soluției propuse.

Astfel, demersul științific desfășurat în cadrul raportului de cercetare a avut nu doar o componentă teoretică solidă, ci și un impact concret în domeniul neuroreabilitării moderne.

Obținerea premiului Special Award în cadrul unei expoziții internaționale de prestigiu EUROINVENT 2025 unde au concurat peste 640 de proiecte din 38 de țări constituie o validare științifică și un indicator robust de inovare pentru sistemul MANOREHAB. Această recunoaștere nu numai că certifică originalitatea conceptului și a soluției tehnice.

Premiul obținut reprezintă un indicator esențial al nivelului de excelență atins de MANOREHAB, deoarece a fost evaluat în fața unui juriu internațional compus din experți în tehnologie și inginerie biomedicală.

Acest fapt atestă atât rigurozitatea metodologică și științifică a dezvoltării sistemului, cât și capacitatea sa de a integra soluții tehnice de ultimă generație cum ar fi utilizarea HoloLens 2 pentru realitate mixtă și controlul robotic prin feedback encodabil.

Participarea sistemului MANOREHAB la EUROINVENT 2025 a generat un interes deosebit din partea vizitatorilor, inclusiv experți în inginerie biomedicală, practicieni din domeniul recuperării medicale, investitori, dar și public larg cu preocupări în inovație tehnologică.

Vizitatorii au remarcat în mod constant ușurința cu care sistemul poate fi controlat prin HoloLens 2. Posibilitatea de a interacționa cu mânușa pneumatică într-un spațiu augmentat, fără a utiliza interfețe fizice tradiționale, a fost percepută ca o inovație practică și prietenoasă cu utilizatorul, în special pentru pacienții cu mobilitate limitată.

8.1. Articole

1. **Nechifor, E.**, Nechifor, S.G., Poboroniuc, M. S., Chiriac, F.G., Dosoftei, C., *Integrating a Pneumatic Glove with Microsoft Hololens for Hand Neuromotor Rehabilitation*. In 25th Anniversary Edition International Conference on Control Systems and Computer Science, Bucharest, 27-30 Mai, 2025 (Indexare IEEEExplore).
2. M.S. Poboroniuc, **E. Nechifor**, S. G. Nechifor and I. A. Bonceag, *"Enhancing Attractiveness and Transdisciplinary Innovation in Electrical Engineering Research Master's Curricula,"* 2025 34th Annual Conference of the European Association for Education in Electrical and Information Engineering (EAEIE), Cluj-Napoca, Romania, 2025, pp. 1-7, doi: 10.1109/EAEIE65428.2025.11136226 (Indexare IEEEExplore).
3. Nechifor S.G, **Nechifor E**, Poboroniuc MS, Dosoftei CC, Chiriac GF. *A VR-based upper limb exoskeleton for neuromotor rehabilitation*. Buletinul Institutului Politehnic din Iași (Indexare SCIENDO – acceptată pentru publicare).

8.2. Premii

1. **Special Award**, “Pneumatic Glove with Microsoft Hololens2 for Hand Neuromotor Rehabilitation”; Nechifor E., Poboroniuc Marian, Nechifor Sorin-George, Chiriac F.C. EURO INVENT- European Exhibition of Creativity and Innovation, Iași, România, 8-10 Mai, 2025.
2. **Silver Medal**, “Pneumatic Glove with Microsoft Hololens2 for Hand Neuromotor Rehabilitation”; Nechifor E., Poboroniuc Marian, Nechifor Sorin-George, Chiriac F.C. EURO INVENT- European Exhibition of Creativity and Innovation, Iași, 8-10 Mai, 2025.
3. **Diplomă de Excelență** “Pneumatic Glove with Microsoft Hololens2 for Hand Neuromotor Rehabilitation”; Nechifor E., Poboroniuc Marian, Nechifor Sorin-George, Chiriac F.C. EURO INVENT- European Exhibition of Creativity and Innovation, Iași, 8-10 Mai, 2025 oferită de Agența de Stat pentru Proprietate Intelectuală a Republicii Moldova.

8.3. Direcții viitoare de cercetare

Având în vedere rezultatele obținute în cadrul testelor experimentale și potențialul demonstrat al sistemului MANOREHAB în domeniul neuroreabilitării, se conturează mai multe direcții de cercetare care pot fi urmărite în continuare pentru optimizarea și extinderea aplicațiilor acestuia:

- 1. Integrarea inteligenței artificiale (AI)**
- 2. Extinderea aplicației clinice**
- 3. Validare clinică pe scară largă**
- 4. Dezvoltarea unui modul de biofeedback în timp real**
- 5. Realitate augmentată avansată**
- 6. Tele-reabilitare și acces la distanță**
- 7. Optimizarea consumului energetic și miniaturizarea hardware-ului**
- 8. Interoperabilitate cu alte dispozitive medicale**

Explorarea și implementarea acestor direcții de cercetare pot susține dezvoltarea continuă a sistemului MANOREHAB, generând inovații relevante în sfera dispozitivelor medicale asistive și a terapiilor de reabilitare neuromotorie. Pe termen lung, aceste evoluții vor contribui nu doar la creșterea eficienței intervențiilor terapeutice, ci și la îmbunătățirea semnificativă a calității vieții pacienților, prin facilitarea unei recuperări funcționale mai rapide, mai personalizate și mai accesibile.

ANEXA 1 - Premii obținute pe perioada doctoratului

Special Award, “ Pneumatic Glove with Microsoft Hololens2 for Hand Neuromotor Rehabilitation”; Nechifor E., Poboroniuc Marian, Nechifor Sorin-George, Chiriac F.C. EURO INVENT- European Exhibition of Creativity and Innovation, Iași, România, 8-10 Mai, 2025.



Silver Medal, “ Pneumatic Glove with Microsoft Hololens2 for Hand Neuromotor Rehabilitation”; Nechifor E., Poboroniuc Marian, Nechifor Sorin-George, Chiriac F.C. EURO



INVENT- European Exhibition of Creativity and Innovation, Iași, 8-10 Mai, 2025.

Special Award, Silver Medal, Medalie de Excelență



Bibliografie

Capitolul 1

- [1] Easton, J.D., et al. (2009). *Definition and evaluation of transient ischemic attack*. Stroke, 40(6), 2276–2293.
- [2] Amarenco, P., et al. (2018). *One-year risk of stroke after transient ischemic attack or minor stroke*. NEJM, 378(23), 2182–2190.
- [3] Feigîn, V.L., et al. (2022). *Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2019*. The Lancet Neurology, 21(10), 913–924.
- [4] van Asch, C.J., et al. (2010). *Incidence, case fatality, and functional outcome of intracerebral haemorrhage over time*. Stroke, 41(11), 2431–2438.
- [5] Johnston, S. C., Gress, D. R., Browner, W. S., & Sidney, S. (2000). Short-term prognosis after emergency department diagnosis of TIA. *JAMA*, 284(22), 2901–2906. <https://doi.org/10.1001/jama.284.22.2901>
- [6] Johnson, C.O., et al. (2021). *Global burden of stroke*. The Lancet Neurology, 20(10), 795–820.
- [7] Emergîng Risk Factors Collaboration, Sarwar, N., Gao, P., Seshasai, S. R., Gobîn, R., Kaptoge, S., ... & Danesh, J. (2010). Diabetes mellitus, fasting blood glucose concentration, and risk of vascular disease: a collaborative meta-analysis of 102 prospective studies. *The Lancet*, 375(9733), 2215–2222. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)60484-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)60484-9)
- [8] Ambrose JA, Barua RS. The pathophysiology of cigarette smoking and cardiovascular disease. *J Am Coll Cardiol*. 2004;43(10):1731-7. doi:10.1016/j.jacc.2003.12.047
- [9] Rehm J, Roerecke M. Cardiovascular effects of alcohol consumption. *Trends Cardiovasc Med*. 2017;27(8):534-8. doi:10.1016/j.tcm.2017.06.002
- [10] Veerbeek JM, van Wegen EE, Harmelîng-van der Wel BC, Kwakkel G. Is accurate prediction of gait în nonambulatory stroke patients possible withîn 72 hours poststroke? The EPOS study. *Neurorehabil Neural Repair*. 2011;25(3):268-74. doi:10.1177/1545968310384271
- [11] Robinson RG, Jorge RE. Post-Stroke Depression: A Review. *Am J Psychiatry*. 2016;173(3):221-31. doi:10.1176/appi.ajp.2015.1503036
- [12] Arterex Medical (2025). *Medical Device Industry Facts, Trends and Statistics 2025*. Estimări ale pieței globale și tendințe tehnologice. Disponibil la: <https://arterexmedical.com/medical-device-industry-statistic> (accesat în data de 5.08.2025)
- [13] Deloitte Insights (2024). *2024 Global Health Care Outlook*. Analiză a pieței și factorilor macroeconomici în sănătate.

- [14] Fortune Business Insights (2025). *Medical Devices Market Size, Share & Industry Analysis*. Segmentare și estimări pe tipuri de dispozitive. Disponibil la: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/medical-devices-market-100085> (accesat în data de 5.08.2025)
- [15] Grand View Research (2024). *Rehabilitation Equipment Market Size and Forecast*. Analiză globală a segmentului echipamentelor de reabilitare. Disponibil la: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/rehabilitation-products-market> (accesat în data de 5.08.2025)
- [16] U.S. Food & Drug Administration (FDA) (2024). *Device Classification*. Clasificarea dispozitivelor medicale conform nivelului de risc.
- [17] Databridge Market Research. Global medical devices market segmentation and regional growth analysis. *Databridge Market Research*. 2025. North America dominated (40.05%) în 2024, while Asia-Pacific was the fastest growing region (projected fastest CAGR, driven by China and India) [bccresearch.commarketdataforecast.com+3databridgemarketresearch.com+3freysolutions.com+3](https://www.bccresearch.com/marketdataforecast.com+3databridgemarketresearch.com+3freysolutions.com+3).
- [18] European Parliament and Council (2017). *Regulation (EU) 2017/745 on Medical Devices (MDR)*. Jurnalul Oficial al Uniunii Europene.
- [19] World Health Organization (WHO) (2023). *Global Report on Assistive Technology*. Impactul tehnologiilor emergente în dispozitivele medicale.
- [20] McKinsey & Company (2024). *The Internet of Things in Healthcare*. Integrarea IoT și AI în echipamente medicale.
- [21] OECD (2024). *Access to Medical Devices in Low- and Middle-Income Countries*. Analiză a barierelor de acces la tehnologie medicală.
- [22] ResearchAndMarkets (2024). *Medical Robotics Market – Global Forecast 2024–2030*. Tendințe în robotica medicală și reabilitare.
- [23] Fortune Business Insights. Medical Devices Market Size, Share, Growth. [Online]. Disponibil la: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/medical-devices-market-100085>
- [24] Eur-Lex. Regulamentul (UE) 2017/745 privind dispozitivele medicale. [Online]. Disponibil la: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/>
- [25] GlobeNewswire. Medical Internet of Things Market Report. [Online]. Disponibil la: <https://www.globenewswire.com/>
- [26] MarketsandMarkets. Artificial Intelligence in Healthcare Market – Global Forecast. [Online]. Disponibil la: <https://www.marketsandmarkets.com/>

- [27] European Commission. Digital Health and Care Strategy. [Online]. Disponibil la: <https://health.ec.europa.eu>

Capitolul 2

- [1] tandrîng S, editor. *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*. 42nd ed. London: Elsevier; 2021.
- [2] Netter FH. *Atlas of Human Anatomy*. 8th ed. Philadelphia: Elsevier; 2022.
- [3] <https://nhi.no/sykdommer/muskelskjelett/albue-underarm-hand/boyeseneskader-i-fingrene-pulleyskader> accesat în luna august 2025
- [4] <https://plasticsurgerykey.com/flexor-tendon-injuries> accesat în luna august 2025
- [5] <https://platform.gînamed.ro/cursuri/biologie-barrons/sistemul-muscular> accesat în luna august 2025
- [6] Neumann, D.A. (2017). *Kînesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for Rehabilitation*. Elsevier. – Manual actualizat de referință, foarte utilizat în fizioterapie și reabilitare.
- [7] American Society for Surgery of the Hand: Regional Review Course în Hand Surgery Syllabus, ediția a 10-a, Aurora, Colorado, ASSH, 1990.) <https://aneskey.com/hand/> accesat în luna august 2025
- [8] <https://www.uvmhealth.org/healthwise/topic/ax1000> accesat în luna august 2025
- [9] Hall, J. E., & Guyton, A. C. (2021). *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology* (14th ed.). Elsevier.
- [10] Shadmehr R, Krakauer JW. A computational neuroanatomy for motor control. *Exp Brain Res*. 2008;185(3):359-381.
- [11] Wolpert DM, Ghahramani Z. Computational principles of movement neuroscience. *Nat Neurosci*. 2000;3(Suppl):1212-1217.
- [12] Kawato M. Internal models for motor control and trajectory planning. *Curr Opin Neurobiol*. 1999;9(6):718-727.
- [13] Scott SH. The computational and neural basis of voluntary motor control and planning. *Trends Cogn Sci*. 2012;16(11):541-549.
- [14] Franklin DW, Wolpert DM. Computational mechanisms of sensorimotor control. *Neuron*. 2011;72(3):425-442.
- [15] Todorov E, Jordan MI. Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nat Neurosci*. 2002;5(11):1226-1235.

- [16] Santello M, Bianchi M, Gabiccini M, Ricciardi E, Salvietti G, Prattichizzo D, et al. Hand synergies: integration of robotics and neuroscience for understanding the control of biological and artificial hands. *Phys Life Rev.* 2016;17:1-23.
- [17] Murray RM, Li Z, Sastry SS. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. Boca Raton: CRC Press; 1994.
- [18] Kenney, W. L., Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (2021). *Physiology of Sport and Exercise*. 7th ed. Human Kinetics.
- [19] Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2017). Translating fatigue to human performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(11), 2228–2238.
- [20] Narici, M. V., & Maganaris, C. N. (2006). Adaptability of elderly human muscles and tendons to increased loading. *Journal of Anatomy*, 208(4), 433–443. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2006.00548.x>
- [21] Napier, J. R. (1956). The prehensile movements of the human hand. *Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 38-B(4), 902–913. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.38B4.902>
- [22] **Landsmeer, J. M. F.** (1962). Power grip and precision handling. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 21(2), 164–170. <https://doi.org/10.1136/ard.21.2.164>
- [23] Cramer, S. C., Sur, M., Dobkin, B. H., O'Brien, C., Sanger, T. D., Trojanowski, J. Q., ... & Vinogradov, S. (2011). Harnessing neuroplasticity for clinical applications. *Brain*, 134(6), 1591–1609. <https://doi.org/10.1093/brain/awr039>
- [24] Kolb, B., & Whishaw, I. Q. (2015). *Fundamentals of Human Neuropsychology* (7th ed.). Worth Publishers.
- [25] Johansson, B. B. (2000). Brain plasticity and stroke rehabilitation: The Willis lecture. *Stroke*, 31(1), 223–230. <https://doi.org/10.1161/01.STR.31.1.223>
- [26] Kleim, J. A., & Jones, T. A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity: Implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 51(1), S225–S239. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008/018\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/018))
- [27] Merzenich, M. M., Kaas, J. H., Wall, J., Nelson, R. J., Sur, M., & Felleman, D. (1984). Progression of change following median nerve section in the cortical representation of the hand in areas 3b and 1 in adult owl and squirrel monkeys. *Neuroscience*, 10(3), 639–665. [https://doi.org/10.1016/0306-4522\(84\)90140-X](https://doi.org/10.1016/0306-4522(84)90140-X)
- [28] Kaas, J. H., Merzenich, M. M., & Killackey, H. P. (1983). The reorganization of somatosensory cortex following peripheral nerve damage in adult and developing mammals.

Annual Review of Neuroscience, 6, 325–356. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.06.030183.001545>

- [29] Taub, E., Uswatte, G., & Pidikiti, R. (2006). Constraint-Induced Movement Therapy: A new family of techniques with broad application to physical rehabilitation—A clinical review. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 36(3), 237–251. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2006.06.0062>
- [30] Laver, K. E., Lange, B., George, S., Deutsch, J. E., Saposnik, G., & Crotty, M. (2017). Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (11), CD008349. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD008349.pub4>
- [31] Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., & Wolf, P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(1), 21–53. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0333-8>
- [32] Michielsen, M. E., Selles, R. W., van der Geest, J. N., Eckhardt, M., Yavuzer, G., Stam, H. J., & Bussmann, J. B. (2011). Motor recovery and cortical reorganization after mirror therapy in chronic stroke patients: A phase II randomized controlled trial. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 25(3), 223–233. <https://doi.org/10.1177/1545968310385127>
- [33] <https://biorender.com> - accesat în luna august 2025

Capitolul 3

- [1] Corbetta, D., & Santamato, A. (2015). Constraint-Induced Movement Therapy in stroke patients: Systematic review and future perspectives. *Neurological Sciences*, 36(6), 983–993. <https://doi.org/10.1007/s10072-015-2166-y>
- [2] Carey, L. M., Matyas, T. A., & Oke, L. E. (2002). Sensory loss in stroke patients: effective training of tactile and proprioceptive discrimination. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83(12), 1722–1728. <https://doi.org/10.1053/apmr.2002.35469>
- [3] Noma, T., Matsumoto, S., Etoh, S., Shimodozono, M., & Kawahira, K. (2012). Anti-spastic effects of the direct application of vibratory stimuli to spastic muscles after stroke. *NeuroRehabilitation*, 31(3), 267–274. <https://doi.org/10.3233/NRE-2012-00805>
- [4] Sharman, M. J., Cresswell, A. G., & Riek, S. (2006). Proprioceptive neuromuscular facilitation stretching: mechanisms and clinical implications. *Sports Medicine*, 36(11), 929–939. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636110-00002>
- [5] Page, P. (2012). Current concepts in muscle stretching for exercise and rehabilitation. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 7(1), 109–119.

- [6] Poboroniuc, M.-S., & Irimia, D.-C. (2019). *Întelligent Functional Electrical Stimulation*. În A. C. de Pina Filho & F. A. de Almeida (Eds.), **Recent Advances in Intelligent Assistive Technologies: Paradigms and Applications** (pp. 61–82). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30817-9_3
- [7] Peckham, P. H., & Knutson, J. S. (2005). Functional Electrical Stimulation for Neuromuscular Applications. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 7, 327–360. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.6.040803.140103>
- [8] Biasiucci, A., Leeb, R., Iturrate, I., Perdakis, S., Al-Khodairy, A., Corbet, T., ... & Millán, J. del R. (2018). Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke. *Nature Communications*, 9(1), 2421.
- [9] Howlett, O. A., Lannin, N. A., Ada, L., & McKinstry, C. (2015). Functional electrical stimulation improves activity after stroke: a systematic review with meta-analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 96(5), 934–943.
- [10] Ramachandran, V. S., & Altschuler, E. L. (2009). *The use of visual feedback, in particular mirror visual feedback, in restoring brain function*. *Brain*, 132(7), 1693–1710. <https://doi.org/10.1093/brain/awp135>
- [11] Michielsen, M. E., Smits, M., Ribbers, G. M., Stam, H. J., Van der Geest, J. N., Bussmann, J. B., & Selles, R. W. (2011). *The neuronal correlates of mirror therapy: An fMRI study on mirror induced visual illusions in patients with stroke*. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 82(4), 393–398. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2009.194134>
- [12] Thieme, H., Mehrholz, J., Pohl, M., Behrens, J., & Dohle, C. (2018). *Mirror therapy for improving motor function after stroke*. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (7), CD008449. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD008449.pub3>
- [13] Polli, A., Moseley, G. L., Gioia, E., Beames, T., & Bowering, K. J. (2022). *Integrating mirror therapy, virtual reality and functional electrical stimulation for upper limb rehabilitation: A narrative review*. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 19, 5. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00981-1>

Capitolul 4

- [1] Rehab-Robotics Company Ltd. (2025). *Hand of Hope – dispozitiv terapeutic pentru reabilitarea mâinii și antebrațului*. Disponibil la: rehab-robotics.com.hk
- [2] Kabir, R., et al. (2022). *Hand Rehabilitation Devices: A Comprehensive Review*. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, [PMC9325203](https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.9325203)

- [3] <https://www.medicalexpo.it/prod/rehab-robotics/product-77946-472601.html>
accesat în luna august 2025
- [4] Polygerinos, P., et al. (2015). *Soft Robotics for Hand Rehabilitation: A Review of Recent Developments*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 23(3), 314–323
- [5] Shintake, J., et al. (2018). *Soft robotic grippers*. Advanced Materials, 30(29), 1707035.
- [6] Yap, H. K., et al. (2017). *Design and preliminary feasibility study of a soft robotic glove for hand function assistance in stroke survivors*. Frontiers in Neuroscience, 11, 547.
- [7] Chen, R., Leonardis, D., Frisoli, A., & Chiaradia, D. (2025). *A powerful customized fabric-based soft robotic glove for assistance and rehabilitation*. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), 669–674.
- [8] Polygerinos, P., Correll, N., Morin, S. A., Mosadegh, B., Onal, C. D., Petersen, K., ... & Walsh, C. J. (2015). *Soft robotics: Review of fluid-driven intrinsically soft devices; manufacturing, sensing, control, and applications in human-robot interaction*. Advanced Engineering Materials, 17(12), 170–185.
- [9] Niiyama, R., Sun, X., Sung, C., An, B., Saccone, A., & Rus, D. (2014). *Pouch motors: Printable soft actuators integrated with computational design*. Soft Robotics, 1(1), 71–79.
- [10] Rituraj, Rituraj & Scheidl, Rudolf & Ladner, Peter & Lauber, Martin & Plöckinger, Andreas. (2022). Prototyping and Experimental Investigation of Digital Hydraulically Driven Knee Exoskeleton. Energies. 15. 8695. 10.3390/en15228695.
- [11] Kang, B. B., Lee, H., In, H., Jeong, U., Chung, J., & Cho, K. J. (2016). *Development of a polymer-based tendon-driven wearable robotic hand*. IEEE
- [12] Polygerinos, P., et al. (2017). *Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation*. Robotics and Autonomous Systems, 93, 151–165.
- [13] Yun, S. S., Kang, B. B., & Cho, K. J. (2017). *Exo-glove PM: An easily customizable modularized pneumatic assistive glove*. IEEE Robotics and Automation Letters, 2(3), 1725–1732. doi: 10.1109/LRA.2017.2678545
- [14] <https://www.biorobotics.snu.ac.kr/wearable-devicese> (accesat în data de 5.08.2025)
- [15] Brokaw, E. B., Nichols, D., Holley, R. J., & Lum, P. S. (2011). *Robotic therapy provides a stimulus for upper limb motor recovery after stroke: a randomized controlled pilot study*. Neurorehabilitation and Neural Repair, 25(6), 477–484.
- [16] Bioservo Technologies. (2025). *Carbonhand – smarter and more supportive than ever*. Disponibil la: bioservo.com

- [17] Anatomical Concepts. (2024). *Carbonhand – Soft Extra Muscle glove for rehabilitation and assistance*. Disponibil la: anatomicalconcepts.com
- [18] Exoskeleton Report. (2024). *Carbonhand product overview*. Disponibil la: exoskeletonreport.com
- [19] Hagen, O., et al. (2024). *Home-based use of the Carbonhand soft-robotic glove improves hand function in chronic stroke: a clinical pilot study*. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*.
- [20] PubMed/PMC. (2025). *Evaluation of Carbonhand in neurological rehabilitation – randomized controlled trials*. Disponibil la: ncbi.nlm.nih.gov
- [21] <https://www.notebookcheck.net/Bioservo-opens-sales-of-Carbonhand-assistive-grip-strengthening-robotic-glove-to-everyone-in-the-US.872673.0.html> (accesat în data de 5.09.2025)
- [22] Ionașcu, A., & Poboroniuc, M. (2023). *Neurorehabilitation strategies integrating functional electrical stimulation and robotic assistance*. *Journal of Mechatronics and Medical Engineering*, 12(2), 45–58.
- [23] R. Ionașcu, A. -I. Roman, M. -S. Poboroniuc, D. -C. Irimia and A. Mitocaru, "A Smart FES and Mechatronic Glove System MANUTEX Aimîng for Recovery of the Upper Limb in Stroke People," 2021 Înternational Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Iasi, Romania, 2021, pp. 293-298, doi: 10.1109/SIELMEN53755.2021.9600438.
- [24] Piseru, D., Ionașcu, A., & Poboroniuc, M. (2024). *MANUTEX: A hybrid FES–mechatronic glove for upper-limb neurorehabilitation*. *Proceedings of the Înternational Conference on Biomedical Robotics*, Iași, Romania.
- [25] Hâines, C. S., Lima, M. D., Li, N., Spîinks, G. M., Foroughi, J., Madden, J. D., ... & Baughman, R. H. (2014). *Artificial muscles from fishing line and sewing thread*. *Science*, 343(6173), 868-872.
- [26] Saliani, A., Jalili, N., & Moallem, M. (2019). *A survey of shape memory alloy actuators for robotic applications*. *Smart Materials and Structures*, 28(6), 063001.
- [27] Carpi, F., Bauer, S., & De Rossi, D. (2010). *Stretching dielectric elastomer performance*. *Science*, 330(6012), 1759-1761.
- [28] Bierîng, S., Nguyen, C. T., & Wallmersperger, T. (2021). *Magneto-active elastomers: Materials and applications*. *Smart Materials and Structures*, 30(12), 123001.

- [29] Laver, K. E., Lange, B., George, S., Deutsch, J. E., Saposnik, G., & Crotty, M. (2017). *Virtual reality for stroke rehabilitation*. Cochrane Database of Systematic Reviews, 11, CD008349. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD008349.pub4>
- [30] Cameirão, M. S., Bermúdez i Badia, S., Duarte, E., & Verschure, P. F. M. J. (2010). *Virtual reality based rehabilitation speeds up functional recovery of the upper extremities after stroke: a randomized controlled pilot study in the acute phase of stroke using the Rehabilitation Gamîng System*. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 28(4), 387–396.
- [31] Salisbury, J. P., et al. (2013). CAREN: Computer Assisted Rehabilitation Environment. *Studies in Health Technology and Informatics*, 184, 201–207.
- [32] Ballester, B. R., Duff, A., Maier, M., et al. (2016). A critical time window for recovery extends beyond one-year post-stroke. *Journal of Neurophysiology*, 115(3), 1271–1284.
- [33] Traenka C, Wiesner K, Albert S, Signer S, Mueller P, Fischer T, Frank M, Mauthner O, Kressig RW, Peters N, Engelter ST. Virtual reality in neurorehabilitation – what matters? A therapists’ view. *Physiotherapy Research and Reports*. 2020;3:1-5. doi:10.15761/PRR.1000131. ISSN: 2516-7081.
- [34] Burdea, G. C., Cioi, D., Martîn, J., Fensterheim, D., & Holenski, M. (2015). The Rutgers Arm II Rehabilitation System for home-based therapy after stroke: A pilot study. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 94(10), 881–890.
- [35] Muthukumaraswamy S, Banerjee A, McCulloch A, Buchanan J, Robson N. An AR system for monitoring arm movements for stroke patients. In: Coperich K, Cudney E, Nembhard H, eds. *Proceedings of the 2017 Industrial and Systems Engineering Conference*. Texas A&M University, College Station, TX; California State University – Fullerton, Fullerton, CA; 2017.
- [36] Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E77-D(12), 1321–1329.
- [37] Bower, K., Clark, R., McGinley, J., Martîn, C., Miller, K., & McGarry, T. (2020). Clinical feasibility of interactive mixed reality therapy for stroke rehabilitation. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 15(4), 1–8.
- [38] Keller, U., Kuhn, J., Kramer, J., & Schmitz, B. (2020). Training cognitive and motor skills with mixed reality: Applications of Microsoft HoloLens in neurorehabilitation. *Frontiers in Neurology*, 11, 569.
- [39] Azuma, R. T. (1997). *A Survey of Augmented Reality*. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4), 355–385.

- [40] Botella, C., et al. (2019). *Virtual reality and augmented reality in mental health treatment: A review of recent advances*. Annual Review of Clinical Psychology, 15, 1–26.
- [41] Chen, P., et al. (2021). *Augmented reality in rehabilitation: Clinical applications and perspectives*. Frontiers in Neurology, 12, 639–655.
- [42] Paolucci, S., et al. (2021). *Augmented reality for gait and balance training in neurological disorders: A systematic review*. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 18, 1–14.

Capitolul 5

- [1] Shahid Talha, Gouwanda Darwîn, et al., “Moving toward Soft Robotics: A Decade Review of the Design of Hand Exoskeletons,” Biomimetics, Vol.3, no.4, 2018.
- [2] Chen, I.M., Li, K., Lim, C.K. & Yeo, S.H., 2010. Development of finger-motion capturing device based on optical linear encoder, Journal of Rehabilitation Research & Development 48, pp. 69-82.
- [3] Azuma RT. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 1997;6(4):355–385.
- [4] Milgram P, Kishino F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*. 1994;E77-D(12):1321–1329.
- [5] Speicher M, Hall B, Nebeling M. What is Mixed Reality? *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2019;1–15.
- [6] Tao F, Zhang H, Liu A, Nee AYC. Digital Twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019;15(4):2405–2415.
- [7] Speicher M, Hall B, Nebeling M. What is Mixed Reality? *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2019;1–15.
- [8] Moro C, Štromberga Z, Raikos A, Stirling A. The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy. *Anat Sci Educ*. 2017;10(6):549–559.

- [9] Wang X, Truijens M, Hou L, Zhou Y, Wang Y. Integrating augmented reality with building information modeling: Onsite construction process controlling for liquefied natural gas industry. *Automation in Construction*. 2014;40:96–105
- [10] Microsoft. *Remote Assist with HoloLens 2*. Microsoft Dynamics 365. Disponibil la: <https://dynamics.microsoft.com/en-us/mixed-reality/remote-assist/> accesat în luna august 2025
- [11] Ma M, Fallavollita P, Seelbach I, von der Heide AM, Euler E, Waschke J, Navab N. Personalized augmented reality for anatomy education. *Clin Anat*. 2016;29(4):446–453.
- [12] Marescaux J, Rubino F, Arenas M, Mutter D, Soler L. Augmented-reality–assisted laparoscopic adrenalectomy. *JAMA*. 2004;292(18):2214–2215.
- [13] Volonté F, Pugin F, Bucher P, Sugimoto M, Ratib O, Morel P. Augmented reality and image overlay navigation with OsiriX in laparoscopic and robotic surgery: not only a matter of fashion. *J Hepatobiliary Pancreat Sci*. 2011;18(4):506–509.
- [14] Maggio MG, De Luca R, Molonia F, Porcari B, Destro M, Casella C, et al. Cognitive rehabilitation in patients with traumatic brain injury: a systematic review on virtual reality. *J Clin Neurosci*. 2019;61:1–7.
- [15] Speicher M, Hall B, Nebeling M. What is Mixed Reality? *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2019;1–15
- [16] Grieves M, Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. În: Kahlen FJ, Flumerfelt S, Alves A, editors. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer; 2017. p. 85–113.
- [17] Unity Technologies. *Unity Manual – Importing models*. Unity Documentation. Disponibil la: <https://docs.unity3d.com/Manual/HOWTO-importObject.html> (accesat în data de 5.06.2025)
- [18] Microsoft. *HoloLens 2: Overview of Mixed Reality applications*. Microsoft Docs. Disponibil la: <https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/> (accesat în data de 5.03.2025)
- [19] Chu C Y, Patterson R M, “Soft robotic devices for hand rehabilitation and assistance: a narrative review,” *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, Vol.15, 2018.
- [20] Lin, J., Wu, Y. & Huang, T.S., 2000. Modeling the Constraints of Human Hand Motion, Beckman Institute
- [21] Deterding S, Dixon D, Khaled R, Nacke L. From game design elements to gamefulness: Defining “gamification”. *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments*. 2011;9–15.
- [22] Gregory J. *Game Engine Architecture*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2018.

- [23] Unity Technologies. *Unity and Visual Studio: Tools for game development*. Unity Documentation. Disponibil la: <https://docs.unity3d.com/Manual/VisualStudioIntegration.html> accesat în luna august 2025
- [24] Ghogen. Visual studio documentation. url: <https://learn.microsoft.com/en-us/visualstudio/windows/?view=vs-2022>.
- [25] Arata J, Ohmoto K, Gassert R, et al., "A new hand exoskeleton device for rehabilitation using a three-layered sliding spring mechanism," Presented at ICRA 2013. Available: DOI:10.1109/ICRA.2013.6631126.
- [26] Borboni A, Mor M, Faglia R, "Gloreha—hand robotic rehabilitation: design, mechanical model, and experiments," J Dyn Sys Meas Control, Vol.138, no.11, Nov. 2016.
- [27] Aggogeri F, Mikolajczyk T, O'Kane J, "Robotics for rehabilitation of hand movement in stroke survivors." Advance in Mechanical Engineering, Vol.11, no.4, pp.1-14, 2019
- [28] Popov D, Gaponov I, Ryu J H, "Portable Exoskeleton Glove With Soft Structure for Hand Assistance in Activities of Daily Living," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.22, no.2, pp. 865-875, Apr. 2017.
- [29] In H, Kang B B, Sin M K, et al., "Exo-Glove: A Wearable Robot for the Hand with a Soft Tendon Routing System," IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol.22, no.1, pp. 97-105, 2015.
- [30] Jiangbei W, Yanqiong F, Wu P, "Design, Modeling, and Testing of a Soft Pneumatic Glove With Segmented PneuNets Bending Actuators," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.24, no.3, pp. 990-1001, Jun. 2019.
- [31] Dorin Ungureanu et al. HoloLens 2 Research Mode as a Tool for Computer Vision Research.2020. arXiv: 2008.11239 [cs.CV].
- [32] Hung-Jui Guo and Balakrishnan Prabhakaran. HoloLens 2 Technical Evaluation as Mixed Reality Guide. July 2022. doi: 10.48550/arXiv.2207.09554.
- [33] Hongying Z, et al., "Topology Optimized Multimaterial Soft Fingers for Applications on Grippers, Rehabilitation, and Artificial Hands," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.24, no.1, pp. 120-131, Feb. 2019.
- [34] Companies Currently Using Microsoft HoloLens. url: <https://discovery.hgdata.com/product/microsoft-hololens>. - (accesat în data de 5.03.2025)
- [35] Mamaylya. Hololens 2 gestures (for example, Gaze and air tap) for navigating a guide in Dynamics 365 Guides - Dynamics 365 mixed reality. url: https://learn.microsoft.com/en-us/dynamics365/mixed-reality/guides/operator_gestures-hl2. (accesat în data de 5.03.2025)

- [36] Casey Meekhof. Point and commit with hands - mixed reality. url: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/point-and-commit>.
- [37] Keyan Cao et al. "An Overview on Edge Computing Research". In: IEEE Access 8 (2020), pp. 85714–85728. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991734.
- [38] Tharam Dillon, Chen Wu, and Elizabeth Chang. "Cloud Computing: Issues and Challenges". In: 2010 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. 2010, pp. 27–33. doi: 10.1109/AINA.2010.187.