



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉSTERVEZET

KÓCZI DÁVID

Humanoid robotok biztonságának vizsgálata

Témavezető: Prof. Dr. Sárosi József

BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2026 június 4.

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	5
A tudományos probléma megfogalmazása	5
Célkitűzések	6
A téma kutatásának hipotézisei	7
Kutatási módszerek	8
1 ELMÉLETI ÉS MATEMATIKAI ALAPOK	11
1.1 Ember-robot együttműködés és a kontaktustípusok fizikai értelmezése	11
1.2 A pneumatikus mesterséges izom egyszerűsített modellje	12
1.3 Erőmérés, korrelációs és impulzusjellegű mennyiségek	13
1.4 A csúszómód szabályozás alapelvei	14
1.5 Mély megerősítéses tanulás biztonságkritikus rendszerekben	14
2 HUMANOID ROBOTOK BIZTONSÁGI KERETRENDSZERE	16
2.1 Szakirodalmi térkép	16
2.1.1 Keresési stratégia, beválasztási és kizárási kritériumok	18
2.2 Fizikai biztonság	20
2.2.1 Ütközésselkerülés, közelségérzékelés és mozgástervezés	21
2.2.2 Engedékeny kialakítás és erőkorlátozás	22
2.2.3 Hibabiztos működés és eséskezelés	23
2.3 Kiber-biztonság és szoftveres megbízhatóság	24
2.4 Szabványok	27
2.4.1 Dinamikus kockázatértékelés és a szabványi átmenet mérnöki értelmezése	29
2.5 Bizalom, elfogadás és etikai szempontok	31
2.6 Integrált értelmezés és részösszegzés - H1	34
3 ÜTKÖZÉSEDEKTELÁTÁS ÉS PROFILALKOTÁS SZENZORFÚZIÓVAL	35
3.1 Mérőrendszer és kísérleti protokoll	35

3.2	Kvázi-statisztikus és tranziens kontaktus összehasonlítása.....	39
3.2.1	Szenzorfüziós döntési logika és jellemzőtér	44
3.2.2	Mérési bizonytalanságok és döntési küszöbök	45
3.3	A H2 hipotézis igazolása	46
4	A PNEUMATIKUS MESTERSÉGES IZMOK VÉDELMI REAKCIÓDINAMIKÁJA.....	47
4.1	Ütközési esetek és kísérleti protokoll	47
4.2	A reakcióidő összetevői	49
4.3	A kvázi-statisztikus és tranziens görbék összehasonlítása	50
4.4	Kinyert késleltetési mutatók	52
4.5	Az előterhelés hatása a súlyosságra	55
4.6	Reakcióidő és biztonsági tartalék	56
4.6.1	Reakciólogika állapotgépes formalizálása.....	58
4.6.2	Testhelyzetfüggő redukált tömeg és az eredmények skálázhatósága	60
4.7	Az előterhelés mint kockázati tényező	61
4.8	A H3 hipotézis igazolása	63
5	ROBUSZTUS SZABÁLYOZÁS PNEUMATIKUS MESTERSÉGES IZOMMAL HAJTOTT ROBOTKARON	65
5.1	A vizsgált robotrendszer és a mérési keret	66
5.2	Videóalapú mérési módszer és adatkinyerés	68
5.3	A szabályozási kiindulópont és a kiértékelési mutatók	69
5.3.1	Biztonságorientált teljesítményindex és szabályozási kompromisszum	72
5.3.2	Paraméterhangolás és működési tartomány robusztussági szempontból	73
5.4	Kísérleti eredmények és biztonságtechnikai értelmezés.....	77
5.5	A H4 hipotézis igazolása	78
6	MESTERSÉGES INTELLIGENCIA ALAPÚ VEZÉRLÉS ÉS BIZTONSÁGOS BETANÍTÁS	79
6.1	A kísérleti rendszer és kísérleti protokoll	79

6.2	A virtuális környezet és a betanítási forráskönyvek.....	81
6.3	Az értékelési mutatók és a PID referencia.....	82
6.4	Eredmények és biztonsági értelmezés	84
6.5	A H5 hipotézis igazolása	89
ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK.....		90
	Új tudományos eredmények	91
	Ajánlások	95
IRODALOMJEGYZÉK		96
RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK.....		111
TÁBLÁZATJEGYZÉK.....		112
ÁBRAJEGYZÉK.....		113
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS		115

BEVEZETÉS

A tudományos probléma megfogalmazása

A robotika fejlődése az elmúlt évtizedekben jelentősen kibővítette a robotrendszerek alkalmazási területeit. A hagyományosan ipari környezetben működő robotok mellett egyre nagyobb figyelmet kapnak azok a rendszerek, amelyek közvetlen emberi környezetben képesek működni. Különösen a humanoid robotok esetében merül fel az a kihívás, hogy a robot és az ember közös munkatérben, változó és részben strukturálatlan környezetben működnek együtt. A klasszikus ipari robotbiztonsági megközelítés elsősorban a fizikai elhatárolásra és a térbeli szeparációra épül. Ez a megközelítés hatékonyan alkalmazható zárt ipari robotcellák esetében, azonban korlátozottan használható olyan rendszereknél, ahol a robot és az ember közvetlen fizikai interakcióba léphet egymással. [1, 2, 3] A komplex humanoid platformok hardver- és szoftveroldali integrációja jól mutatja ezt az átmenetet a laboratóriumi prototípusoktól a szélesebb alkalmazási környezet felé [4].

A humanoid robotok esetében ezért a biztonság kérdése komplexebb mérnöki problémává válik, amely magában foglalja az ember-robot interakció során fellépő ütközések felismerését, az ütközési folyamat dinamikájának vizsgálatát, valamint a robot mozgásának stabil és kiszámítható szabályozását. A lágy aktuátorokkal működtetett robotmechanizmusok, mint például a pneumatikus mesterséges izom (PMI) hajtású rendszerek sajátos dinamikai tulajdonságokkal rendelkeznek. A rugalmas viselkedés, a nyomásváltozásból származó dinamikai hatások és a nemlineáris működés együttesen befolyásolják az ütközések lefolyását és a védelmi reakció hatékonyságát. Ennek következtében a humanoid robotok biztonságának vizsgálata olyan összetett feladat, amely a kontaktusdetektálás, a dinamikai elemzés és a megfelelő szabályozási módszerek együttes alkalmazását igényli [5, 6, 7].

A kutatásom célja ezért a humanoid robotok biztonsága szempontjából meghatározó részjelenségek vizsgálata ellenőrzött kísérleti modelleken. A vizsgálatok során különböző érzékelési és szabályozási megközelítéseket elemeztem, majd az eredményeket egy közös elméleti és tervezési keretben értelmeztem. Ez a megközelítés lehetővé teszi, hogy a humanoid robotok biztonságával kapcsolatos részproblémák egységes mérnöki szemléletben legyenek vizsgálhatóak. A dolgozat több, saját mérőrendszeren és saját publikáción alapuló vizsgálatot kapcsol össze. Ezek közös célja annak bemutatása, hogy

a humanoid robotbiztonság nem kezelhető kizárólag szabványi vagy kizárólag szabályozástechnikai kérdésként, hanem a kontaktusdetektálás, a reakciódinamika, a mozgásszabályozás és a tanuló algoritmusok bevezetési kockázata együtt határozza meg [KD6, 8, 9].

A téma aktualitását az adja, hogy a humanoid és emberközeli robotika fokozatosan kilép a laboratóriumi közegből. Az ipari együttműködő rendszerek mellett a szolgáltató, rehabilitációs, egészségügyi és gondozási alkalmazásokban is egyre több antropomorf szerkezet jelenik meg. Ebben a közegben a biztonság már nem korlátozható a fizikai sérülések elkerülésére: az érzékelés megbízhatósága, a kiber-fizikai működés, a felhasználói bizalom és a szabványi illeszthetőség egyaránt ezen robotok alkalmazhatósági feltétele. [10, 11, 12] A gondozási, gyermek-interakciós és oktatási alkalmazások különösen jól jelzik, hogy a humanoid rendszerek már nem kizárólag kutatólaboratóriumi szerepben jelennek meg [13, 14, 15, KD9].

Az értekezés felépítését úgy alakítottam ki, hogy a bevezető és az elméleti alapozás után a vizsgálat logikája a megfogalmazott hipotézisek mentén, egymásra épülő fejezetekben jelenjen meg. Az elméleti és matematikai alapok áttekintését követően az első érdemi fejezet a humanoid robotok biztonságtechnikájának irodalmi és fogalmi keretét adja meg, és ezzel a H1 hipotézis megalapozását szolgálja. Ezt követően a dolgozat a fizikai ember-robot interakció érzékelési és értelmezési kérdéseit tárgyalja, különös tekintettel a kvázi-statisztikus és tranziens kontaktusok elkülönítésére, amely a H2 hipotézishez kapcsolódik. A következő fejezet az ütközések időbeli lefolyását, a mechanikai és pneumatikus folyamatok eltérő időléptégeit, valamint az előterhelés szerepét vizsgálja, ezáltal a H3 hipotézis kidolgozását adja. Ezt követi a pneumatikus mesterséges izmokkal működtetett mechanizmusok szabályozási kérdésének tárgyalása, majd a tanuló algoritmusi megközelítések elemzése, amelyek rendre a H4 és H5 hipotézisekhez kapcsolódnak. A dolgozatot az eredmények összegzése, az új tudományos eredmények megfogalmazása, valamint a következtetések és a további kutatási irányok bemutatása zárja.

Célkitűzések

A kutatás célja a humanoid robotok biztonságával kapcsolatos mérnöki problémák vizsgálata és olyan módszerek kidolgozása, amelyek hozzájárulnak a biztonságos ember-robot együttműködés megvalósításához. A kutatás során az alábbi fő célkitűzéseket fogalmaztam meg:

C1: Annak bemutatása, hogy a statikus kockázatértékelésre és fizikai elhatárolásra épülő jelenlegi robotbiztonsági szabványok nem elegendők a humanoid robotok emberrel megosztott, nyitott, dinamikus és mindennapi környezetekben, ezért a fizikai biztonságot a kiber-biztonsággal és a szociálpszichológiai tényezőkkel integráltan kell értelmezni.

C2: A pneumatikus mesterséges izom által működtetett humanoid robotok fizikai ember-robot interakcióiban fellépő kvázi-statisztikus és tranziens kontaktusok multimodális szenzorfüzión történő megkülönböztethetősége és a kontaktusprofil becslésének igazolása.

C3: A pneumatikus mesterséges izmokkal működtetett humanoid ízületek ütközés utáni védelmi reakciójának időléptékeinek és az előterhelés súlyossági hatásának kvantitatív jellemzése.

C4: Annak igazolása, hogy a vizsgált pneumatikus mesterséges izmokkal működtetett mechanizmuson, adott pozicionálási feladat és működési tartomány mellett, a robusztus nemlineáris szabályozási módszerek stabilabb és kiszámíthatóbb viselkedést biztosítanak, mint az egyszerű lineáris szabályozók.

C5: Neurális háló alapú vezérlés alkalmazhatóságának vizsgálata nemlineáris robotikai rendszer szabályozásában.

A téma kutatásának hipotézisei

H1 - Feltételezem, hogy a hagyományos, statikus kockázatértékelési módszerekre épülő jelenlegi robotbiztonsági szabványok önmagukban nem elegendők a kiszámíthatatlan, mindennapi emberi környezetben működő, mesterséges intelligenciára és gépi tanulásra épülő, magas fokú autonómiával rendelkező humanoid robotok biztonságának értékeléséhez, ezért a fizikai biztonságot integrálni kell a kiber-biztonsággal és a szociálpszichológiai tényezőkkel.

H2 - Feltételezem, hogy a pneumatikus mesterséges izmokkal működtetett humanoid robotok fizikai interakciói során fellépő kvázi-statisztikus és tranziens kontaktusok multimodális szenzorfüzión elkülöníthetők.

H3 - Feltételezem, hogy a pneumatikus mesterséges izmokkal működtetett humanoid ízület ütközés utáni védelmi reakcióját eltérő időléptékű mechanikai és pneumatikus folyamatok határozzák meg, valamint az előterhelés növekedése növeli az ütközés során átadott impulzust.

H4 - Feltételezem, hogy a lágy aktuátorral működtetett, emberrel közös térben működő manipulátorok erősen nemlineáris és oszcillációra hajlamos dinamikája miatt a hagyományos lineáris szabályozók önmagukban nem biztosítanak kellően kiszámítható működést. A biztonságos és precíz pozicionáláshoz ezért robusztus, nemlineáris vezérlési stratégia alkalmazása indokolt.

H5 - Feltételezem, hogy a nemlineáris, biztonságkritikus robotikai rendszerek mély megerősítéses tanulás alapú vezérlésének tisztán valós fizikai térben történő próba-hiba alapú betanítása kritikus baleseti és hardver-amortizációs kockázattal jár. E veszélyek a szimulált környezetben történő előtanítással jelentősen csökkenthetők.

Kutatási módszerek

A kutatás során több, egymásra épülő módszert alkalmaztam annak érdekében, hogy a humanoid robotok biztonságtechnikájához kapcsolódó kérdéseket ne különálló részfeladatokként, hanem egységes mérnöki problémaként vizsgáljam. A dolgozat módszertani felépítése ezért a szisztematikus szakirodalmi feltárássra, a saját fejlesztésű kísérleti rendszereken végzett mérésekre, a többszörös mérési adatok feldolgozására, a szabályozási összehasonlításra, valamint a tanuló algoritmusi megközelítések értékelésére épül [KD1, 17].

A kutatás első lépése egy feltáró jellegű szakirodalmi áttekintés volt. Ennek célja az volt, hogy rendszerezetten áttekintsem, milyen fő kutatási irányok, műszaki megoldások és biztonságtechnikai szempontok jelennek meg a humanoid robotokkal foglalkozó nemzetközi szakirodalomban. Az áttekintés során a fizikai biztonság, a kiber-biztonság, a szabványi megfelelés, valamint a társadalmi és etikai kérdések egyaránt értékelésre kerültek. A szakirodalmi feldolgozás nemcsak háttérként szolgált, hanem azt is segítette meghatározni, hogy mely részterületeken indokolt saját mérési és fejlesztési munkával továbblépni [3, 9, 17].

A dolgozat kísérleti részének alapját saját tervezésű és saját kivitelezésű mérőrendszerek adták. A fizikai interakciók vizsgálatához pneumatikus mesterséges izmokkal működtetett mérőplatformot építettem. A mechanikai kialakítás, az érzékelők kiválasztása, az adatgyűjtő rendszer összeállítása és a mérési környezet kialakítása is a kutatómunka része volt. A platform felépítésénél az volt a célom, hogy a kontaktushelyzetek ismételhetők legyenek, a működési állapotok szabályozhatóak

maradjanak, és ugyanannak a fizikai eseménynek a mechanikai, pneumatikus és kinematikai jellemzői közös időalapon legyenek vizsgálhatók [KD4, KD5].

A mérőrendszer többcsatornás kialakítású. Az erőhatások mérésére erőmérő cellát, a pneumatikus állapot követésére nyomásérzékelőt, a mozgásállapot leírására pozíció érzékelő szenzort, míg a kontaktus közvetlen érzékelésére érintésalapú szenzort alkalmaztam. A mérési elrendezést úgy alakítottam ki, hogy a különböző érzékelőkből származó jelek ne külön-külön, hanem egymással összefüggésben legyenek értelmezhetők. Ez különösen fontos volt a kontaktus kezdetének, lefutásának és lecsengésének vizsgálatakor, mert a mechanikai és pneumatikus folyamatok időben eltérően jelennek meg.

A mérések során különböző kontaktushelyzeteket, előterhelési állapotokat és működési feltételeket vizsgáltam. A mérési adatok feldolgozásának első lépése az időbeli összehangolás és a szükséges előfeldolgozás volt. Ezt követően meghatároztam azokat a jellemző eseménypontokat, amelyek a további értékeléshez szükségesek voltak, például a kontaktus kezdetét, az erőcsúcs kialakulását, a mechanikai tehermentesülés lefutását, a nyomásváltozás lecsengését és az alapállapothoz közeli visszatérés időpontját. Az így kapott adatokból időtartamokat, csúcserőértékeket, különbségi mennyiségeket és összehasonlító mutatókat képeztem.

Ugyanez a PMI-alapú mérőplatform alkalmas volt az ütközést követő fizikai reakció időbeli elemzésére is. Ennek során a mechanikai válaszidejét, a tehermentesülés folyamatát, valamint a pneumatikus rendszer késleltetett lecsengését vizsgáltam. Az előterhelés hatását több működési állapot összehasonlításával értékeltem. Az elemzés során nemcsak pillanatnyi csúcserőértékeket vettem figyelembe, hanem időintegrált mennyiségeket is, mert ezek jobban leírják a kontaktus súlyosságát és a védelmi reakció tényleges lefolyását.

A kutatás része volt a szabályozási viselkedés vizsgálata is pneumatikus mesterséges izmokkal működtetett mechanizmuson. Ennek során lineáris és robusztus nemlineáris szabályozási megközelítéseket hasonlítottam össze. Az értékelésnél a pozicionálási pontosságot, a beállási viselkedést, a zavarásokkal szembeni érzékenységet és a működés kiszámíthatóságát vettem figyelembe. A cél itt nem általános érvényű kijelentések megfogalmazása volt, hanem annak vizsgálata, hogy a konkrét mechanizmus adott működési tartományában mely megközelítés ad kedvezőbb eredményt.

A módszertani keret további eleme a tanuló algoritmus vizsgálata volt egy nemlineáris robotikai rendszeren. A tanítási eljárást részben szimulációs környezetben, részben valós rendszeren alkalmaztam. Ennek során azt értékeltem, hogy a szimulációs előtanítás és a valós környezetben végzett finomhangolás hogyan befolyásolja a szabályozási pontosságot, a tanítás időigényét és a fizikai rendszer terhelését. Ez a megközelítés azért volt fontos, mert így a tanuló algoritmus nemcsak teljesítményoldalról, hanem biztonságtechnikai szempontból is értékelhetővé vált.

Összességében a kutatási módszertan arra épült, hogy a szakirodalmi feltárást, a saját fejlesztésű mérőrendszereken végzett ellenőrzött kísérleti vizsgálatokat, a többcsatornás mérési adatok időalapú feldolgozását, a szabályozási összehasonlítást és a tanuló algoritmusai megközelítéseket egyetlen koherens mérnöki keretben kapcsoljam össze. Ez tette lehetővé, hogy a dolgozatban vizsgált kérdések ne egymástól független esetekként, hanem a humanoid robotok biztonságtechnikájának összefüggő problémakörként jelenjenek meg.

1 ELMÉLETI ÉS MATEMATIKAI ALAPOK

A dolgozatomban tárgyalt fejezetek közös tulajdonsága, hogy a biztonságtechnikai kérdéseket nem elvont szabályozási vagy kizárólag szabványi problémaként értelmezik, hanem fizikai, dinamikai és irányításelméleti jelenségek összekapcsolódásaként. Ezért szükséges egy elméleti összefoglalás, amely azokat az összefüggéseket rendszerezi, amelyekre a későbbi elemzések ténylegesen támaszkodnak [3, 21, 22].

Ebben a részben azokat a fizikai, dinamikai és irányításelméleti összefüggéseket foglalom össze, amelyekre a dolgozat érdemi fejezeteiben alkalmaztam. Nem a teljes jelenségvilág részletes leírására törekszem, hanem arra, hogy rögzítsem azt az értelmezési és számítási keretet, amely a későbbi vizsgálatok megértéséhez szükséges.

1.1 Ember-robot együttműködés és a kontaktustípusok fizikai értelmezése

A biztonságos ember-robot együttműködés leírására a szakirodalomban és a szabványrendszerekben két alapvető megközelítés jelenik meg. Az egyik a térbeli-időbeli szeparációra, a másik a közös munkatérben fenntartható korlátozott fizikai interakcióra épül. A kvázi-statisztikus és a tranziens érintkezés megkülönböztetése azért alapvető, mert az emberi szövetekre és ízületekre gyakorolt kockázat nem pusztán a csúcserő, hanem annak időbeli lefolyása alapján változik [21, 23]. Az együttműködési helyzetek az építőipari közös munkavégzéstől a komplementer szerelésen át a kézbeadási feladatokig terjednek, ezért a biztonsági értelmezés sem korlátozható egyetlen alkalmazási sémára [24, 25, 26].

A kvázi-statisztikus kontaktus időfüggése a következő alakban írható fel:

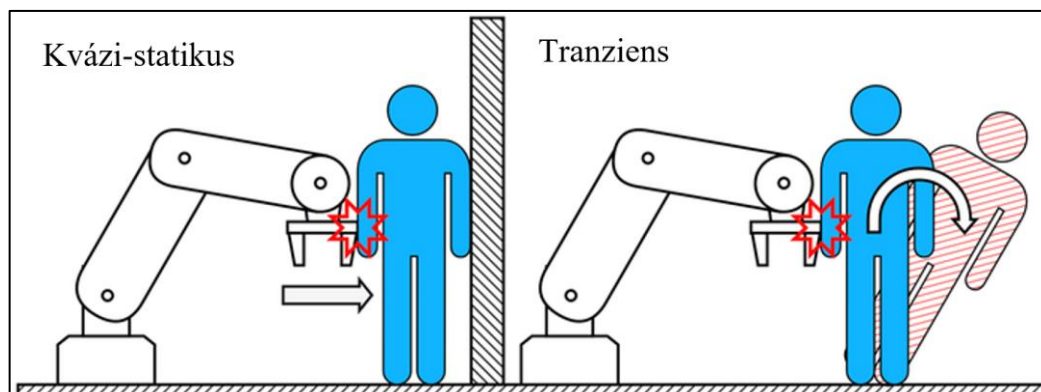
$$F_s(t) = \begin{cases} F_{\max} \frac{t}{t_{\max}}, & 0 \leq t \leq t_{\max} \\ F_{\max} \left(1 - \frac{t-t_{\max}}{t_d}\right), & t_{\max} < t \leq t_{\max} + t_d \end{cases} \quad (1.1)$$

ahol $F_s(t)$ a kvázi-statisztikus erő időfüggvénye, $F_{\max}$ az ütközés során fellépő maximális erő, $t_{\max}$ az erőcsúcsig eltelt idő, míg t_d a lecsengés időtartama. A tranziens kontaktus időbeli lefolyása ezzel szemben jól közelíthető exponenciális csökkenéssel:

$$F_t(t) = F_{\max} e^{-t/\tau}, \quad (1.2)$$

ahol τ az ütközés időállandója. A két összefüggés nem a jelenségek teljes leírására szolgál, hanem arra, hogy szemléltethető legyen, a kvázi-statisztikus érintkezésnél a rendszer

huzamosabb ideig tart fenn terhelést, míg a tranziens kontaktusnál a rövid idő alatt fellépő magasabb csúcsterhelést gyorsabb lecsengés követi. A jelenséget az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: A kvázi-statisz és tranziens kontaktus alapvető szemléltetése. (Saját szerkesztés [23] alapján)

A fenti megkülönböztetésből módszertani szempontból az következik, hogy a kontaktus típusának leírásához nem elegendő egyetlen szenzor csúcserőértéke. A kontaktusprofil jellemzéséhez az erő-idő lefutást, a kontaktus kezdetének időpontját és a tehermentesülés dinamikáját együtt célszerű vizsgálni.

1.2 A pneumatikus mesterséges izom egyszerűsített modellje

A pneumatikus mesterséges izom, amelyet a 2. ábra szemléltet olyan lágy aktuátor, amely működési elvében a dugattyús munkahengerekhez hasonlóan sűrített levegőt használ, ugyanakkor azoktól abban különbözik, hogy nem tartalmaz belső mozgó alkatrészeket, és felépítése rendszerint könnyebb, valamint egyszerűbb [KD5].



2. ábra: Pneumatikus mesterséges izom

A dolgozatban alkalmazott egyszerűsített összefüggés a virtuális munka elvén alapul, és a következő alakban írható fel:

$$F_{PAM} = P A(a(1 - \varepsilon k)^2 - b), \quad (1.3)$$

ahol P a belső nyomás, A a névleges keresztmetszet, ε az összehúzóarány, k az alak tényező, míg a és b a geometriai állandók. Az összefüggés nemlineáris jellege azt

eredményezi, hogy azonos nyomásváltozás különböző működési pontokban eltérő erőváltozást eredményez. Ezért a működési pont és az előfeszítés szerepét a vizsgálatok során külön kell kezelni.

A kísérleti rendszereknél a mozgatus és a terhelés sok esetben bowden-vezetéken, karmechanizmuson vagy pneumatikus ellenhengerrel kapcsolódik a hajtott szerkezeti elemhez. Ez a biztonságtechnikában azért lényeges, mert a teljes reakció nem csak az izom nyomásváltozásából, hanem a mechanikai lánc rugalmasságából, súrlódásából és holtjátékából is felépül. Ebből adódik, hogy a kontaktus megszűnése és a pneumatikus kiegyenlítés eltérő időskálán is végbe mehet.

1.3 Erőmérés, korrelációs és impulzusjellegű mennyiségek

A kontaktusok elemzése során a dolgozat több olyan mennyiséget használ, amelyek a mérési jelek összevetését teszik lehetővé. A különböző szenzorjelek közötti kapcsolat jellemzésére a Pearson-féle korrelációs együttható alkalmazható [27]:

$$r = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{(n\sum x^2 - (\sum x)^2)(n\sum y^2 - (\sum y)^2)}}. \quad (1.4)$$

Ez a mennyiség annak megítélésére használható, hogy az erőérzékeny ellenállás (FSR) szenzorfelület és a precíziós erőmérő cella azonos kontaktus során mennyire hasonló időfüggésű jelet szolgáltat. A korreláció ezért alkalmas arra, hogy különböző kontaktustípusoknál a mérési csatornák közötti egyezés mértékét számszerűen jellemezze.

Az ütközés súlyosságának mérésére a csúcserő önmagában nem mindig elegendő. A kontaktus kezdetéig vagy az első erőcsúcsig átadott impulzus a következő alakban írható fel:

$$J = \int_{t_0}^{t_{csúcs}} F(t) dt. \quad (1.5)$$

Az (1.5) képletben J az impulzus, t_0 a kontaktuskezdet időpontja, $t_{csúcs}$ az erőcsúcs időpontja, $F(t)$ pedig az időfüggő erőjel. Az impulzus azért fontos, mert egyaránt tartalmazza az erő nagyságát és annak időtartamát. A későbbi fejezetekben ez a mennyiség különösen az előterhelés hatásának összehasonlításakor lesz lényeges.

Az erő-elmozdulás kapcsolatból egy korai merevségi becslés is felírható:

$$\hat{k} = \left| \frac{\Delta F}{\Delta x} \right|, \quad (1.6)$$

amely a kontaktus kezdetétől az első erőcsúcsig terjedő szakasz átlagos meredekségét fejezi ki, ahol ΔF az erőváltozás, Δx pedig a hozzá tartozó elmozdulás változás. Bár ez nem teljes mechanikai modell, jól használható a működési pontok összehasonlítására.

1.4 A csúszómód szabályozás alapelvei

A pneumatikus mesterséges izommal működtetett robotok esetében a hagyományos arányos-integráló-deriváló (PID) szabályozók többnyire csak szűk működési tartományban adnak kielégítő eredményt. A súrlódás, a holtjáték, a nyomásdinamika és a geometriai nemlinearitás miatt a szabályozási hiba könnyen tartós lengéshez vezethet. Ezt a problémát kezeli a csúszómód szabályozás, amely a rendszer állapotát egy előírt csúszófelület környezetébe kényszeríti [7, 28].

A hibát jelölje:

$$e(t) = q_d(t) - q(t), \quad (1.7)$$

ahol $q_d(t)$ a kívánt, $q(t)$ pedig a mért szög. A csúszófelület egyszerű alakja:

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t), \quad \lambda > 0. \quad (1.8)$$

A beavatkozási elméleti formája:

$$u(t) = u_{eq}(t) - K \operatorname{sgn}(s(t)), \quad (1.9)$$

ahol $u_{eq}(t)$ az ekvivalens vezérlőjel, K a robosztusságot meghatározó erősítés. A gyakorlatban a jelváltásokból eredő túllövés csökkentésére telítési függvény vagy sávos határfelület alkalmazható. A gyakorlati megvalósításokban a hiba és a hibasebesség nagysága szerint eltérő korrekciós szintek is rendelkezhetők a beavatkozáshoz [7, 28].

1.5 Mély megerősítéses tanulás biztonságkritikus rendszerekben

A tanuló algoritmus elméleti alapját a Markov-folyamatokra épülő döntési keret adja. A rendszer állapota s , a végrehajtható beavatkozás a , a közvetlen jutalom pedig $R(s, a)$. Az optimális cselekvés értéke a Q -függvénnyel írható le [29, KD8]:

$$Q(s, a) = R(s, a) + \gamma \max_{a'} Q(s', a'), \quad (1.10)$$

ahol γ a diszkonttényező, s' pedig a következő állapot. A mély megerősítéses tanulásban ezt a függvényt neurális háló közelíti. A tanítás során a minimalizálandó veszteségfüggvény:

$$L(\theta) = \mathbb{E}_{s,a,r,s'} \left[\left(Q_\theta(s, a) - \left(r + \gamma \max_{a'} Q_\theta(s', a') \right) \right)^2 \right]. \quad (1.11)$$

A mély megerősítéssel tanulás robotikai alkalmazásakor az állapotvektor tipikusan helyzet, sebesség és beavatkozási változókból épül fel, míg a jutalomfüggvény a célhelyzet elérését és a túlzott dinamika elkerülését egyidejűleg súlyozza. Biztonságtechnikai szempontból ennek azért van jelentősége, mert a kizárólag fizikai környezetben végzett próba-hiba tanulás a szerkezetet és a környezetet is terhelheti, ezért a fokozatos, szimulációt is alkalmazó tanítási stratégia indokolt [KD8, 31].

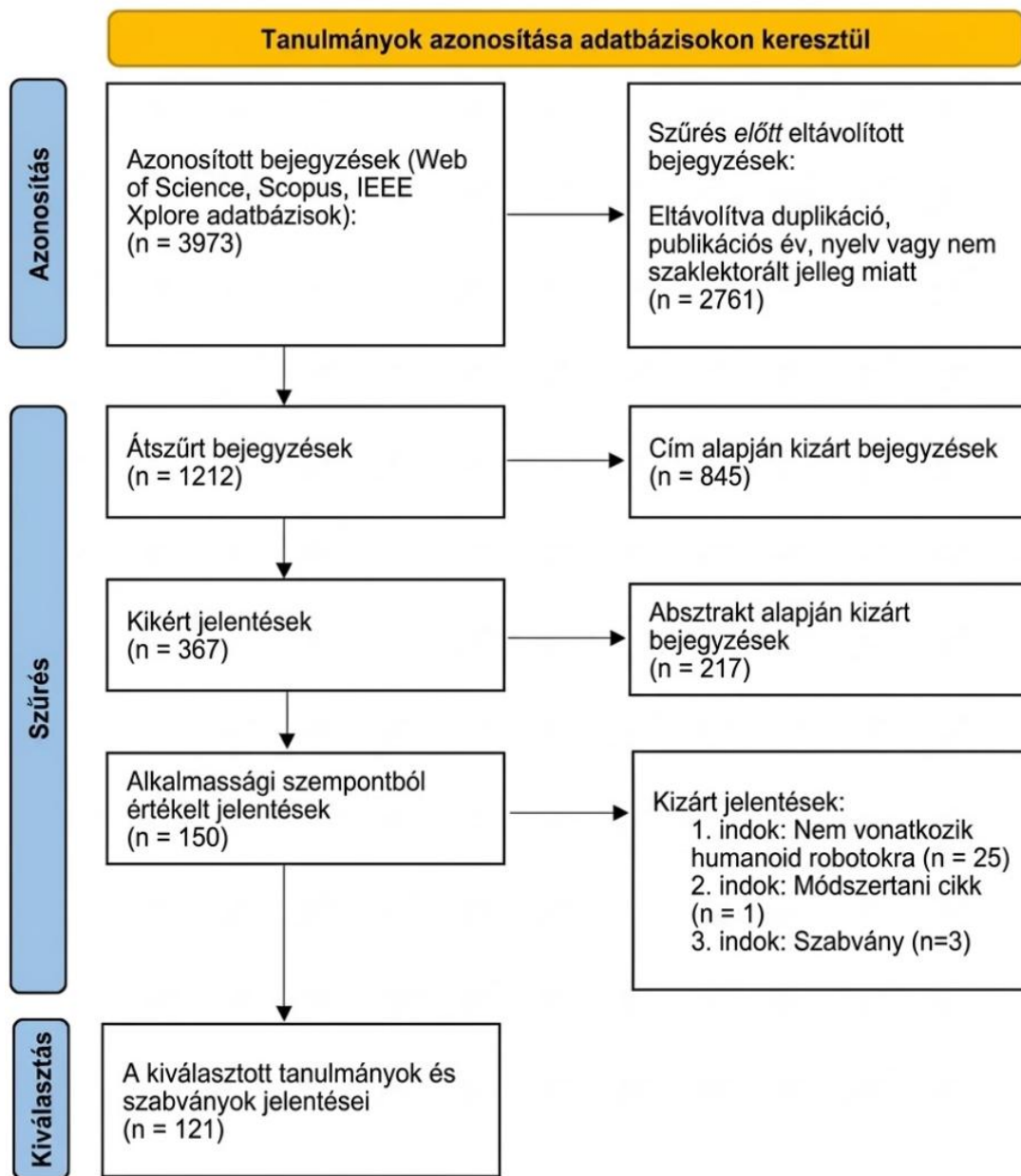
Az elméleti és matematikai alapok célja, hogy egységes fogalmi keretet adjak a további fejezetekhez. A kontaktusidő, az erőcsúcs, az impulzus, a korreláció, a működési pont, a robusztusság és a tanítási kockázat olyan alapfogalmak, amelyek mentén a későbbi fejezetek vizsgálati módszerei alkalmazottak.

2 HUMANOID ROBOTOK BIZTONSÁGI KERETRENDSZERE

A fejezet célja annak bemutatása, hogy a humanoid robotok alkalmazása közvetlen emberi környezetben nem írható le kielégítően a hagyományos, statikus kockázatértékelési módszerekre épülő robotbiztonsági szabványokkal és a klasszikus ipari elhatárolás logikájával [KD1, KD2]. A szisztematikus szakirodalmi feltárás alapján azt vizsgálom, milyen fizikai, kiber-biztonsági és szociálpszichológiai biztonsági rétegek együttes értelmezésére van szükség akkor, amikor a robot emberrel közös térben, változó környezetben és feladatspecifikus érintkezések mellett működik [KD1, KD2]. A módszer feltáró jellegű szakirodalmi áttekintés, amelynek célja a humanoid robotok biztonságtechnikájához kapcsolódó tudományos irodalom feltérképezése, valamint a terület fő kutatási irányainak, alapfogalmainak és jelenlegi hiányosságainak azonosítása. Az alkalmazott módszertan a PRISMA-ScR (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses - Scoping Reviews) irányelvet követi [3, 9, 17].

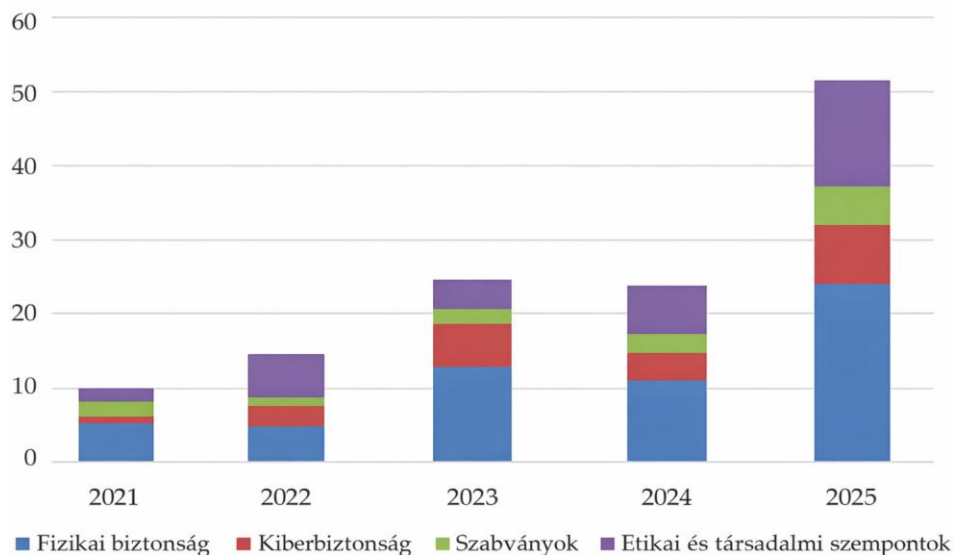
2.1 Szakirodalmi térkép

A keresési és szűrési folyamat eredményét a 3. ábra szemlélteti. A részletes módszertani kritériumokat a következő alfejezet ismerteti. Ebben az alfejezetben a kialakított korpusz tartalmi szerkezetét és fő hangsúlyait foglalom össze [17].



3. ábra: PRISMA-ScR kiválasztási diagram

A 2021 és 2025 között megjelent, lektorált közlemények alapján a humanoid biztonságtechnika kutatási súlypontja továbbra is a fizikai ember-robot interakció köré szerveződik. A legtöbb vizsgálat a kontaktus megelőzésére, az ütközési terhelés mérséklésére és a stabil mozgás fenntartására irányul, miközben a kiber-biztonság, a szabványi illeszthetőség és a felhasználói bizalom kérdései ritkábban jelennek meg, amint azt a 4. ábra éves eloszlása is jelzi.



4. ábra: A felhasznált publikációk éves eloszlása

A beválogatott szakirodalom négy fő tartományba rendezhető: fizikai biztonság, kiber és szoftveres megbízhatóság, szabványi és kockázatelemzési keret, valamint társadalmi elfogadás és etikai biztonság. Humanoid rendszereknél e tartományok nem választhatók szét élesen, mert a testfelépítés, az antropomorf megjelenés, a többsuklós mozgás és a nyitott alkalmazási tér egyszerre alakítja a fizikai, digitális és társas kockázatokat [34, 35, 36].

2.1.1 Keresési stratégia, beválasztási és kizárási kritériumok

A dolgozatban alkalmazott scoping review célja nem meta-analitikus hatásbecslés, hanem a humanoid robotbiztonság szakirodalmi terének strukturált feltárása. A keresést PRISMA-ScR logika szerint végeztem, mert a vizsgált terület heterogén, több tudományterületet kapcsol össze, ezért itt a fő kérdés nem egyetlen aggregált mutató, hanem a tématerületek lefedettsége és kapcsolatrendszerére volt [17].

A keresést négy, részben átfedő kérdésblokk köré szerveztem: fizikai ember-robot interakció, szoftveres és kiberbiztonsági megbízhatóság, szabványi és kockázatelemzési keret, valamint társadalmi és etikai biztonság. A keresőszavak kialakításánál nemcsak a „humanoid robot” és „anthropomorphic robot” kifejezéseket használtam, hanem azokat a műszaki kulcsszavakat is, amelyek a tényleges biztonsági részproblémákat operacionalizálják, például collision avoidance, fall prediction, secure boot, over-the-air update, risk assessment, trust és privacy [3,9].

$$R = (H \cap D_k \cap Y \cap P) \setminus X, k \in \{1,2,3,4\} \quad (2.1)$$

A (2.1) összefüggésben R_k a keresési eredményhalmaz, H a humanoid robotokra utaló kulcsszavak halmaza, D_k az egyes kutatási tartományokhoz rendelt kulcsszócsoporthoz, Y az időablakot, P a lektorált közleményekre vonatkozó korlátozást, X pedig a kizárási feltételeket jelöli. Ezzel a formalizálással egyértelműen elválasztható a tematikus relevancia, az időbeli aktualitás és a publikációs minőség szempontja [32, 33].

A beválasztási kritériumok között ezért csak olyan angol nyelvű, 2021-2025 között megjelent folyóiratcikkek és teljes terjedelmű konferenciaközlemények szerepeltek, amelyek explicit módon humanoid vagy erősen antropomorf robotrendszerek biztonsági kérdését tárgyalták. Kizárásra kerültek azok a munkák, amelyek kizárólag klasszikus ipari berendezésekre vonatkoztak, nem tartalmaztak érdemi biztonságtechnikai szempontot, vagy csupán absztrakt, poszter, rövid hír, illetve nem lektorált technikai beszámoló formájában jelentek meg. Ez a szűrés csökkenti annak kockázatát, hogy a vizsgálatba olyan közlemények kerüljenek be, amelyeknél a humanoid kontextus csak említés szintjén jelenik meg [37].

A cím és absztraktszintű szűrés után a teljes szövegű kiértékelésnél már nem egyszerű tematikus relevanciát, hanem érdemi hozzájárulást kerestem. Egy cikk akkor maradt a korpuszban, ha legalább az alábbi négy szempont egyikében konkrét állítást tett: mérési vagy vezérlési eredményt közölt, biztonsági architektúrát vagy kockázatsökkentő módszert vezetett be, szabványi vagy szabályozási értelmezést adott, vagy a felhasználói bizalomhoz, elfogadáshoz, adatvédelemhez kapcsolódó következményt fogalmazott meg. Ez a döntési szabály azért lényeges, mert a humanoid biztonság kérdése gyakran szétszórtan, különböző szakterületi nyelveken jelenik meg, így a pusztán kulcsszavas beválogatás önmagában nem elegendő [3,9,38].

A fenti szűrés eredményeként kialakult korpusz nem teljes körű normatív ítéletet, hanem strukturált tudástérképet ad. Ez a korpusz szolgál alapul a következő alfejezetek tartalmi elemzéséhez, az 1. táblázat a négy tartomány és a disszertáció fejezetei közötti kapcsolatot foglalja össze.

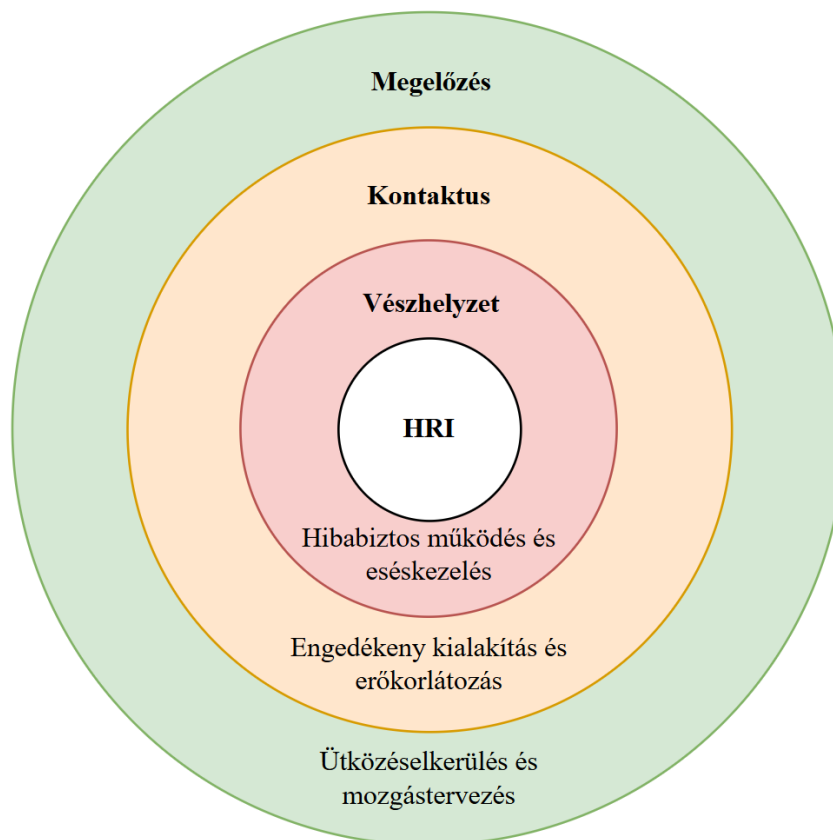
1. táblázat: A humanoid biztonságtechnika fő tartományai és kapcsolata a disszertáció érdemi fejezeteivel.

Biztonsági tartomány	Központi kérdés	Jellemző műszaki fókusz	Kapcsolódó disszertáció fejezet
Fizikai biztonság	Hogyan előzhető meg, mérsékelhető vagy kezelhető a veszélyes fizikai kontaktus?	Észlelés, pályamódosítás, kontaktusminősítés, erő- és nyomáskorlátozás, reakciódinamika, robusztus mozgásszabályozás	2., 3., 4. és 5. fejezet
Kiber- és szoftveres megbízhatóság	Miként előzhető meg, hogy a hibás, nem validált vagy sérülékeny szoftver fizikai kockázattá váljon?	Parancshitelesítés, kommunikációvédelem, szoftverrobusztusság, digitális iker, szimulációs előellenőrzés, biztonságos tanítási stratégia	2. és 6. fejezet
Szabványi és kockázatelemzési keret	Mely követelmények alkalmazhatók, és hogyan értelmezhetők humanoid környezetben?	ISO 10218, ISO/TS 15066, ISO 13482, IEC 61508, dinamikus kockázatértékelés	2. és 4. fejezet
Társadalmi és etikai biztonság	Miként kapcsolódik a bizalom, az adatvédelem és az elfogadás a műszaki biztonsághoz?	Átlátható működés, kiszámítható viselkedés, magánszféra-védelem, emberközpontú tervezés	2. fejezet

2.2 Fizikai biztonság

A fizikai biztonság az ember-robot interakció egyik alapvető kérdése. Célja, hogy a robot mozgása és az esetleges fizikai kontaktus során csökkenthető legyen az emberi sérülés, valamint a környezetben és a robotban keletkező károk kockázata. Humanoid robotoknál ez különösen fontos, mert ezek a rendszerek nem elkülönített ipari térben, hanem emberrel megosztott, változó környezetben működnek. Emiatt a fizikai biztonság nem oldható meg egyetlen védelmi eszközzel, hanem több, egymásra épülő réteg együttes alkalmazását igényli [3, 8, 39]. A szerkezeti kialakítás oldaláról a láb- és karmodulok, valamint a kábelhajtású manipulátorok geometriája és merevségviszonyai közvetlenül befolyásolják a kontaktus dinamikáját [40, 41, 42].

A fizikai biztonságot számos tényező befolyásolja. Ide tartozik a robot tömege, tehetetlensége, sebessége, az aktuátorok és a kontaktusba kerülő felületek merevsége vagy rugalmassága, továbbá a kontaktus helye és lefolyása [KD2]. Ugyanilyen fontos a környezet is, például a szűk terek, az akadályok vagy az egyenetlen talaj. A humanoid robotok fizikai biztonsága ezért három fő védelmi rétegben értelmezhető: a veszélyes kontaktus megelőzésében, a kontaktus hatásának mérséklésében, valamint a kritikus hibák és vészhelyzetek kezelésében. Ennek logikáját a kapcsolódó 5. ábra szemlélteti [8, 43, 44]. Hasonlóan lényeges a kéz- és vég-effektor mechanizmusok engedékenysége, mert a fogás és a felületi érintkezés geometriája módosítja a sérülési kockázatot és a feladatteljesítést [45, 46, 47].

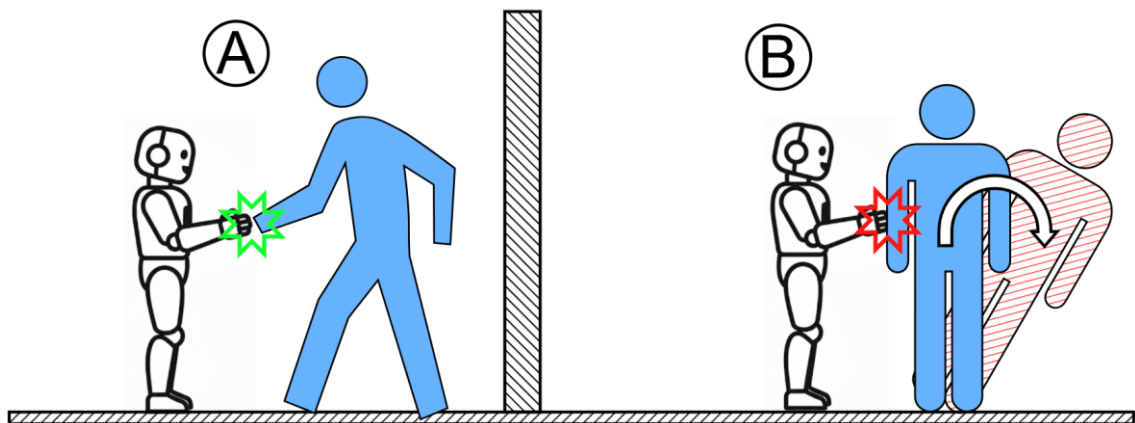


5. ábra: A humanoid HRI többrétegű fizikai biztonsági architektúrája.

2.2.1 Ütközésselkerülés, közelségérzékelés és mozgástervezés

A fizikai biztonság első szintje a veszélyes kontaktus megelőzése. Ennek alapja a környezet folyamatos érzékelése, az emberi jelenlét felismerése, a kockázatos helyzetek előrejelzése és a robot mozgásának ehhez igazított módosítása. Humanoid robotok esetében ez különösen összetett feladat, mert a teljes test mozgása, a sok szabadságfok és

a dinamikusan változó környezet egyszerre jelenik meg. Ez a probléma a 6. ábrán szemléltethető, amely egymás mellett mutatja be a biztonságos, szándékolt kontaktust (A) és a veszélyes, véletlenszerű ütközést (B) [8, 48, 49]. A klasszikusabb megközelítések között optimalizáló és heurisztikus pályatervezési eljárások is megjelennek statikus, dinamikus és zsúfolt környezetekre [50, 51, 52]. A korszerűbb humanoid rendszerek ezt vizuális és részben megfigyelhető környezetekre kidolgozott mozgástervezéssel, illetve online újra tervezéssel egészítik ki [33, 53, 54].



6. ábra: A kontaktus kockázatának értelmezése ember–robot megosztott térben: (A) alacsony kockázatú, feladatszerű kontaktus; (B) magas kockázatú, véletlenszerű ütközés.

A korszerű megközelítések többnyire hierarchikus biztonsági logikát alkalmaznak. Enyhébb veszély esetén a robot sebességet csökkent vagy pályát módosít, súlyosabb helyzetben pedig megszakítja a mozgást. Ebben a rétegben fontos szerepe van a külső látásalapú rendszereknek, a testen elhelyezett közelségérzékelőknek, valamint a több-érzékelős megoldásoknak is. A cél minden esetben az, hogy a robot még a kontaktus előtt felismerje a veszélyes helyzetet, és időben beavatkozzon [48, 49, 55]. A kockázaterzékeny navigáció adatbázisokra, mozgás kockázat reprezentációkra és speciális kinematikai korlátokra is támaszkodhat [27, 56, 57]. Gyors reakcióidejű vagy több szereplős helyzetekben a megerősítéses tanulású és szimbolikus koordinációt használó megoldások kerülnek előtérbe [58, 59, 60].

2.2.2 Engedékeny kialakítás és erőkorlátozás

Amennyiben a kontaktus nem kerülhető el, a következő védelmi szint feladata annak biztosítása, hogy az ütközés következményei a lehető legkisebbek legyenek. Ilyenkor az átadott mechanikai energia, az erőcsúcs és a lokális nyomás csökkentése válik

elsődlegessé [61, 62, 63]. A kontaktus előtti és alatti állapotbecslést a fejlett taktilis és integrált érzékelőrendszerek tovább erősítik [64, 65].

Ez megvalósítható aktív és passzív módon is. Az aktív megközelítésnél a szabályozás úgy alakítja a robot viselkedését, hogy külső erőhatásra ne mereven, hanem rugalmasabban reagáljon. A passzív megoldások a mechanikai felépítésből erednek, például lágy anyagok, rugalmas elemek vagy eleve engedékenyebb hajtások alkalmazásával. Ide sorolhatók a pneumatikus mesterséges izom hajtások alkalmazása is, amelyek a dolgozat szempontjából kiemelten fontosak. Ezek ugyan kedvezőbb kontaktusviselkedést adhatnak, de a biztonságtechnikai értékelésük nem egyszerűsíthető le arra, hogy kivitelükből adódóan biztonságosabbak. Az előterhelés, a nyomásállapot és a kontaktus lefolyása ugyanis érdemben befolyásolja az ütközés súlyosságát [61, 63, 66]. Az aktív erőkorlátozás oldaláról a humánszerű viselkedésgenerálás és a barrier-szemléletű tanuló szabályozás is ide sorolható [67].

2.2.3 Hibabiztos működés és eséskezelés

A legbelső védelmi réteg azokra a helyzetekre vonatkozik, amikor a megelőzés és a kontaktus hatásának mérséklése már nem elegendő. Ilyenkor a rendszernek fel kell ismernie a veszélyes állapotot, és a robotot biztonságos állapotba kell vezetnie. Ide tartoznak a vészleállítási megoldások, a hibatűró működés, az aktuátor és érzékelőhibák kezelése, valamint a stabilitásvesztéshez és az eséshez kapcsolódó eljárások [68, 69, 70]. Ilyen helyzetekben a biztonságos trajektóriagenerálás és a függvényekre épülő kooperatív irányítás is fontos eszköz [71, 72].

Humanoid robotoknál az esés önálló biztonságtechnikai kockázat. Nemcsak a robot szerkezetét károsíthatja, hanem közvetlen veszélyt jelenthet a közelben tartózkodó emberre is. Emiatt az instabil állapot korai felismerése, az esés előrejelzése és a kontrollált eséskezelés a fizikai biztonság fontos része. Ugyanez igaz a hardverhibákból és szabályozási rendellenességekből eredő veszélyes mozgásokra is. A rendszernek ilyenkor is képesnek kell lennie arra, hogy a további kockázatot csökkentse, és a működést biztonságos állapotba vigye [68, 73, 74]. Az esés- és egyensúlykezelési irodalom a támasztási problémáktól a járásgeneráláson át a robusztus gait-MPC-ig terjed [75, 76, 77].

Összességében a humanoid robotok fizikai biztonsága csak többrétegű megközelítésben értelmezhető. A veszélyes kontaktus megelőzése, a kontaktus hatásának mérséklése,

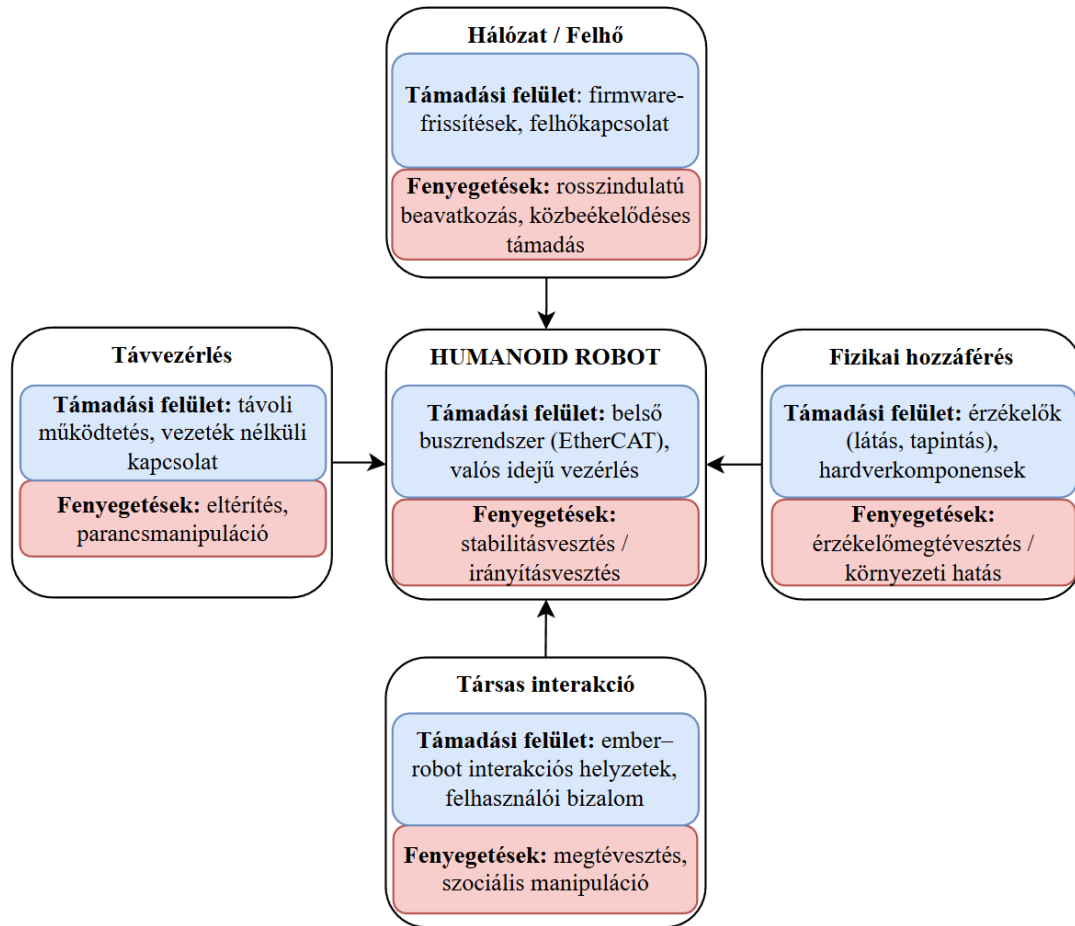
valamint a kritikus hibák kezelése nem egymást helyettesítő, hanem egymást kiegészítő feladatok. Ez is mutatja, hogy a humanoid robotok biztonságtechnikája nem vezethető vissza a hagyományos ipari robotcellák elhatárolásalapú logikájára, hanem ennél összetettebb mérnöki szemléletet igényel [3, 8, 79]. Ehhez kapcsolódnak a dinamikus neurális akadályelkerülési, önütközés-elkerülő mozgásátviteli és csúszós talajra hangolt pályatervezési eljárások [79, 80, 81]. A nagy mobilitású vagy hibrid megoldások között a transzformálható platformok, a folyamatos ugrómozgások és az utánzásalapú 3D mozgásvezérlés is megjelent [82, 83, 84].

2.3 Kiber-biztonság és szoftveres megbízhatóság

A humanoid robotok hálózati kapcsoltsága miatt a biztonság kiber-fizikai kérdéssé is vált. A kommunikációs csatornák, a távoli frissítések, a felhőkapcsolat és a beágyazott mesterséges intelligencia mind olyan pontok, ahol a szoftveres hiba vagy a rosszindulatú beavatkozás közvetlenül fizikai viselkedésként jelenhet meg [85, 86, 87]. A valós idejű kommunikációs és vezérlési architektúrák - különösen az IoT- és EtherCAT-alapú megoldások - közvetlenül befolyásolják a rendszer reakciókészségét és felügyeletét [88, 89, 90].

Humanoid környezetben ez különösen érzékeny probléma, mert a robot gyakran emberek közvetlen közelében, személyes adatokkal és társas szerepekkel összefonódva működik. Egy hibás parancs, elkésett frissítés vagy inkonzisztens állapotkezelés nem elvont informatikai esemény, hanem potenciális mozgásbiztonsági kockázat [86, 87, 91].

A tanuló és adatalapú megoldások ezt a kérdést tovább erősítik. A modellhibák, az érzékelési zaj, a hiányos tesztelés vagy a számítási hardver bizonytalanságai a döntési lánc részeivé válnak. Ezért a digitális iker, a szimulációs előellenőrzés és az anomáliaészlelés a humanoid robotnál nem kényelmi eszköz, hanem biztonsági szükséglet. A 7. ábra szemlélteti a lehetséges támadási felületeket [92, 93, 94]. A szoftveres megbízhatóságot ugyanakkor a hőterhelés és az adatvezérelt hibafelismerés is terheli [95, 96].

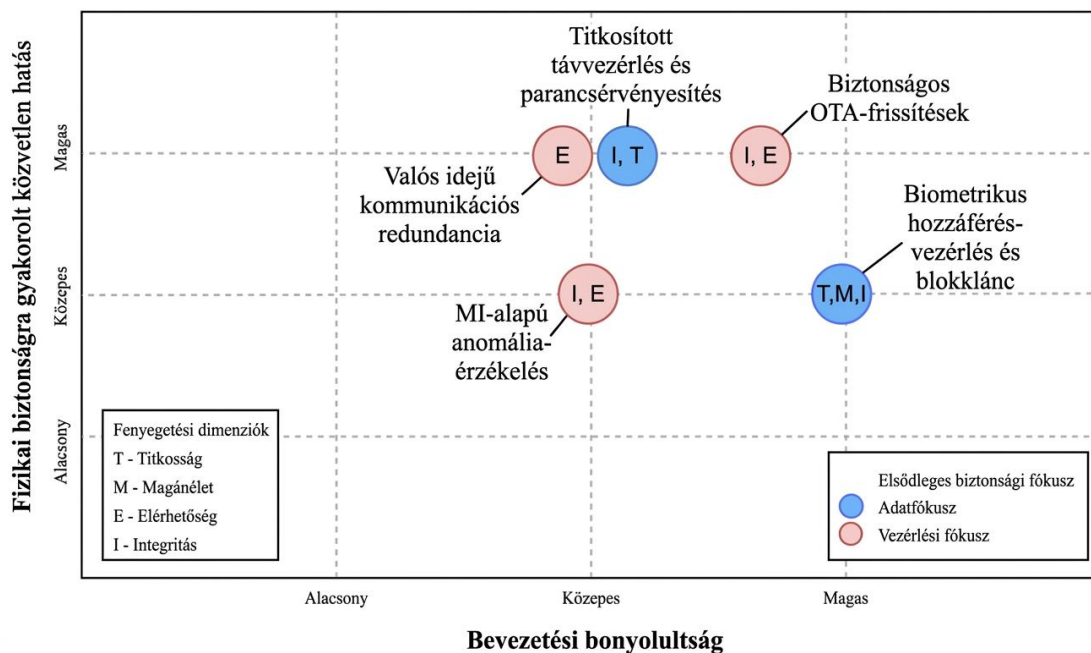


7. ábra: A kiber-fizikai fenyegetési felület szemléltetése

A hozzáférés-szabályozás, a titkosítás és a naplózhatóság ezért nem külön informatikai mellékszál. Amikor a robot biometrikus adatot kezel, felhasználói jogosultságot ellenőriz vagy nyilvános térben működik, ezek a funkciók a biztonságos üzem részévé válnak. Különösen kritikus a vezérlési és érzékelési adatok valós idejű továbbítása. Ha a belső kommunikáció késik vagy torzul, a legjobb biztonsági algoritmus sem tud időben reagálni. A távoli működtetés és a vezeték nélküli frissítés ugyanakkor elkerülhetetlen lehet bizonyos alkalmazásokban. E megoldások előnye csak akkor érvényesíthető, ha a parancsút, a hitelesítés és a frissítési folyamat védelme tervezetten épül be a rendszerbe. A szoftveres robusztusságot a környezeti és hardveroldali hatások is befolyásolják. Elektromágneses zavar, tápellátási ingadozás vagy hőmérsékleti szélsőség ugyanúgy döntési hibához vezethet, mint egy hibás szoftverkomponens. Különösen érzékeny pont a firmware-frissítési lánc, mert annak sérülése közvetlenül kihat a fizikai biztonsági funkciókra [97].

Ebből következően a humanoid robot biztonságtechnikája nem bontható szét élesen fizikai és digitális rétegre. A fejezet későbbi következtetései ezért a kiber-biztonságot nem külön területként, hanem az összes további eredmény mögötti feltételrendszerként kezelik.

A támadási felület a klasszikus hálózati támadásoknál tágabb. Nyilvános vagy félnyilvános terekben a társas manipuláció, a fizikai rongálás és a zavaró környezeti hatások is biztonsági kockázatot jelentenek, különösen azért, mert a humanoid megjelenés a felhasználóban fokozott bizalmat kelthet. Ezen kapcsolatok szemléltetésére a 8. ábra az áttekintett intézkedések közötti kompromisszumokat mutatja be. Az ábra alapján azok az intézkedések, amelyek elsősorban az elérhetőséget (E) és az integritást (I) helyezik előtérbe, rendszerint közvetlenebb hatással vannak a fizikai biztonságra (piros csomópontok). Ezzel szemben az adatközpontú megközelítések, például a biometrikus hozzáférés (kék csomópontok), bár a magánszféra védelme (M) és a bizalmasság (T) szempontjából kiemelten fontosak, gyakran nagyobb bevezetési összetettséggel járnak, miközben kevésbé közvetlen hatást gyakorolnak a közvetlen fizikai károk megelőzésére. Mindez arra mutat rá, hogy bár az adatvédelem a bizalom szempontjából elengedhetetlen, a fizikai kockázatok hatékony kezeléséhez a biztonságot és a védelmet kifejezetten erre a célra tervezett módon kell kialakítani [85, 86, 94].



8. ábra: A kiber-biztonsági intézkedések elemzése

Ez a kiber-fizikai nézőpont arra figyelmeztet, hogy a biztonságos működés nem kizárólag jó mozgásvezérlést, hanem hiteles adatutató, ellenőrzött szoftverfrissítést és megfelelő üzemeltetési fegyelmet is feltételez. A megbízható adatutató ezért egyre gyakrabban digitális ikerrel támogatott monitorozás és pontos robottest-kalibráció egészíti ki [98, 99].

2.4 Szabványok

A szakirodalmi áttekintés másik fontos eredménye, hogy a szabványosítás és a technológiai fejlődés között érzékelhető időbeli rés alakult ki. Az ipari és kollaboratív robotokra kidolgozott előírások továbbra is alapvető viszonyítási pontok, de a nagyfokú autonómiával, tanuló algoritmusokkal és hálózati integrációval működő humanoid rendszerekre csak részben alkalmazhatók közvetlenül [23, 100, 101]. Az ipari kollaboratív robotika tapasztalatai fontos kiindulópontot adnak, de a humanoid alkalmazások közvetlenül nem vezethetők le belőlük [KD3].

A szabványi megfelelést ezért nem egyszerű ellenőrző listaként, hanem alkalmazási mátrixként célszerű értelmezni, mint ahogy a 9. ábra mutatja. Más követelmények kerülnek előtérbe ipari anyagmozgatásnál, mások rehabilitációs vagy gondozási környezetben, és megint mások részben autonóm, társas szerepű humanoid robotnál [101, 103, 104]. A 2. táblázat szemlélteti a humanoid robotoknál figyelembe vehető fő szabványokat és azok szerepét.

2. táblázat: A humanoid robotoknál figyelembe vehető fő szabványok és szerepük

Szabvány	Elsődleges hatókör	Humanoid környezetben betöltött szerep	Fő korlát
ISO 10218-1	Ipari robotok tervezési és biztonsági követelményei	Kiinduló tervezési és funkcionális biztonsági alapelv	Nyitott, változó emberi környezetre csak részben illeszthető
ISO 10218-2	Robotalkalmazások és robotcellák integrációja	Rendszerintegrációs és munkahelyi kialakítási háttér	A hétköznapi, nem cellás humanoid környezetet nem fedi le teljesen
ISO/TS 15066	Kollaboratív robotműködés és biomechanikai határértékek	A kvázi-statisztikus és tranzienst kontaktus értelmezéséhez közvetlenül használható	Elsősorban kollaboratív ipari környezetre készült
ISO 13482	Személyi kiszolgáló robotok biztonsága	Nem ipari, emberközeli alkalmazásoknál különösen fontos hivatkozási alap	A nagy autonómiájú, tanuló humanoid rendszerekhez csak részben ad útmutatást
IEC 61508	Villamos, elektronikus és programozható rendszerek funkcionális biztonsága	A biztonságkritikus vezérlő- és felügyeleti láncok életciklus-szemléletét adja	Robot-specifikus ember-robot interakciós kérdéseket önmagában nem rendez

Biztonsági szabvány	ISO 10218-1/-2	Alapvető	Alapvető	Korlátozott	Korlátozott	Korlátozott
	ISO/TS 15066	Támogató	Alapvető	Korlátozott	Korlátozott	Korlátozott
	ISO 13482	Korlátozott	Támogató	Alapvető	Alapvető	Támogató
	IEC 61508	Támogató	Támogató	Támogató	Támogató	Támogató
		Ipari cella	Kollaboratív cella	Egészségügy	Otthoni / Idős gondozás	Közterületek
Alkalmazási terület						

9. ábra: A biztonsági szabványok alkalmazhatósági mátrixa a humanoid robotok alkalmazási területein.

Nem az a megállapítás, hogy a fizikai elhatárolás vagy a klasszikus kockázatelemzés értelmetlen volna, hanem az, hogy önmagában egyik sem elegendő. A humanoid robot biztonságát a fizikai biztonság, a kiber-biztonság és a szociálpszichológiai tényezők együttesen határozzák meg, ezért a hagyományos, statikus kockázatelemzésre és szeparációra épülő szabványi megközelítés a mindennapi környezetben csak részleges védelmet ad [3, 9, KD1].

A hagyományos kockázatelemzési módszerek jól strukturált ipari helyzetekre készültek. Humanoid környezetben azonban a változó emberi viselkedés, a szándékos és nem szándékos érintkezések keveredése, valamint a tanuló szabályozási elemek miatt a veszélyek nem minden esetben írhatók le előre rögzített eseményfákkal [KD9].

Ezért vált fontossá az adatalapú kockázati mintázatok azonosítása is. Az eseménysorok és baleseti leírások hálózatos elemzése segíthet abban, hogy a formális módszerek mögött valós üzemeltetési tapasztalatok is megjelenjenek. Az ipari és kollaboratív robotikában irányadó szabványok, a személyi kiszolgáló robotokra vonatkozó előírások, valamint a funkcionális biztonsági követelmények humanoid robotoknál nem külön-külön, hanem egymásra vetítve értelmezhetők [3, 9, 105].

A szabványi késés gyakorlati következménye az, hogy a mérnöknek gyakran hiányos vagy átfedő előírásokból kell működő biztonsági koncepciót alkotnia. Ez indokolja, hogy a dolgozat későbbi fejezetei nem egyszerű megfelelőségi ellenőrzésként, hanem tervezési kérdésként kezelik a kontaktusdetektálást, a reakcióidőt és a szabályozási stabilitást.

A szabványi és kockázatelemzési fejlődés következő lépése ezért várhatóan a klasszikus és az adatalapú megközelítések összekapcsolása lesz. A felelősen alkalmazható humanoid rendszerhez formális követelményekre, valós üzemeltetési tapasztalatokra és emberközpontú értelmezésre egyaránt szükség van.

2.4.1 Dinamikus kockázatértékelés és a szabványi átmenet mérnöki értelmezése

A humanoid robotok esetében a klasszikus, egyszeri kockázatértékelés csak korlátozottan használható, mert a kockázat forrásai időben változnak. A környezet, a feladat, az emberi közelség, a hálózati állapot és a robot döntési logikája egyaránt módosíthatja a veszélyességet. Emiatt célszerű a biztonságot nem egyszeri állapotként, hanem időfüggő rendszerjellemzőként kezelni [3, 9]

$$R_z(t) = w_p r_p(t) + w_c r_c(t) + w_n r_n(t) + w_h r_h(t), \quad \sum w_i = 1, \quad w_i \geq 0 \quad (2.2)$$

A (2.2) összefüggésben $R_{\Sigma}(t)$ az összesített kockázati mutató, w_p , w_c , w_n és w_h az egyes részrétegek súlyai, amelyek összege 1, $r_p(t)$ a fizikai, $r_c(t)$ a kiber-fizikai, $r_n(t)$ a normatív-szabványi, $r_h(t)$ pedig az emberi észleléshez és elfogadáshoz kapcsolódó kockázati részmutatót jelöli. A képlet nem abszolút veszélyszámot ad, hanem arra alkalmas, hogy a tervezés során megmutassa, melyik réteg válik dominánssá egy adott alkalmazási helyzetben. Humanoid környezetben ez azért lényeges, mert a tényleges veszély gyakran nem a legnagyobb mechanikai teljesítményből, hanem a részrendszerek kedvezőtlen együttes állapotából adódik.

A fizikai részmutató legegyszerűbb alakban az érintkezés valószínűségének és a biomechanikai súlyosságnak a szorzataként értelmezhető: $r_p(t) = P_{col}(t) \cdot S_{bio}(t)$. A kiber-fizikai részmutató ezzel analóg módon a hibás vagy kompromittált parancsút valószínűségét és annak mozgásbiztonsági következményét kapcsolja össze: $r_c(t) = P_{sw}(t) \cdot S_{ctrl}(t)$. A normatív részmutató egy megfelelőségi hiányfokként fogható fel, például $r_n(t) = 1 - C_{comp}(t)$, ahol $C_{comp}(t)$ a releváns követelmények teljesülésének normalizált mértéke. A humán részmutató a félreértett szándék, a bizalomvesztés vagy a magánszféra-sérelem valószínűségét köti a pszichológiai következményekhez. E felbontás gyakorlati haszna az, hogy ugyanazon robot különböző alkalmazásokban más és más domináns biztonsági szűk keresztmetszettel rendelkezhet [3, 9, 105].

A 2025-ben megjelent ISO 10218-1 és ISO 10218-2 szabványok azért fontosak, mert a korábbi ipari robotbiztonsági logikát korszerűbb rendszerintegrációs nézőponttal pontosítják, ugyanakkor továbbra is alapvetően ipari környezetre vannak optimalizálva [100,106]. Az ISO/TS 15066 változatlanul a kollaboratív érintkezés biomechanikai értelmezésének közvetlen forrása marad [23], míg a nem ipari, személyi kiszolgáló és segítő robotok esetén az ISO 13482 szolgál kulcsfontosságú viszonyítási keretként [101], [10]. A funkcionális biztonsági lánc, különösen a szoftveres felügyelet és a vészfunkciók területén, továbbra is az IEC 61508 életciklus-szemlélete adja a legfontosabb rendszerszintű háttérrel [104].

A mérnöki tervezés szempontjából ebből az következik, hogy a humanoid robotoknál nem egyetlen „fő szabvány” kiválasztása a helyes stratégia, hanem a követelmények mátrixszerű egymásra vetítése. A robot mechanikai és kollaboratív viselkedése az ISO 10218 és az ISO/TS 15066 logikájával, a személyes közelségben végzett szolgáltatási működés az ISO 13482 szemléletével, míg a szoftveresen vezérelt biztonsági funkciók az

IEC 61508 elvárásaival értelmezhetők együtt. Ez a többrétegű értelmezés indokolja, hogy a disszertáció későbbi fejezeteiben a detektálás, a mitigáció és a szabályozás nem izolált technikai részfeladat, hanem megfelelőségi jelentőségű tervezési kérdésként jelenik meg [23, 100, 104].

A szabványi környezetet tovább bonyolítja, hogy a tanuló algoritmusok és az autonóm döntési komponensek miatt a klasszikus gépbiztonsági logika egyre inkább kiegészítésre szorul robot és MI-szabályozási szempontokkal. A jelenlegi szakirodalom szerint nem elegendő azt vizsgálni, hogy a robot „nem ütközik-e”, hanem azt is, hogy döntései utólag rekonstruálhatók, korlátozhatók és felelősségi szempontból értelmezhetők-e [38]. Ez különösen ott válik hangsúlyossá, ahol a robot emberi szerepekhez közeli alkalmazásban működik.

$$S_{min} = v_{rel} \cdot T_{eff} + C \quad (2.3)$$

A (2.3) összefüggés a szabványi és a fizikai fejezeteket köti össze: a minimálisan szükséges biztonsági távolság S_{min} a relatív sebesség v_{rel} , a teljes védelmi reakciólánc T_{eff} ideje és a maradék biomechanikai, geometriai, mérési tartalékot összefoglaló C konstans függvénye. Humanoid robotoknál T_{eff} nem tekinthető pusztán névleges vezérlői adatnak, mert a valódi mechanikai tehermentesülési idő a szerkezet, a hajtás és a kontaktustípus függvénye. Ezt a későbbi fejezetben kísérletileg meghatározott reakcióidők teszik számszerűvé.

A szabványi átmenet mérnöki következménye tehát kettős. Egyrészt a tervezőnek explicit módon dokumentálnia kell, hogy mely funkció mely követelményrendszerre támaszkodik, másrészt a validációt nem egyszeri megfelelőségi eseményként, hanem életciklus-szemléletű, frissíthető biztonsági folyamattá kell alakítani. Humanoid robotoknál ez a szemlélet az egyik legfontosabb feltétele annak, hogy a műszaki biztonság, a szabványi megfelelés és a felhasználói bizalom ne váljon szét. A mérnöki tervezésben ezért az emberi szándékok egyértelmű kommunikációja sem pusztán felhasználói élménykérdés, hanem a kockázatsökkentés része [107].

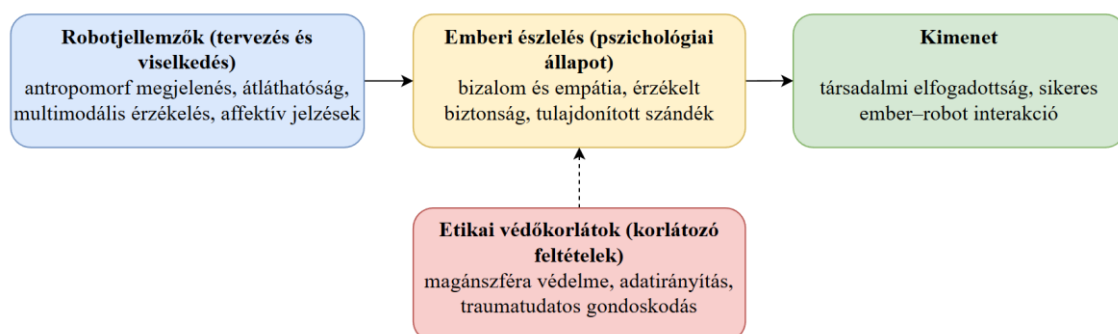
2.5 Bizalom, elfogadás és etikai szempontok

A humanoid robotoknál a biztonságnak szubjektív komponense is van. A felhasználó számára az a rendszer tekinthető biztonságosnak, amelynek viselkedése előre jelezhető, kommunikációja érthető, és adatkezelése nem kelt bizalmatlanságot [91, 108, 109]. A

felhasználói biztonságérzetet a szolgáltatási környezet és a korábbi tapasztalat is erősen alakítja, ezt mutatják a kiskereskedelmi és idősgondozási vizsgálatok [110, 111].

Az antropomorf megjelenés ebben kettős szerepet játszik. Egyrészt megkönnyíti a szándékok olvasását és a szerepek elfogadását, másrészt magasabb elvárást teremt a következetességgel és az érthetőséggel szemben [109, 112]. Az antropomorf megjelenéshez kapcsolódó fogyasztói és gyermeki reakciók különösen érzékenyek a formára és az előzetes információra [116].

Az idősgondozási, terápiás és oktatási példák azt mutatják, hogy a valós interakció után a robot megítélése gyakran kedvezőbbé válik, ha a rendszer türelmes, kiszámítható és egyértelmű visszajelzést ad. Ugyanakkor a kamera, a mikrofon és a folyamatos állapotkövetés miatt a magánszféra védelme végig központi kérdés marad. A társadalmi biztonság és bizalom fogalmi keretrendszerét a 10. ábra szemlélteti. Oktatási és társas interakciókban a történetmesélésre, oktatási platformokra és közös mozgásra épülő alkalmazások egyaránt alakítják az elfogadást [15, 117, 118].



10. ábra: A társadalmi biztonság és bizalom fogalmi keretrendszere

Ennek a szempontnak a dolgozat további részeire nézve különös jelentősége van. Ezért a második fejezetben a kontaktust nemcsak detektálni, hanem értelmezni is szükséges. A bizalom tapasztalatfüggő jelenség. Amennyiben a robot viselkedése következetes, a felhasználó rövid idő alatt megtanulja értelmezni a jelzéseit, ami közvetve a fizikai kockázatot is csökkentheti. A magánszféra védelme ezzel párhuzamosan biztonságtechnikai kérdéssé válik. Lakótérben vagy kórteremben működő humanoid robotnál a titkosítás, az anonimizálás és az átlátható adatkezelés az elfogadható működés része [91, 119]. A fizikai kontaktus nem minden esetben kedvezőtlen esemény, lehet affiliatív és társas jelentéssel bíró interakció is, ahogyan azt a simogató gesztusokat vizsgáló munkák mutatják [120].

A társas szerepben működő robotnál a pszichológiai biztonság ugyanúgy tervezési feladat, mint a fizikai. Kerülni kell a félreérthető, nyomasztó vagy túlzott kötődést kiváltó működést.

A multimodális interakció másik következtetése, hogy az ember nemcsak a mozgást, hanem a tekintetet, a testtartást és a visszajelzéseket is biztonsági jelként értelmezi. Ha a robot szándéka olvashatóbb, a felhasználó hamarabb tud megfelelően reagálni. A tekintet, az arckifejezés és az expresszív fejarchitektúrák szabályozása közvetlenül formálja az észlelt biztonságot [121, 122].

A társadalmi és etikai dimenzió ezért nem a technikai biztonság utólagos kiegészítése, hanem a rendszer része. A humanoid robotok akkor válnak bevezethetővé, ha a fizikai, digitális és társas biztonság egymást erősíti. [11, 12, 123] A kreatív és szolgáltatási felhasználások azt mutatják, hogy az etikai dimenzió mindig szerep- és kontextusfüggő [35, 124].

Az antropomorf forma hatása nem egyirányú. Bizonyos feladatoknál segíti az elfogadást, más helyzetekben viszont éppen a magasabb elvárás miatt növeli a csalódás esélyét.

Az oktatási és terápiás alkalmazások azt mutatják, hogy a kiszámítható, egyszerűsített és ismételhető viselkedés egyszerre támogatja a részvételt és a biztonságérzetet. Ebből a szempontból a biztonság a felhasználói célhoz igazított viselkedés minőségeként is értelmezhető. Gyermekkel vagy neurodiverz felhasználókkal végzett vizsgálatokban a szelektív bizalom, a társas tanulás és az interakció élettani nyomainak értelmezése különösen meghatározó [13, 36, 125].

2.6 Integrált értelmezés és részösszegzés - H1

A fejezetben bemutatott eredmények alapján a H1 hipotézis igazoltnak tekinthető. A humanoid robotok biztonsága nem írható le kizárólag a hagyományos, statikus kockázatértékelési módszerekre épülő szabványi keretben, mert a nyílt, dinamikus és emberközeli környezetekben a veszélyforrások egyszerre fizikai, kiber-biztonsági és szociálpszichológiai természetűek.

A szabványi környezet ugyan megadja a kiinduló pontokat, de a humanoid rendszerek valós alkalmazási közege olyan összetettséget mutat, amely integrált megközelítést igényel. Ebből következik, hogy az ütközésetektálás, a reakcióidő, a vezérlési robusztusság és az AI-rendszerek biztonságos betanítása nem elkülönült részfeladat, hanem ugyanannak a többdimenziós biztonsági problémának az eleme.

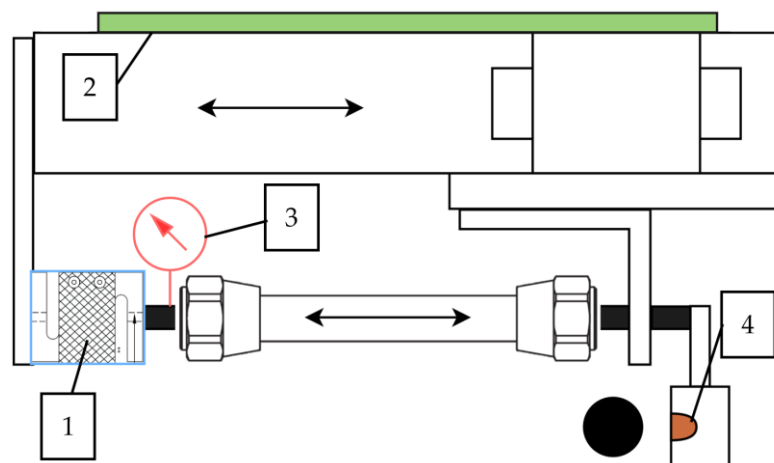
3 ÜTKÖZÉSEDETEKTÁLÁS ÉS PROFILALKOTÁS SZENZORFÚZIÓVAL

Ez a fejezet a kontaktuskezelés érzékelési oldalát tárgyalja. A cél annak bemutatása, hogy az eltérő biomechanikai kockázatú kontaktusok több mérőcsatorna együttes értelmezésével elkülöníthetők. A saját fejlesztésű mérési rendszeren vizsgálom a kvázi-statisztikus és tranziens kontaktusok felismerhetőségét.

3.1 Mérőrendszer és kísérleti protokoll

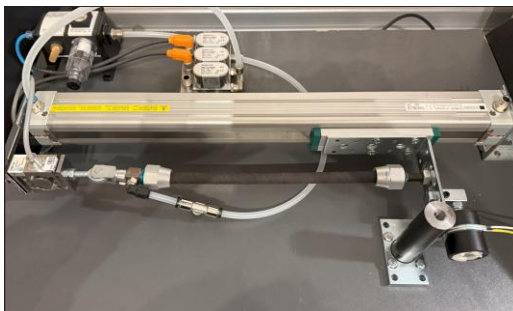
A mérőrendszer egy pneumatikus mesterséges izommal működtetett, egyszerűsített humanoid ízületet reprezentál. Az egyszerűsített modell kialakításának elsődleges célja annak bemutatása volt, hogy egy pneumatikus mesterséges izommal működtetett, egyszerű mechanikai rendszeren milyen módszerek lehetnek alkalmasak az ütközési jelleg meghatározására. További tervezési szempontként jelent meg a költséghatékonyság és az egyszerű megvalósíthatóság. A rendszer egy pneumatikus körből, az ahhoz kapcsolódó érzékelőkből, valamint ezek villamos vezérlő áramköréből áll, amit a 11. ábra szemléltet [KD4].

A vizsgálatok tárgyát képező aktuátor egy 250 mm hosszú, „Festo MAS-10-40N-AA” típusú pneumatikus mesterséges izom. Ez az elem 0,8 MPa nyomáson összesen 25%-os összehúzódásra képes. A pneumatikus mesterséges izom egy 32 mm átmérőjű, dugattyúrúd nélküli „Hafner PLF32” típusú munkahengerre került felszerelésre, amely biztosítja a szükséges ellen erőt, és lehetővé teszi a mérésekhez szükséges statikus terhelési állapot szimulálását. A két pneumatikus egység vezérlését egy-egy „AVENTICS™ Series ED02” típusú arányos szelep valósítja meg.

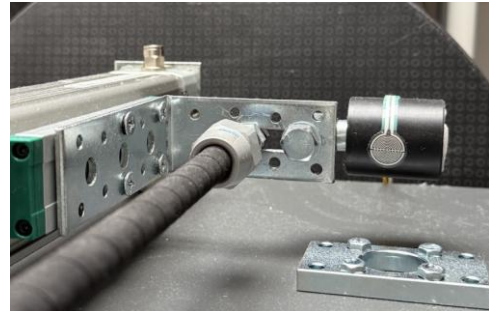


11. ábra: Mérési elrendezés

A 11. ábra megmutatja a rendszerben elhelyezett érzékelők elrendezését is. Az elvégzett mérések két fő kérdésre irányultak. Az egyik az volt, hogy az egyes érzékelők alkalmasak-e annak eldöntésére, hogy az adott kontaktus kvázi-statisztikus vagy tranziens jellegű. A másik kérdés az volt, hogy mely érzékelők használhatók az ütközési jelleg meghatározására. Az 1-gyel jelölt „S9M/1kN” típusú precíziós erőmérő cella a PMI elé, gömbcsuklós kapcsolaton keresztül került beépítésre. A 2-vel jelölt következő érzékelő egy „Rexroth SM6-AL” típusú analóg útmérő szenzor, amely a munkahengerre van felszerelve, és a dugattyú helyzetén keresztül segíti a mesterséges izom összehúzódásának meghatározását. A 3-mal jelölt érzékelő egy „Festo SPT-571484” típusú analóg nyomástávadó. A 4-gyel jelölt „Legact FSR RP-C18,3-LT” típusú erőérzékeny ellenállás közvetlenül az ütközés detektálására szolgál.



(a)

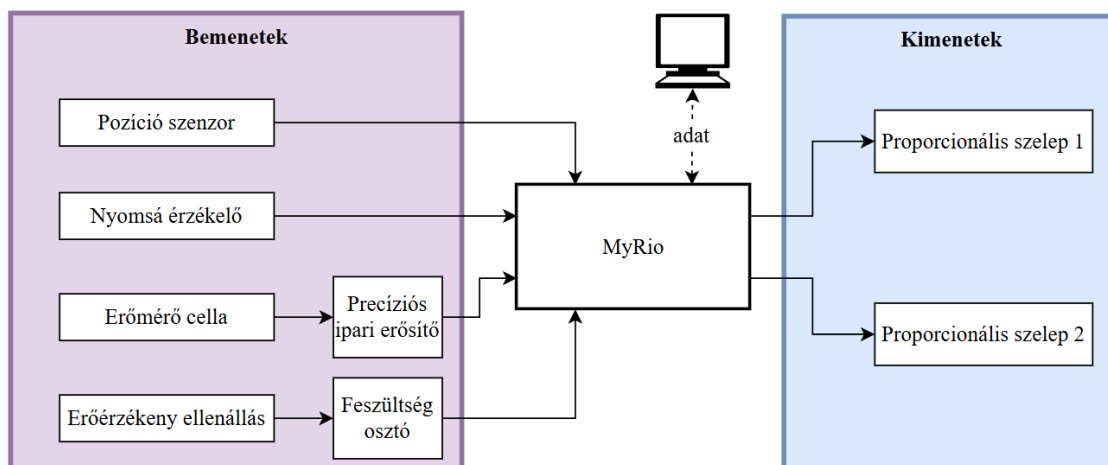


(b)

12. ábra: Mérőrendszer. (a) Az összeszerelt mérőrendszer képe; (b) Ütközőfelület az érzékelővel.

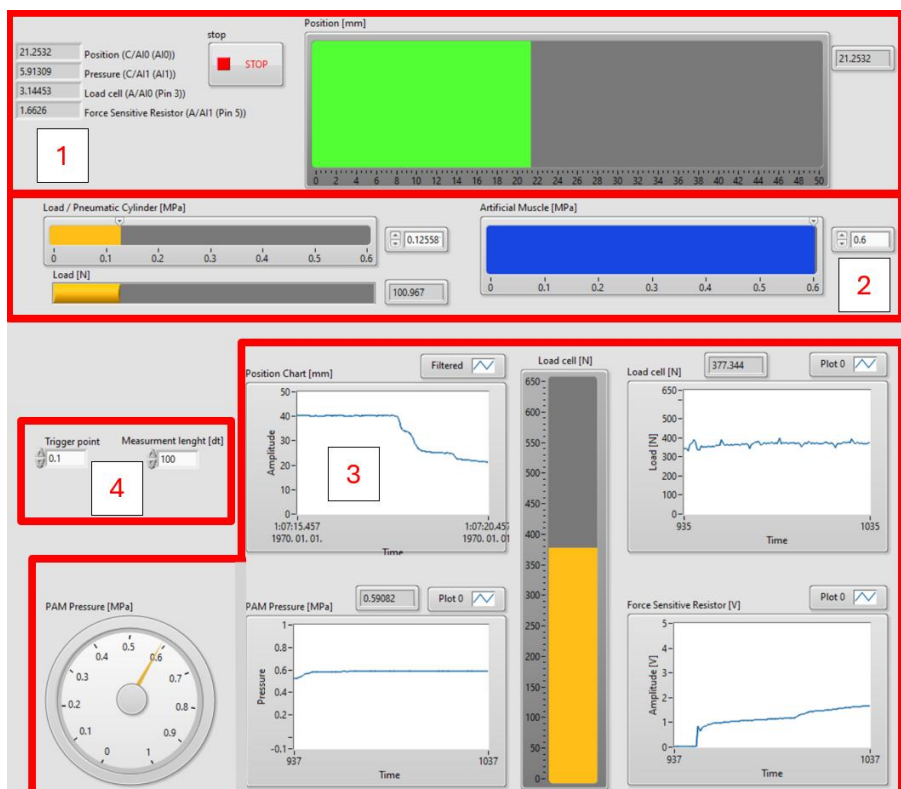
A 12. ábrák a megépített mérőrendszer fényképeit mutatják be. Az érzékelők vizsgálatához és a nagyszámú mérés elvégzéséhez egy 600 g tömegű, befogható acélhengert választottam, amely a mérési módoknak megfelelően mereven rögzíthető, illetve szabadon elmozduló állapotban is alkalmazható, ahogyan azt a 12.a és 12.b ábra szemlélteti.

A vezérlés központi eleme egy NI myRIO-1900 típusú vezérlőegység. Ez az egység hármas feladatot lát el. Egyrészt feldolgozza és átalakítja a beérkező mérőjeleket, másrészt kimenetein keresztül vezérli az arányos szelepeket, harmadrészt pedig a mért adatokat rögzíti és továbbítja a számítógép felé. A rendszer feszültségillesztése laboratóriumi tápegység és egyszerű áramköri elemek alkalmazásával valósult meg. A rendszer be- és kimeneti kapcsolatait a 13. ábra szemlélteti.



13. ábra: A rendszer be- és kimeneti kapcsolatai

A vezérlőszoftver a LabVIEW programkörnyezetben készült, felépítését a 14. ábra mutatja. A vezérlés úgy lett kialakítva, hogy az ütközés pillanatának érzékelésekor egy előre beállított hosszúságú adatszakaszt mentsen el. A szükséges vezérlő és megjelenítő elemek az ábrán négy fő részre tagolódnak. A kezelőfelület első része a szenzoradatokat, egy leállítógombot, valamint a munkahenger helyzetét megjelenítő oszlopot tartalmazza. A második részben a sárga csúszka segítségével állítható be az előterhelés MPa mértékegységben, miközben az előterhelés értéke N-ban is megjelenik. A kék oszlop a pneumatikus mesterséges izom nyomásának beállítására szolgál MPa mértékegységben. A rendszer maximális nyomása 0,6 MPa értékre lett beállítva, ezért a vizsgálatok ezen a nyomásszinten történtek.



14. ábra: LabVIEW felhasználói felület

A harmadik jelölt részben a mérési adatok grafikus megjelenítése látható különböző diagramok és vizualizációs elemek segítségével. A negyedikként jelölt rész tartalmazza a triggerpont beállítására szolgáló változót. Ez az a terhelési érték, amelyet az erőérzékeny ellenállás érzékelőn mérve a rendszer a mérés kezdetének, vagyis az ütközés pillanatának tekint. A másik változó a mintavételezési idő beállítására szolgál, amely a jelenlegi konfigurációban 10 ms mintavételi időnek felel meg.

A mérések elvégzéséhez a 3. táblázatban összefoglalt vizsgálati eseteket határoztam meg.

3. táblázat: Mérési esetek különböző előterhelési szinteken

Sorszám	Kvázi-statisztikus kontaktus	Tranziens kontaktus
1	0 N	0 N
2	10 N	10 N
3	50 N	50 N
4	150 N	150 N
5	200 N	200 N

A kvázi-statisztikus ütközési eset azt jelenti, hogy a fémhenger a rendszerben rögzített állapotban volt, és az ütközés ebben a befogott helyzetben következett be. Ezzel szemben

tranziens ütközés esetén a rendszer lehetővé tette a rúd elmozdulását, illetve eltolását [KD4].

Valamennyi mérés az ütközés pillanatára illesztve történt, ami a későbbi fejlesztések során lehetővé teszi, hogy a rendszer válasza közvetlenül a detektálási időponthoz legyen kapcsolható. Minden vizsgálati esetben 10-10 mérést végeztem, 10 ms mintavételi idővel és 1 s mérési időtartammal. A négy érzékelő mindegyikének mérési adatait külön-külön tároltam annak érdekében, hogy a kiértékelés és az összehasonlító elemzés egyértelműen elvégezhető legyen.

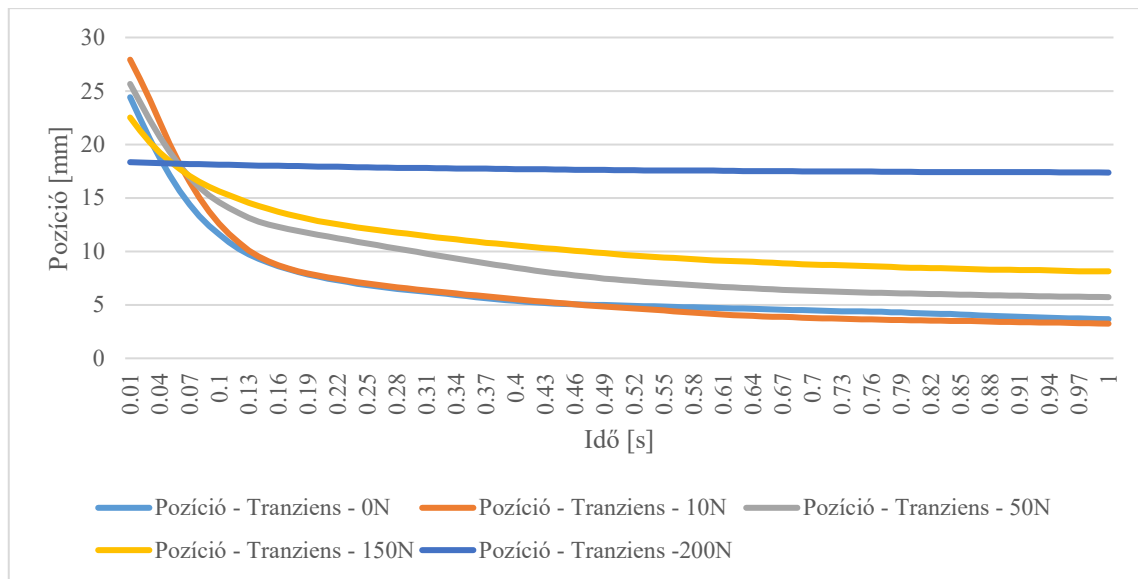
3.2 Kvázi-statikuss és tranziens kontaktus összehasonlítása

Az egyes vizsgálati esetekhez tartozó mérési eredményeket összefoglaló táblázatosan értékeltem. Mint korábban említettem, minden esetben 10-10 mérés történt. Az alábbi diagramok ezen méréseknek az átlagértékeit szemléltetik.

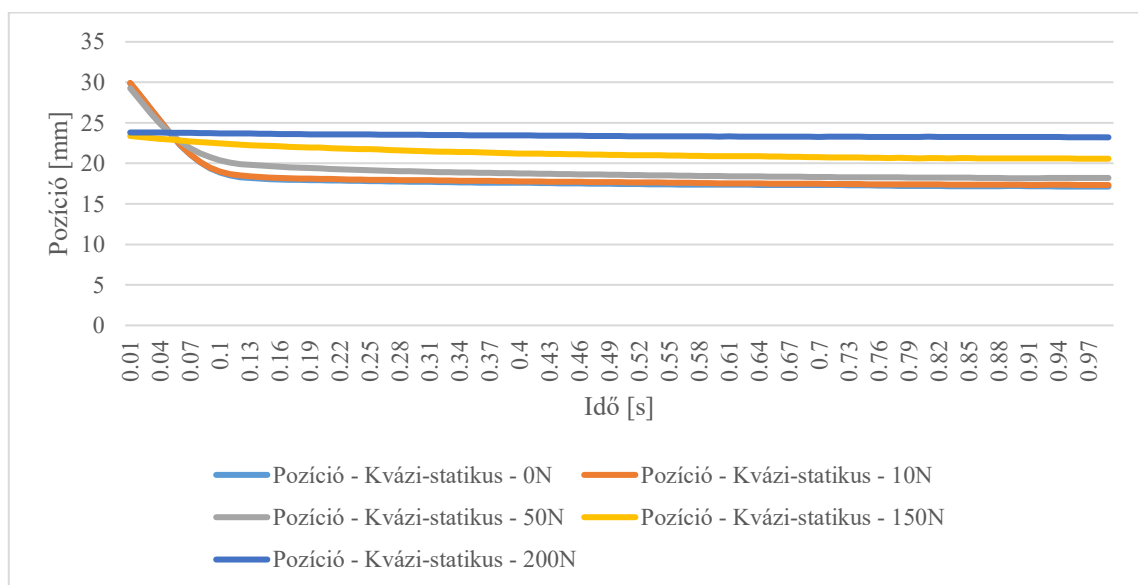
A pozícióváltozás adatai a 15. és 16. ábrán láthatók. A tranziens és a kvázi-statikuss esetek összehasonlításából jól megfigyelhető, hogy a két ütközési profil közötti különbség egyértelműen kirajzolódik. Kvázi-statikuss esetben a helyzetváltozás viszonylag szűk tartományban marad, mivel az előterhelés megnyújtja a PMI-t, és emiatt a megtett út nagysága az előterheléssel arányosan változik. Tranziens esetben ezzel szemben a rendszer közel a teljes úthosszon képes elmozdulni.

Mindkét esetben külön kiemelendő a 200 N előterhelésnél mért érték. Ezen a terhelési szinten a PMI ebből a már megnyújtott állapotból gyakorlatilag alig képes elmozdulni, illetve gyorsulni. Ez a jelenség a többi érzékelő mérési eredményeiben is megfigyelhető.

Összességében azonban a helyzetérzékelő eredményei alapján az látható, hogy ütközési határhelyzet közelében pusztán a pozíciójel alapján nem lehet egyértelműen elkülöníteni az ütközés típusát, mivel tranziens esetben az értékek állandósult jellegűek.

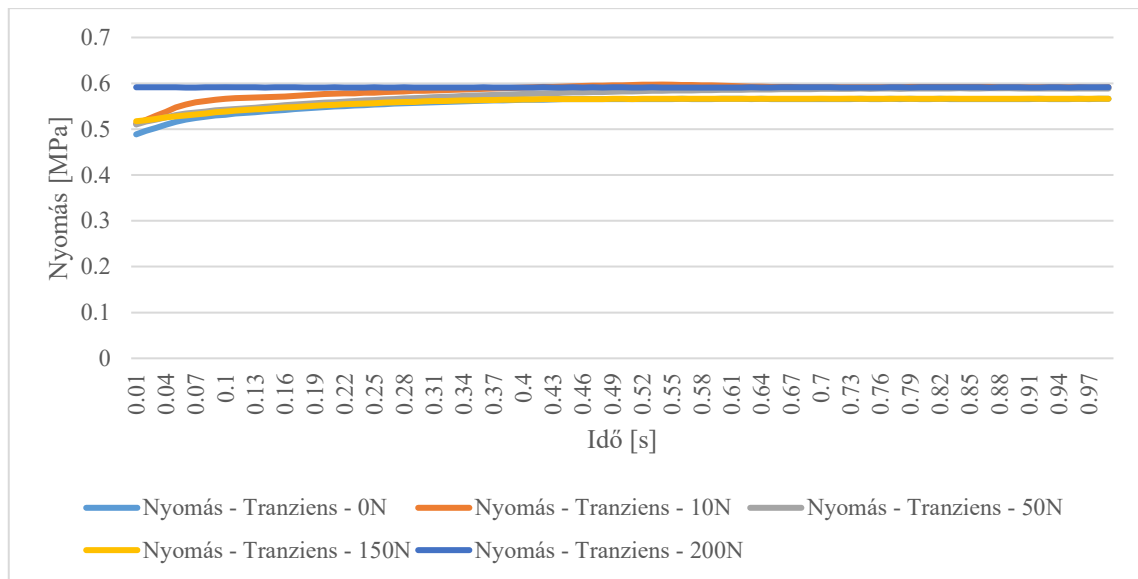


15. ábra: A pozíciómérés eredményei: A PMI összehúzódása az idő függvényében tranziens ütközés esetén

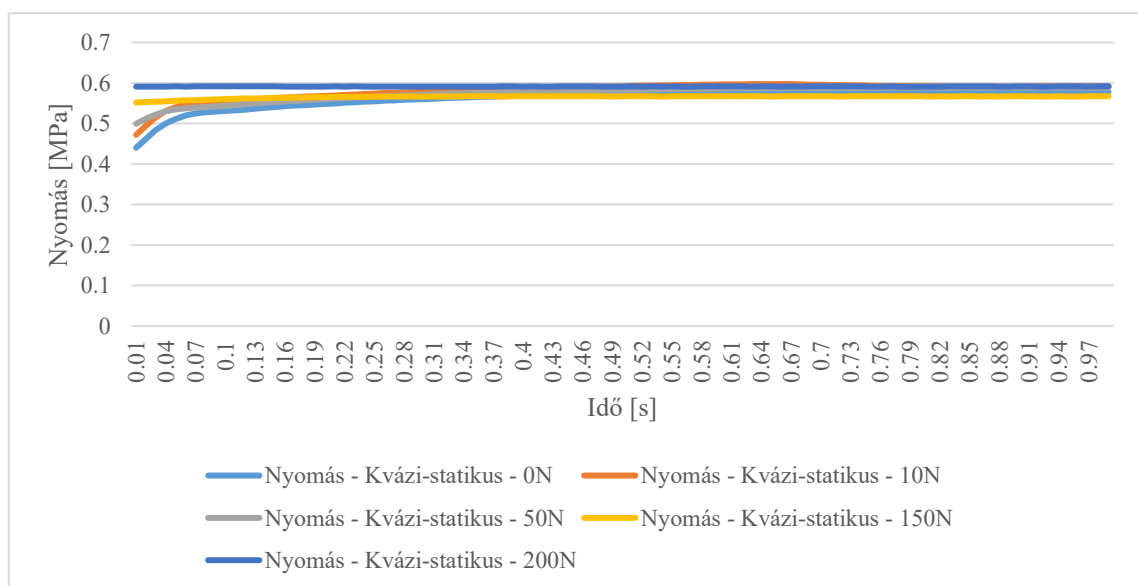


16. ábra: A pozíciómérés eredményei: A PMI összehúzódása az idő függvényében kvázi-statisztikus ütközés esetén.

A 17. és 18. ábra a mesterséges izomban fellépő nyomásváltozást mutatja az ütközés időtartama alatt. Jól látható, hogy a mesterséges izomban mért nyomásértékek alapján nincs jelentős különbség az egyes ütközési esetek között. A vizsgált nyomástartományban és üzemi körülmények között lényegében csak az állapítható meg, hogy a rendszer minden esetben elérte a beállított 0,6 MPa nyomásszintet.

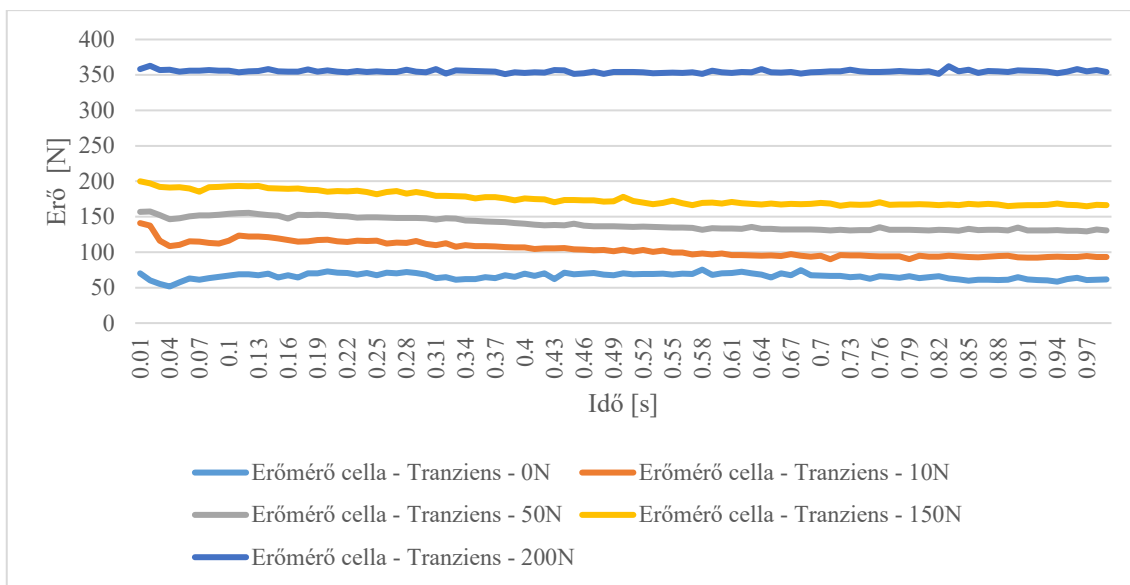


17. ábra: A nyomásmérés eredményei: A PMI nyomásváltozása az idő függvényében tranziens ütközés esetén

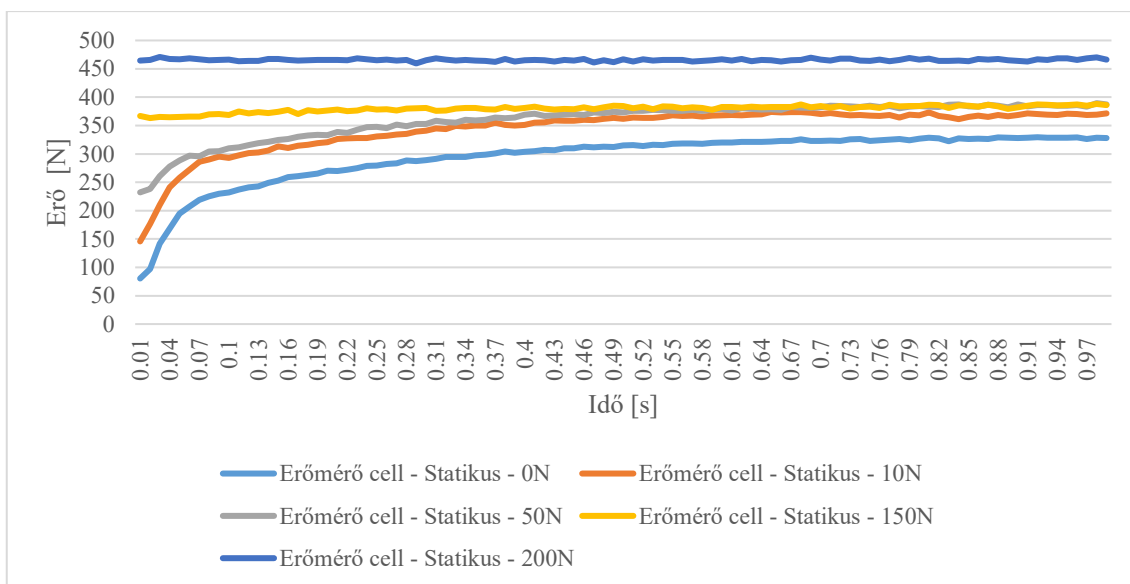


18. ábra: A nyomásmérés eredményei: A PMI nyomásváltozása az idő függvényében kvázi-statisz ütközés esetén.

A 19. és 20. ábra az erőmérő cella értékeinek időbeli alakulását szemlélteti. Ebben az esetben a két ütközéstípus közötti különbség egyértelműen látszik. Mivel a mérés az ütközés pillanatában indul, tranziens esetben az erőmérő cellán már az állandósult válasz figyelhető meg, és az előterhelési szintek jól elkülönülnek. Kvázi-statisz esetben ezzel szemben az erő időben növekvő görbéi rajzolódnak ki.

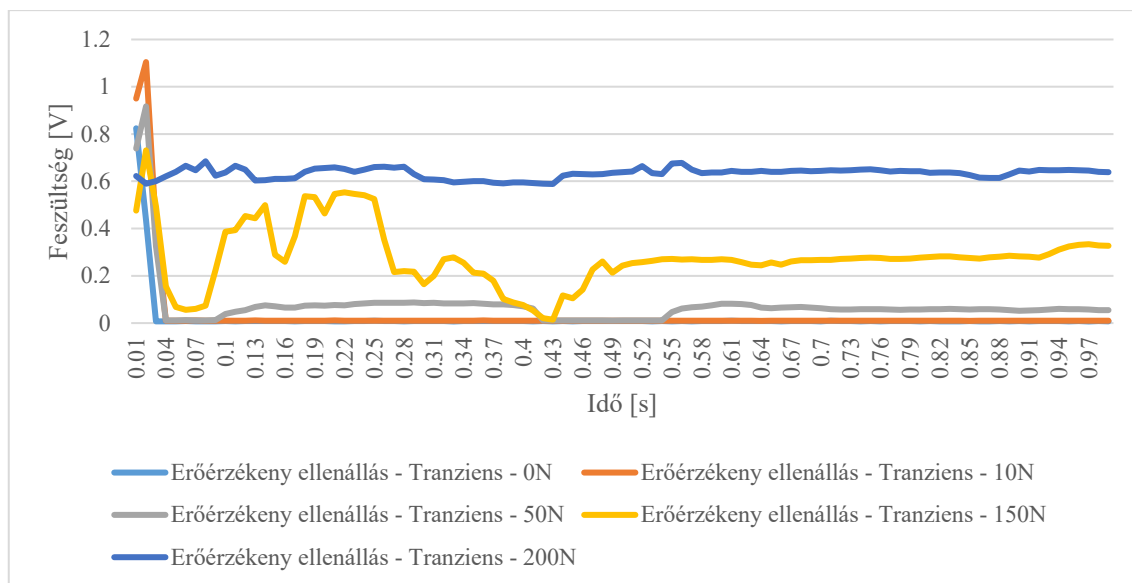


19. ábra: Az erőmérő cella mérési eredményei: A PMI által kifejtett erő az idő függvényében tranziens ütközés esetén

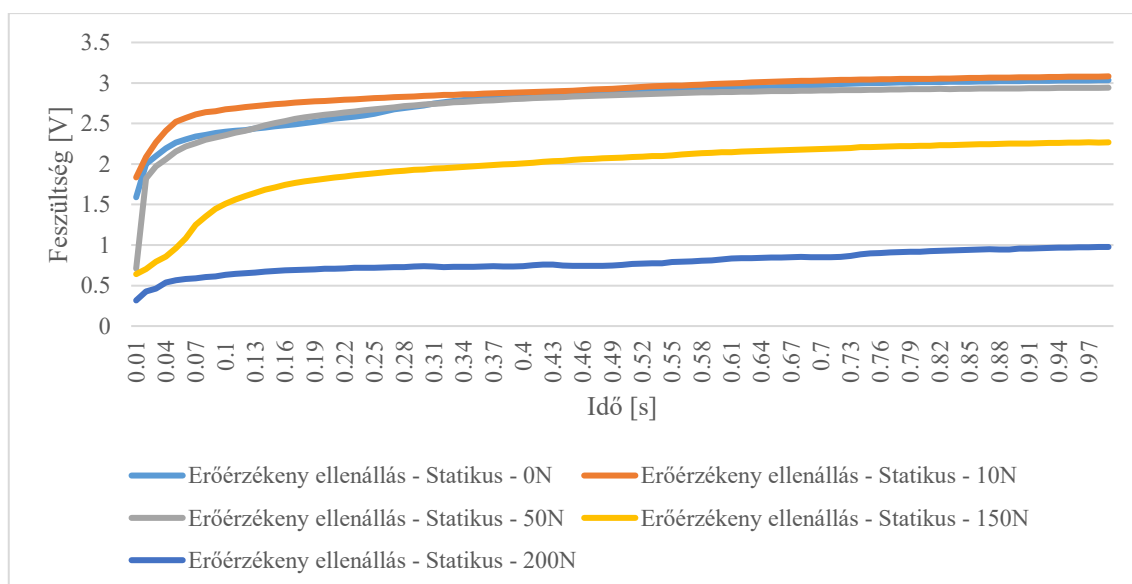


20. ábra: Az erőmérő cella mérési eredményei: A PMI által kifejtett erő az idő függvényében kvázi-statisztikus ütközés esetén.

A 21. és 22. ábra az erőérzékeny ellenállás időbeli válaszát mutatja az ütközési felületen fellépő erőhatásra. Az eredményekből első ránézésre is megállapítható, hogy a kisebb erőhatások miatt a diagramról leolvasott feszültségértékek tranziens ütközés esetén csekélyebb mértékben változnak.



21. ábra: Az erőérzékeny ellenállás mérési eredményei: A PMI feszültségválasza az idő függvényében tranziens ütközés esetén



22. ábra: Az erőérzékeny ellenállás mérési eredményei: A PMI feszültségválasza az idő függvényében kvázi-statisz ütközés esetén.

Érdemes megvizsgálni az erőmérő cella és az erőérzékeny ellenállás közötti korrelációt is, mivel utóbbi lényegesen költségkímélőbb megoldást jelenthet a precíziós erőmérő cellához képest. A két érzékelő értékei közötti korrelációt a 4. táblázat mutatja.

4. táblázat: Pearson-féle korrelációs együtthatók az erőmérő cella és az erőérzékeny ellenállás értékei között

Előterhelés	Kvázi-Statikus korreláció	Tranziens Korreláció
0 N	0,97	0,11
10 N	0,97	0,46
50 N	0,95	0,26
150 N	0,9	0,36
200 N	-0,07	-0,03

A 4. táblázat alapján megállapítható, hogy kvázi-statisztikus ütközés esetén a két érzékelő között nagyfokú lineáris kapcsolat figyelhető meg. Transziens ütközés esetén a korreláció lényegesen gyengébb. Nagy előterhelés mellett a PMI mozgása korlátozottá válik, ami csökkentheti a jelalakok elkülöníthetőségét.

3.2.1 Szenzorfüziós döntési logika és jellemzőtér

A 3. fejezet mérési eredményei azt mutatják, hogy önmagában egyik szenzor sem ad teljes képet a kontaktus természetéről. A pozíciójel a mozgástartalékokat, a nyomásjel az aktuátor belső állapotát, az erőmérő cella a globális mechanikai terhelést, az FSR-felület pedig a lokális érintkezés létrejöttét tükrözi. A kontaktustípus minősítéséhez ezért célszerű közös jellemzőteret definiálni [6,134].

$$z = [F_{peak}, \dot{F}_{peak}, \Delta x, \Delta p, r_{FSR-F}, F_{pre}]^T \quad (3.1)$$

A (3.1) vektorban F_{peak} az első erőcsúcs, $\dot{F}_{peak}$ a korai meredekség, Δx a rendelkezésre álló elmozdulás, Δp a nyomásváltozás, r_{FSR-F} az FSR és az erőmérő cella közötti korreláció, F_{pre} pedig az előterhelésből adódó alapvonalis erő. Az így felírt jellemzőtér nemcsak a csúcsterhelést, hanem a kontaktus kialakulásának mechanikai környezetét is kifejezi.

$$\hat{z}_i = \frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i + \varepsilon} \quad (3.2)$$

A (3.2) normalizálásban $\hat{z}_i$ a standardizált i -edik jellemző, z_i az eredeti jellemzőérték, μ_i a mintaátlag, σ_i a mintaszórás, ε pedig numerikus regularizáló tag. A normalizált $\hat{z}$ vektor azért hasznos, mert a különböző mértékegységű jellemzők közös döntési felületre vihetők. Kis mintaszámú, mérnökileg interpretálható esetben a teljes gépi tanulási osztályozó helyett célszerű egyszerű, transzparens pontszámot képezni.

$$g(\hat{z}) = w^T \hat{z} + b \quad (3.3)$$

A (3.3) döntési függvényben $g(\hat{z})$ az osztályozási pontszám, w a súlyvektor, b az eltolási tag, a pozitív tartomány a kvázi-statisztikus, a negatív a tranzienst kontaktus felé tolja az osztályozást. A jelen mérési eredmények alapján a legnagyobb szétválasztó erőt a korrelációs és az elmozdulási jellemzők adják. A 0-150 N tartományban kvázi-statisztikus ütközésnél az FSR-erő korreláció 0,93 körüli vagy afölötti, míg tranzienst esetben lényegesen alacsonyabb, tipikusan 0,11-0,46 tartományban marad. Ez alapján természetes, mérnökiileg jól értelmezhető küszöbnek adódik egy körülbelül $r_{thr} \approx 0,65$ határérték, amely fölött a kontaktus inkább kvázi-statisztikusnak, alatta inkább tranzienstnek tekinthető, feltéve, hogy a mozgástartalék nem került telítés közelébe.

$$\eta_x = \frac{\Delta x}{\Delta x_{free}} \quad (3.4)$$

A (3.4) összefüggésben η_x a relatív mozgástartalék, Δx a ténylegesen rendelkezésre álló elmozdulás, Δx_{free} pedig a szabad úthossz. A relatív mozgástartalék azt fejezi ki, hogy a szabad úthossz mekkora hányada maradt még elérhető a kontaktus után. Amennyiben η_x kicsi, a rendszer a befogásszerű, kvázi-statisztikus viselkedés felé tolódik, nagy η_x esetén a tranzienst, visszarúgással járó kontaktus valószínűbb. A 200 N előterhelésnél mért torzult jelalakok éppen azt mutatják meg, hogy telített állapot közelében ez a relatív mozgástartalék kritikusan lecsökken, ezért a kizárólag korrelációra épülő döntés már nem megbízható.

3.2.2 Mérési bizonytalanságok és döntési küszöbök

A szenzorfüzítés döntés gyakorlati értéke nemcsak a küszöbben, hanem annak bizonytalanságában rejlik. A mért jellemzők szórása és az érzékelők eltérő dinamikája miatt célszerű a döntési függvény körül elutasítási sávot definiálni. Lineáris közelítésben a döntési bizonytalanság a jellemzővektor kovariancia-mátrixából becsülhető [6].

$$\sigma_g^2 = J_g \Sigma_z J_g^T \quad (3.5)$$

A (3.5) összefüggésben σ_g^2 a döntési pontszám becsült varianciája, J_g a döntési függvény Jacobi-mátrixa, Σ_z pedig a jellemzők becsült kovariancia-mátrixa. Ha $|g(\hat{z})| < \delta$, akkor a kontaktus típusa nem minősíthető kellő biztonsággal, és célszerű konzervatív reakciót alkalmazni: gyors védelmi beavatkozást indítani, miközben a részletes kontaktusprofil-becslést második lépcsőben, hosszabb időablakon végezzük el. Ez a döntési architektúra jól illeszkedik a biztonságtechnikában ismert „gyors észlelés - részletes validálás” logikához.

A szakirodalomban az online ütközésazonosítás egyre inkább többcsatornás, döntésméleti keretben jelenik meg. Felügyelt tanulás és Bayes-döntés kombinációjával 20 ms alatti azonosítás is megvalósítható [6], míg a látás- és tapintásalapú multimodális rendszerek már a szándékos és véletlen kontaktusok szétválasztását is lehetővé teszik [126]. A jelen mérőrendszer fő tudományos hozadéka ebben az összefüggésben az, hogy alacsonyabb komplexitású laborplatformon mutatja meg: a kontaktustípus osztályozásához nem feltétlenül a legdrágább szenzor a kritikus, hanem a gyors kontaktusdetektálás, a korrelációs információ és a mozgástartalék együttes értelmezése.

A mérési eredmények alapján az FSR-jel elsősorban gyors kontaktusjelző csatornaként értelmezhető. A mennyiségi erőbecsléshez az erőmérő cella vagy más mechanikai visszacsatolás szükséges. Az előterhelést a döntési logikában külön állapotváltozóként kell kezelni, mert egyszerre befolyásolja az ütközés súlyosságát és a kvázi-statisztikus/tranziens jelalakok elkülöníthetőségét. Ez a szenzorfüziós szemlélet adja a H2 hipotézis módszertani erősítését.

3.3 A H2 hipotézis igazolása

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a kvázi-statisztikus és a tranziens ütközések jellemzői pneumatikus mesterséges izomra épülő rendszerben tendenciaszerűen elkülöníthetők, és a szenzorfüziós kiértékelés ígéretes alapot ad online kontaktusosztályozáshoz. Ez a megközelítés a humanoid biztonságtechnikája szempontjából különös jelentőséggel bír. Az erőszensorok és az erőérzékeny ellenállás elvén működő szenzorok közötti korrelációvizsgálat azt jelezte, hogy az alacsonyabb költségű erőérzékeny ellenállás-szenzorok egyes esetekben használható alternatívát jelenthetnek a precíziós erőmérő cellákkal szemben. Ugyanakkor nagy előterhelés mellett a pneumatikus mesterséges izom mozgásképesége korlátozott volt, ami rontotta az ütközési jelalakok megbízhatóságát. Az így nyert eredmények jó alapot adhatnak egy ilyen jelzésekre épülő biztonsági reakció kidolgozásához. Az eredmények alapján a pneumatikus mesterséges izommal működtetett rendszerek humanoid robotikai alkalmazásokba történő integrálásánál indokolt szenzorfüziós megoldások alkalmazása, különösen olyan környezetekben, ahol a gyors reakció és az ember-robot interakció meghatározó szerepet kap [KD4]. A H2 hipotézis a vizsgált előterhelési és mérési tartományban igazoltnak tekinthető.

4 A PNEUMATIKUS MESTERSÉGES IZMOK VÉDELMI REAKCIÓDINAMIKÁJA

A fejezet célja annak bemutatása, hogy pneumatikus mesterséges izmokkal működtetett humanoid ízületben a kontaktusdetektálást, a mechanikai tehermentesülést és a nyomáskiegyenlítődést különböző időléptékű folyamatok határozzák meg. Ebben a fejezetben azt is vizsgálom, miként módosítja az előterhelés az ütközés súlyosságát [20, 23].

A fejezet központi kérdése az, hogy a kontaktus detektálása után a PMI-hajtású rendszer milyen gyorsan és milyen módon képes ténylegesen csökkenteni az emberre ható terhelést. Míg a 3. fejezet elsősorban az esemény felismerésére koncentrált, addig itt a detektálástól a mechanikai tehermentesülésig vezető teljes időlánc válik a vizsgálat tárgyává. Ez a különbség lényeges, mert a biztonsági funkció hatásosságát nem a riasztás pillanata, hanem az erő- és impulzuscsökkentés sebessége dönti el.

A fejezetben meghatározom az érintkezés kezdetének és a reakció megindulásának eseményalapú definícióját szinkronizált erő, nyomás és pozíciójelek felhasználásával, majd bemutatom a reakciókésleltetés alakulását kvázi-statisztikus és tranziens kontaktus esetén 10 N, 50 N és 100 N előterhelés mellett. Ezt kiegészítve olyan mutatókat is vizsgállok, amelyek alkalmasak a kontaktus súlyosságának jellemzésére, így a csúcserő eléréséhez tartozó időt, a reakció megindulásáig átadott impulzust, valamint a korai időszakra vonatkozó merevségbecslést. Az eredmények alapján végül olyan tervezési iránymutatásokat fogalmazok meg, amelyek hozzájárulhatnak a humanoid robotok biztonsági rétegeinek kialakításához, különös tekintettel a reakciókésleltetés és az érzékelés kérdésére.

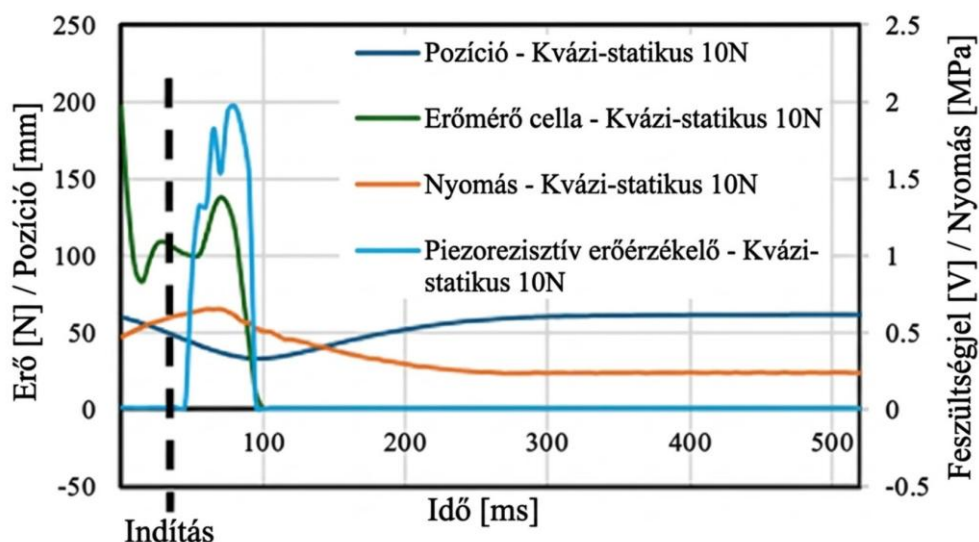
A 4. fejezet tehát nem ismétli meg a kontaktusazonosítás kérdését, hanem ugyanannak a biztonsági láncnak a következő szakaszát elemzi: a parancskiadás és a tényleges erőcsökkenés közötti különbséget. Ez különösen lágypneumatikus rendszereknél lényeges, mert a mechanikai megfelelés, a szelepáramlás, a nyomástérfogat és a geometria együtt határozza meg, mikor válik a csökkentés fizikailag is érzékelhetővé.

4.1 Ütközési esetek és kísérleti protokoll

A mérőrendszer megegyezik a 3. fejezetben ismertetett PMI-vel működtetett egyszerűsített mérőrendszerrel. Itt a precízebb kiértékelés miatt a mintavételezési idő a

korábbiánál alacsonyabb 5 ms, amelyet a használt myRIO alapú adatgyűjtő és a kísérleti környezet időzítési korlátai határoztak meg. A kontaktus kezdetét az erőérzékeny ellenállás küszöbátlépése jelölte ki, és ehhez viszonyítottam minden további időparamétert. A vizsgálatok 10 N, 50 N és 100 N előterhelésnél történtek, kvázi-statisz és tranziens kontaktusokra egyaránt. Minden állapotot tíz ismétléssel rögzítettem, majd az átlaggörbéket értékeltem. A megközelítés előnye, hogy a zaj és az egyedi eltérések kiszűrhetők, hátránya viszont, hogy a mintavételi idő korlátozza a leggyorsabb folyamatok felbontását, azonban így is elegendő a szabványok szerinti időbeni lefolyás vizsgálatához [KD5].

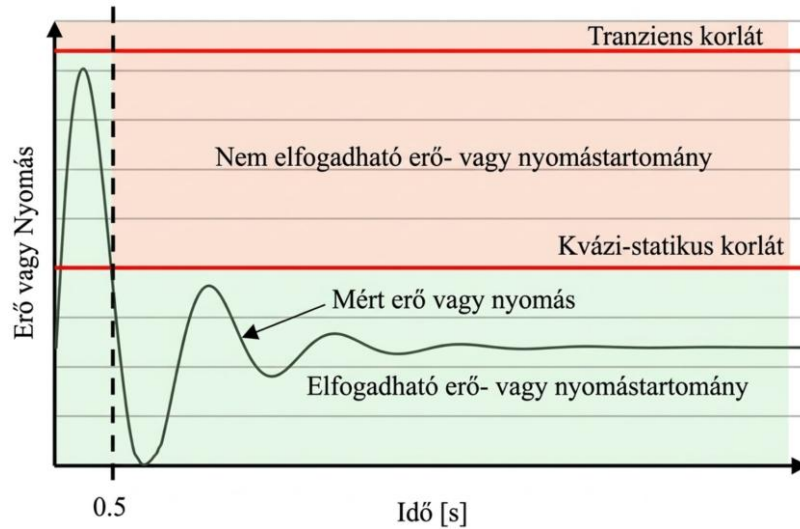
A kvázi-statisz kontaktus esetében az ütközőtest rögzített volt, ezáltal befogásszerű határfeltétel alakult ki. A tranziens kontaktus esetében az ütközőtest elmozdulhatott, így rövid idejű, dinamikus, visszapattanással, illetve eltávolodással járó ütközés jött létre, gyorsabb lecsengéssel. Fontos megjegyezni, hogy az időben illesztett görbék naplózása csak néhány mintával az ütközés előtt indul, amikor a pneumatikus mesterséges izom már aktív húzó állapotban van. Ennek megfelelően az érintkezés előtti alapvonalis erő, vagyis az $F_{bázis}$, az aktuális üzemi pontban érvényes pillanatnyi aktuátorfeszítést tükrözi, ezért eltérhet a névleges előterhelési beállítás értékétől.



23. ábra: Szinkronizált mérési jelek példája kvázi-statisz kontaktus esetén, 10 N előterhelési beállítás mellett.

A 23. ábra a szinkronizált mérési jelek egy példáját mutatja be kvázi-statisz kontaktus esetén, 10 N előterhelési beállítás mellett. Egy-egy mérési rekord 105 mintát tartalmaz,

amely magában foglalja a kezdeti állapottól az ütközési csúcsig és a csengésig terjedő folyamatot.



24. ábra: Az elfogadható és a nem elfogadható erő-, illetve nyomásértékek szemléltető ábrázolása.

4.2 A reakcióidő összetevői

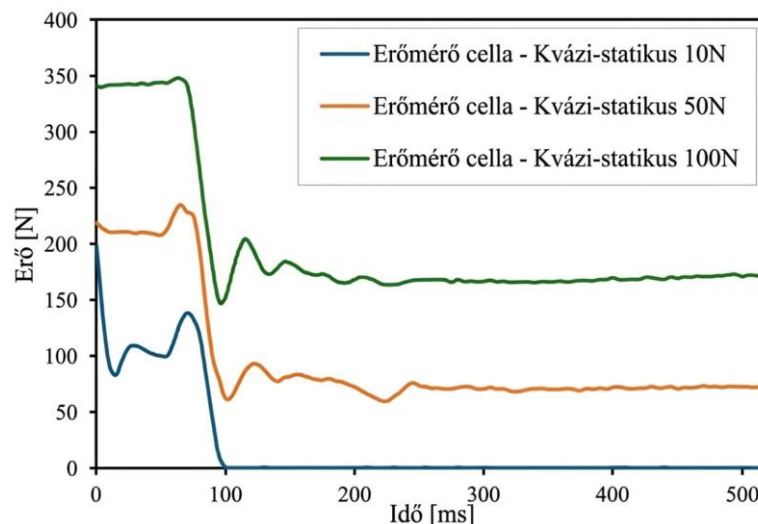
Ezen túlmenően két, a kockázatsökkentés szempontjából releváns mutatót is meghatároztam az időben illesztett erő- és FSR-jelek alapján. Az alapvonalai erőszintet, $F_{bázis}$ -t, az érintkezés kezdetét megelőző 25 ms-os időintervallumban, azaz $t_0 - 25$ ms és t_0 között mért erőmérő cella jelének átlagaként definiáltam. Az alapvonal alá történő visszatérés idejét, $\Delta t_{F,bázis}$ -t, a kontaktus utáni erőcsúcsot követő azon legkorábbi időpontként határoztam meg, amelyre teljesül, hogy $F(t) \leq F_{bázis}$. A küszöb körüli lengések és bizonytalan átbillenések kiszűrése érdekében ehhez két egymást követő mintában kellett teljesülnie a feltételnek.

A kontaktus megszűnésének időpontját az FSR-jel alapján határoztam meg. A leválás időpillanatát, t_{off} -ot, az érintkezés kezdetét követő azon legkorábbi mintavételi időpontként definiáltam, amely után az $V_{FSR}(t)$ jel legalább három egymást követő mintában a küszöb feszültség, V_{th} , alá csökkent. Az ehhez tartozó kontaktusidő-tartam mutató definíciója: $\Delta t_{off} = t_{off} - t_0$.

Mivel a mintavételi idő 5 ms volt, az időalapú eredmények szükségszerűen 5 ms-os lépésekben kvantált értékeként jelennek meg.

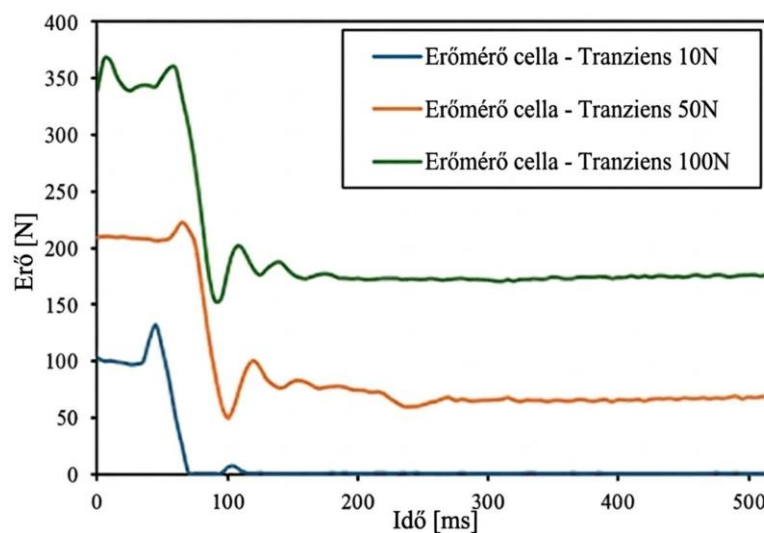
4.3 A kvázi-statikuss és tranziens görbék összehasonlítása

Az összes jel az erőérzékeny ellenállás szenzor által meghatározott t_0 kontaktuskezdetéhez lett igazítva. A 25. és 26. ábra rendre a kvázi-statikuss, illetve a tranziens kontaktus esetén mért erőmérő cellás erőválaszokat mutatja be a három előterhelési beállítás mellett. A görbék minden esetben jól szemléltetik, hogy a kontaktust követően az erő gyorsan növekszik egy maximumig, majd ezt követően gyors csökkenés indul meg. Az erőcsúcs elérésének ideje felső becslést ad arra, hogy a rendszer milyen gyorsan kezdi meg a kontaktuserő csökkentését az érintkezés érzékelése után. A 27. és 28. ábra az ehhez tartozó PMI-nyomásválaszokat mutatja be, ahol hasonló korai maximum figyelhető meg, azonban ezt az erőjelhez képest lényegesen lassabb lecsengés követi a pneumatikus áramlási korlátok miatt. A 25. ábra az időben illesztett erőmérő cellás erőválaszokat mutatja kvázi-statikuss kontaktus esetén 10 N, 50 N és 100 N előterhelési beállítás mellett.



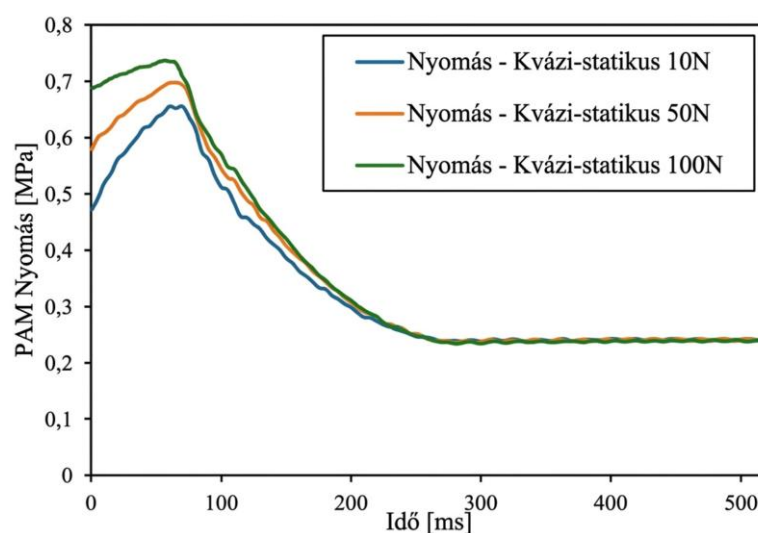
25. ábra: Erőválaszok kvázi-statikuss kontaktus esetén.

A 26. ábra az időben illesztett erőmérő cellás erőválaszokat szemlélteti tranziens kontaktus esetén 10 N, 50 N és 100 N előterhelési beállítás mellett. Megfigyelhető, hogy az ütközést követően a mért erő nem tér vissza a kezdeti előterhelési szintre, hanem egy eltolódott kvázi-statikuss egyensúlyi állapot környezetében stabilizálódik. Ez arra utal, hogy az ütközés megváltoztatja a PMI összehúzóási állapotát, és a belső nyomás újraeloszlása következtében új üzemi pont alakul ki. A mechanikai erő gyorsabban lecseng, mint ahogy a pneumatikus nyomás kiegyenlítődik, ami magyarázatot ad a visszamaradó erőeltolódásra. Ez a jelenség nagyobb előterhelések esetén még jobban érzékelhető.



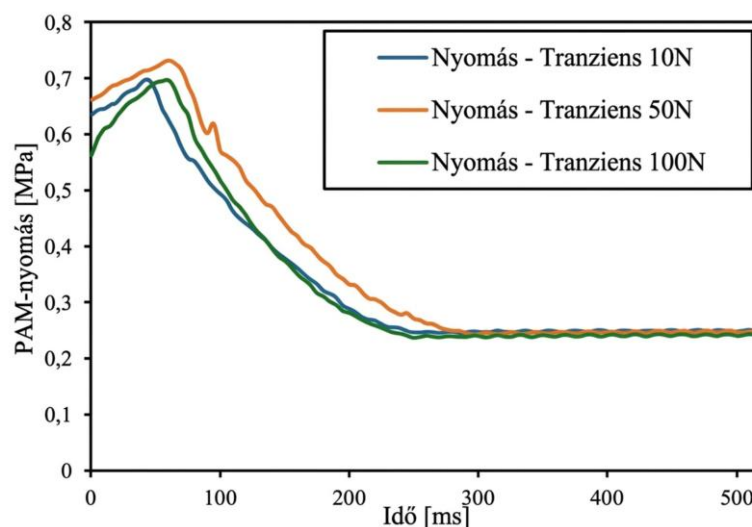
26. ábra: Erőválaszok tranziens kontaktus esetén.

A 27. ábra az időben illesztett PMI-nyomásválaszokat mutatja kvázi-statisz kontaktus esetén 10 N, 50 N és 100 N előterhelési beállítás mellett.



27. ábra: PMI-nyomás kvázi-statisz kontaktus esetén.

A 28. ábra az időben illesztett PMI-nyomásválaszokat mutatja tranziens kontaktus esetén 10 N, 50 N és 100 N előterhelési beállítás mellett.



28. ábra: PMI-nyomás tranziens kontaktus esetén.

4.4 Kinyert késleltetési mutatók

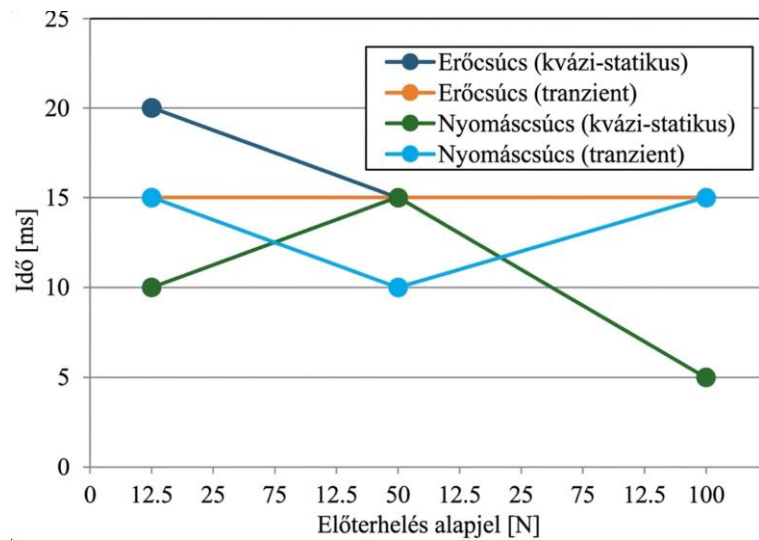
Az 5. táblázat az előállított időjellemzőket foglalja össze, beleértve a csúcserőértékek eléréséhez tartozó időket, a 90%-os lecsengési időket, az érintkezés előtti alapvonalis erőszint alá történő visszatérés idejét, valamint az FSR-jel alapján meghatározott kontaktusmegszűnés idejét. A vizsgált esetek mindegyikében az erőcsúcs az érintkezés kezdetét követően 15-20 ms-on belül alakult ki, míg a nyomáscsúcs 5-15 ms közötti időtartományban jelent meg. Az erőcsökkenés gyors volt: a kontaktus utáni erőjel csúcs-minimum kitérésének 90%-a 40-50 ms-on belül leépült. Emellett az erőmérő cella jele 20-35 ms-on belül visszatért az alapvonalis erőszint alá. A kontaktus időtartama rövidnek adódott: kvázi-statisztikus ütközés esetén az FSR-jel 15-45 ms közötti időtartamban jelezte a kontaktus megszűnését, míg tranziens ütközésnél ez 15-25 ms közé esett. A nyomás lecsengése ezzel szemben lényegesen lassabb volt, a kontaktus utáni nyomáskitérés 90%-os csökkenéséhez 155-180 ms volt szükséges. Az 5 ms-os időfelbontás mellett az előterhelés elsősorban az abszolút erő- és nyomásszinteket befolyásolta, miközben az időbeli lefutás főbb tendenciái hasonlóak maradtak. Az 5. táblázatban szereplő értékek minden esetben az egyes feltételek mellett elvégzett $N = 10$ mérés pontonkénti átlagából származnak.

5. táblázat: A mért adatokból kinyert időjellemzők

Kontaktustípus	Előterhelés [N]	Erőcsúcs [N]	ΔtF,csúcs [ms]	ΔtF,90 [ms]	
Kvázi-statikuss	10	137,8	20	45	
Kvázi-statikuss	50	235,1	15	50	
Kvázi-statikuss	100	347,9	15	45	
Tranziens	10	131,4	15	40	
Tranziens	50	223,1	15	45	
Tranziens	100	359,8	15	45	
Kontaktustípus	Nyomáscsúcs [MPa]	ΔtP,csúcs [ms]	ΔtP,90 [ms]	ΔtF,base [ms]	Δtoff [ms]
Kvázi-statikuss	0,656	10	170	35	45
Kvázi-statikuss	0,699	15	170	30	40
Kvázi-statikuss	0,736	5	170	20	20
Tranziens	0,697	15	170	25	25
Tranziens	0,733	10	180	25	15
Tranziens	0,696	15	155	20	15

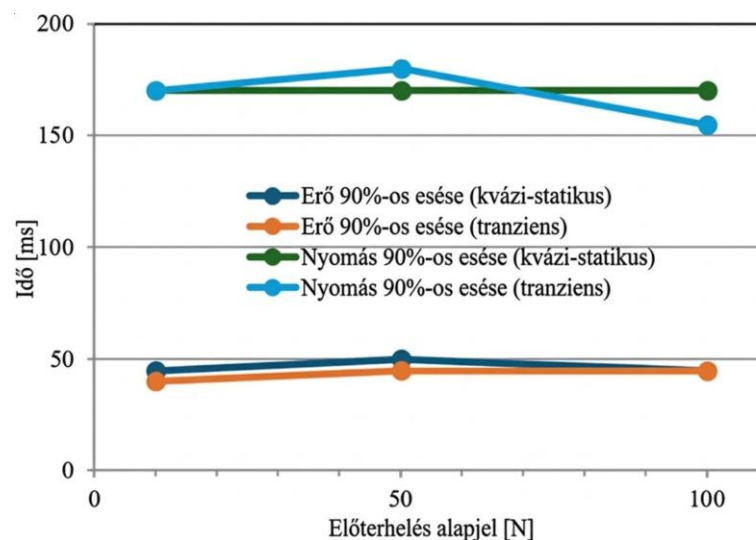
Mivel az időjellemzők az 5 ms mintavételi idejű, szinkronizált jelekből kerültek meghatározásra, minden Δt érték az FSR-jel alapján definiált kontaktuskezdethez viszonyított relatív időt jelent. A $\Delta t_{F,90}$ és $\Delta t_{P,90}$ az erő, illetve nyomásjel csúcs-minimum kitérésének 90%-os csökkenéséhez szükséges időt jelöli a csúcsérték kialakulását követően. A $\Delta t_{F,bázis}$ azt az időt adja meg, amely alatt az erőjel visszatér az alapvonal $F_{bázis}$ szint alá, ahol $F_{bázis}$ az érintkezés kezdetét megelőző 25 ms-os időablak átlagos erőértéke. A Δt_{off} az FSR-jel alapján meghatározott kontaktusmegszűnés ideje, amelyet

az $V_{FSR}(t) < V_{th}$ feltétel legalább három egymást követő mintában való teljesülése alapján definiáltam.



29. ábra: A nyomáscsúcs és az erőcsúcs eléréséhez tartozó idő.

A 29. ábra a nyomáscsúcs és az erőcsúcs eléréséhez szükséges idő alakulását mutatja az előterhelési beállítás függvényében kvázi-statisz és tranziens kontaktus esetén.



30. ábra: Az erő- és nyomásjel 90%-os lecsengési ideje.

A 30. ábra az erő és nyomásjel csúcs-minimum kitérésének 90%-os csökkenéséhez szükséges időt szemlélteti az előterhelési beállítás függvényében kvázi-statisz és tranziens kontaktus esetén.

4.5 Az előterhelés hatása a súlyosságra

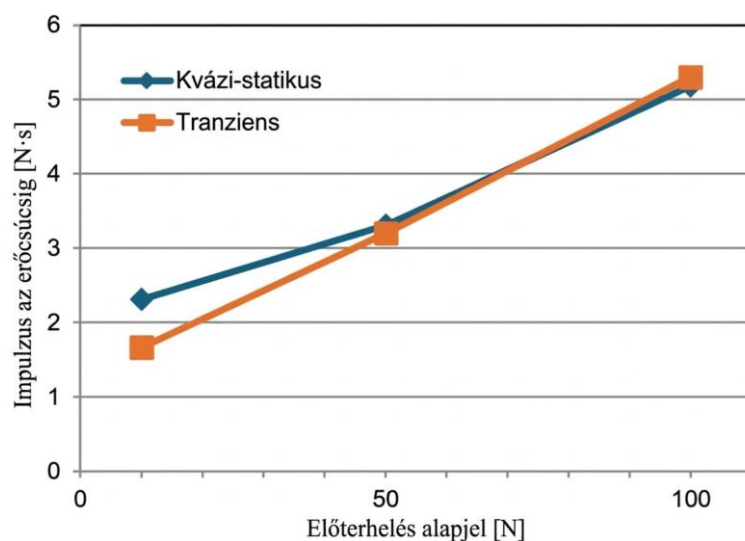
Az előterhelés növekedésével a csúcserők és az impulzus egyaránt emelkedtek, miközben az időparaméterek csak korlátozottan változtak. A vizsgálat egyik legfontosabb felismerése tehát az, hogy a reakcióidő nagyrészt a teljes rendszer integrált dinamikájától függ, nem pedig közvetlenül az előterheléstől. Ezzel szemben az ütközés súlyossága, azaz a fellépő csúcsterhelés és az átadott impulzus, erősen előterhelés függő.

Az időjellemzők mellett a 6. táblázat két, a kontaktus súlyosságát jellemző kiegészítő mutatót is bemutat, amelyeket az időben illesztett jelek alapján számítottam. Ezek közül az egyik az erőcsúsig integrált impulzus ($J_{csúcs}$), a másik pedig egy korai időszakra vonatkozó merevségi mutató, amelyet a kontaktus kezdetétől az erőcsúsig számított $|\frac{\Delta F}{\Delta x}|$ hányadossal közelítettem. Az abszolút értékek és az alapvonalhoz viszonyított mennyiségek együttes közlése lehetővé teszi annak elkülönítését, hogy az erő mekkora része származik az üzemi pontból, illetve mekkora része tulajdonítható magának az ütközésnek. A 6. táblázat emellett az FSR-feszültség és az erőmérő cella jele közötti Pearson-féle korrelációs együtthatókat is összefoglalja a kontaktuskezdet előtti 25 ms-tól a kontaktuskezdet utáni 150 ms-ig terjedő időablakban. A korreláció kvázisztatikus kontaktus esetén közepes, míg tranziens kontaktus esetén alacsonyabb értéket mutatott, ami arra utal, hogy az FSR-szenzor megbízhatóan alkalmazható a kontaktuskezdet érzékelésére, azonban amennyiben mennyiségi erőbecslés is szükséges, célszerű más érzékelési módokkal együtt alkalmazni.

6. táblázat: Súlyossági mutatók és szenzorkorreláció a mért adatok alapján.

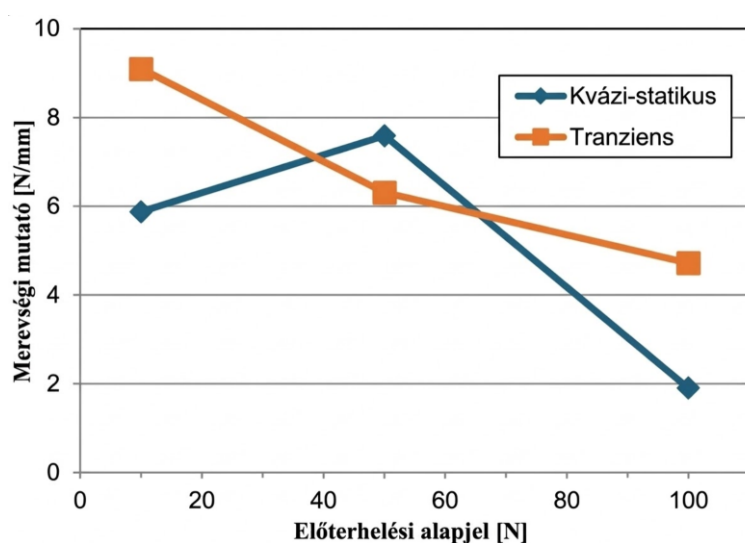
Kontaktustípus	Előterhelés [N]	Alapvonali erő [N]	$J_{csúcs}$ [N·s]	$\hat{k}$ [N/mm]	Pearson-féle r
Kvázisztatikus	10	105,4	2,308	5,88	0,696
Kvázisztatikus	50	210,0	3,313	7,58	0,637
Kvázisztatikus	100	343,2	5,188	1,91	0,510
Tranziens	10	98,8	1,661	9,09	0,368
Tranziens	50	208,4	3,196	6,32	0,433
Tranziens	100	342,6	5,311	4,71	0,444

Az alapvonali erő az érintkezés kezdetét megelőző 25 ms-os időintervallumban mért erőmérő cella jelének átlagértéke.



31. ábra: Az erőcsúcsig számított impulzus.

A 31. ábra az erőcsúcsig számított impulzus alakulását mutatja az előterhelési beállítás függvényében kvázi-statikus és tranziens kontaktus esetén.



32. ábra: Korai időszakra vonatkozó merevségi mutató.

A 32. ábra a kontaktus kezdetétől az erőcsúcsig meghatározott $\left| \frac{\Delta F}{\Delta x} \right|$ merevségi mutató alakulását szemlélteti az előterhelési beállítás függvényében.

4.6 Reakcióidő és biztonsági tartalék

A mérések nemcsak a jelalakok leírására, hanem egy gyakorlati reakcióidő szükséglet felállítására is alkalmasak. Az 5. táblázatból az is látszik, hogy a mechanikai válasz

néhány tíz milliszekundumos tartományban lezajlik, míg a pneumatikus rendeződés ennél számottevően lassabb. A védelem szempontjából ezért a gyors tehermentesülés és a késleltetett nyomáskiegyenlítődés nem azonos esemény [KD5].

Ebből a mérnöki tervezés számára az következik, hogy a védelmi reakciót legalább két egymást követő szinten kell értelmezni. Az első szint az azonnali beavatkozás, amelynek célja a további erőnövekedés megakadályozása és a kontaktus gyors megszüntetése. A második szint az állapot rendezése, amelyben a pneumatika lassabb kiegyenlítődése miatt a rendszer csak később tér vissza egy új egyensúlyi állapotba.

Ha a teljes reakciólánc értékelése kizárólag nyomásmérésre épül, akkor a gyors mechanikai tehermentesülés rejtve maradhat. Amennyiben viszont csak a gyors erőváltozást figyelem, akkor nem látom a rendszer késleltetett belső visszarendeződését. A kísérleti eredményekből ezért egy kettős elfogadási kritérium vezethető le: gyors mechanikai tehermentesítés és ellenőrzött, késleltetett pneumatikus rendeződés.

A 30. és 31. ábrán közölt időparaméterek alapján a mechanikai és pneumatikus folyamatok szétválása egyetlen aszinkronitási mutatóval is megragadható.

$$A_{asz} = \frac{\Delta t_{p,90}}{\Delta t_{F,90}} \quad (4.1)$$

A vizsgált esetekben $\Delta t_{F,90} = 40\text{-}50$ ms és $\Delta t_{p,90} = 155\text{-}180$ ms volt, ezért az aszinkronitási mutató megközelítőleg 3,1 és 4,5 közé esett. Ez azt jelenti, hogy a belső pneumatikus rendeződés jellemzően több mint háromszor lassabb, mint a mechanikai tehermentesülés.

A 32. ábra alapján az előterhelés és az erőcsúsig felhalmozott impulzus között monoton növekvő kapcsolat állt fenn. Ennek mérnöki jelentése egyszerű előjeles összefüggéssel foglалható össze.

$$\frac{\partial J_{csúcs}}{\partial F_{elő}} > 0 \quad (4.2)$$

A (4.2) relációban $J_{csúcs}$ az erőcsúsig felhalmozott impulzus, $F_{elő}$ az előterhelés. A fenti reláció a vizsgált tartományban azt fejezi ki, hogy az előterhelés növekedése a reakcióidő fő időléptékeit nem tolta el számottevően, viszont növelte az átadott mechanikai hatást. Ez indokolja, hogy az előterhelést önálló biztonsági állapotváltozóként kezeljem.

Humanoid robotoknál ez különösen fontos, mert a védelmi mozdulatot nemcsak leállításként, hanem újra pozicionálásként is meg kell tervezni. Az emberrel közös térben

nem elegendő a későbbi nyomáskiegyenlítődé, a veszélyes erőcsúcs kialakulását már a legelső néhány tíz milliszekundumban korlátozni kell.

7. táblázat: Reakcióidő-költségvetés a PMI-hajtású védelmi reakció értékeléséhez

Részfolyamat	Jellemző mért idő	Biztonsági jelentés	Elsődleges visszaigazolás
Kontaktuskezdet (t_0)	5 ms-os mintavételi felbontáson belül	A védelmi lánc indítási pontja	Felületi kontaktusjel
Erőcsúcs kialakulása	15-20 ms	A kritikus kezdeti terhelés felső pontja	Erőmérés
Erő bázisszint alá esése	20-35 ms	A gyors mechanikai tehermentesítés bizonyítéka	Erő- vagy helyzetjel
Erő 90%-os lecsengése	40-50 ms	A külső terhelés túlnyomó része megszűnt	Erőjel
Nyomás 90%-os lecsengése	155-180 ms	A belső pneumatikus rendeződés lezárulása	Nyomásjel

A 7. táblázat alapján a gyors védelmi funkciók időkerete néhány tíz milliszekundum, míg a teljes állapotrendeződése közel két tizedmásodperc. E különbség jelöli ki azt a minimális biztonsági tartalékot, amely alatt gyors, helyi kontaktusmérés nélkül nem célszerű humanoid reakciót hitelesíteni.

4.6.1 Reakciólogika állapotgépes formalizálása

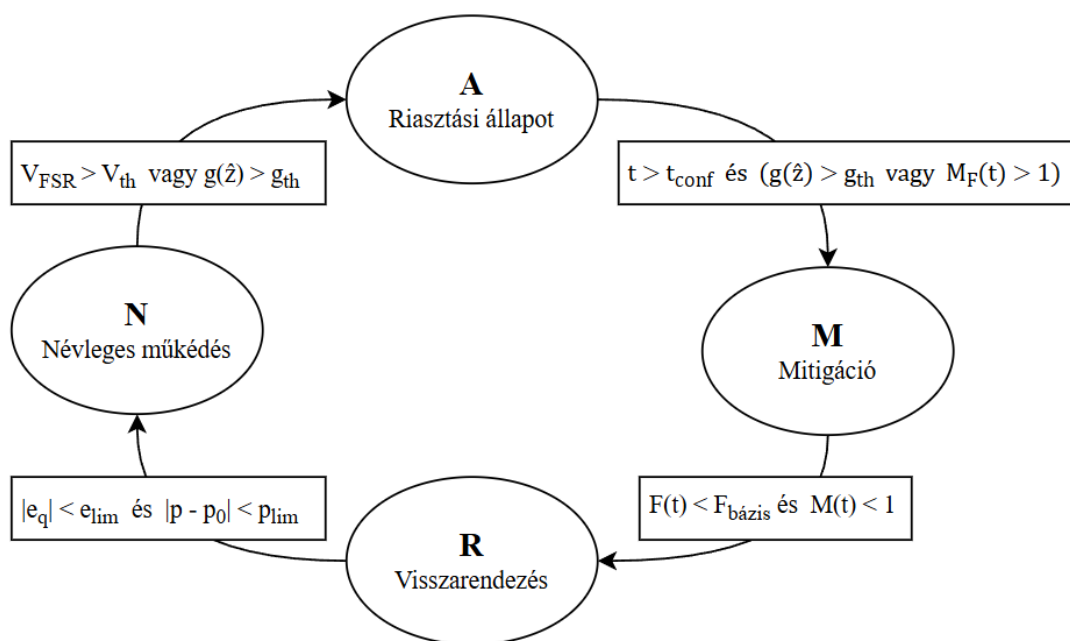
Az ütközések súlyosságának értékelése és a kárenyhítés akkor alkalmazható közvetlenül humanoid robotoknál, ha a döntési folyamat egyértelmű állapotgéppé alakítható. A pusztán folyamatos szabályozási értelmezés azért nem elegendő, mert a gyors észlelés, az osztályozás, a védelmi mozdulat és a visszatérés eltérő prioritású feladatok. Célszerű ezért a biztonsági felügyeletet diszkrét állapotokra bontani: N - névleges működés, A - riasztási/előminősítési állapot, M - mitigáció, R - visszarendezés.

$$x_s(k) \in \{N, A, M, R\} \quad (4.3)$$

A névleges állapotból az A állapotba lépés feltétele az, hogy a lokális érintkezési trigger vagy a becsült döntési függvény meghaladjon egy küszöböt. Innen a rendszer két irányba mozdulhat: ha a kontaktus bizonytalan, visszatérhet névleges felügyeletbe, ha viszont a gyors döntési ablakban fennmarad a veszélyjelzés, a mitigációs M állapot aktiválódik. Az M állapotból a rendszer csak akkor léphet át az R visszarendezési állapotba, ha a

mechanikai tehermentesülést jelző gyors csatorna és a lassú belső pneumatikus csatorna együtt kielégítően rendeződött. Ez megakadályozza, hogy a robot túl korán térjen vissza aktív mozgásba.

A minimális átmenetfeltételek a jelen dolgozat jelölésével a következőképpen foglalhatók össze a 33. ábra szerint.



33. ábra: Minimális átmenetfeltételek

Az állapotgépben V_{FSR} az FSR-jel, V_{th} annak küszöbértéke, $g(\hat{z})$ a kontaktusosztályozó döntési függvénye, g_{th} a hozzá tartozó küszöb, t_{conf} a megerősítési időablak, $F_{bázis}$ az alapvonalis erőszint, e_q a helyzethiba, e_{lim} annak megengedett határa, p_0 a névleges nyomás, p_{lim} pedig a visszarendezéshez elfogadott nyomástartomány. Az állapotgép legfontosabb haszna, hogy elválasztja a gyors és a lassú döntési feladatokat. Az $N \rightarrow A$ és az $A \rightarrow M$ átmeneteknél a gyors, néhány mintavételen belüli reakció a döntő, ezért itt egyszerű, alacsony számításigényű feltételeket célszerű használni. Az $M \rightarrow R$ és $R \rightarrow N$ átmeneteknél ezzel szemben a rendszer már rendezettebb állapotban van, így részletesebb ellenőrző feltételek is alkalmazhatók. Ez a hierarchia megfelel a humanoid biztonságtechnikában elvárt prioritásoknak, azaz először a veszélyes erőnövekedést kell megállítani, csak utána szabad optimalizálni a visszatérést.

Ez a formalizálás különösen fontos ott, ahol a robot nem egyszerűen leáll, hanem védelmi visszamozdulást is végrehajt. A jelen mérések szerint a mechanikai tehermentesülés

gyorsabb, mint a nyomásrendszer rendeződése, ezért a visszarendezési logika nem épülhet kizárólag a nyomásjelre. Ha a rendszer csak $p < p_{lim}$ feltételt várna meg, feleslegesen hosszú ideig maradna blokkolt állapotban. Ha viszont csak a gyors erőjelre támaszkodna, a belső állapot rendezetlensége miatt újraindításkor kedvezőtlen mozgás alakulhatna ki. Az állapotgép pontosan ezt a kompromisszumot teszi kezelhetővé.

A javasolt formalizálás egy másik, általánosabb következménye, hogy a kontaktustípus-azonosítás már nem öncélú osztályozási feladattá, hanem akcióválasztási problémává válik. Kvázi-statikusként minősített eseménynél elsődleges a leszorító helyzet oldása és a mozgástartalék növelése, tranziens eseménynél viszont a rövid idejű csúcs után sok esetben elegendő a sebesség vagy nyomatékkorlátozott visszarendezés. A szenzorfüziós döntés tehát közvetlenül meghatározza a védelmi akciót, nemcsak az utólagos naplózást.

Humanoid rendszerben ez a fajta állapotgépes leírás azért is előnyös, mert összekapcsolható magasabb szintű felügyeleti és naplózási funkciókkal. A diszkrét állapotokhoz rögzíthető a kiváltó szenzor, a kontaktustípus, a becsült súlyosság, a reakcióidő és a visszatérési feltétel. Ez jelentősen javítja a rendszer auditálhatóságát, ami szabványi és üzemeltetési szempontból egyaránt fontos. A dolgozat eredményei alapján így nemcsak a reakcióidő, hanem maga a teljes védelmi folyamat is formalizálható.

4.6.2 Testhelyzetfüggő redukált tömeg és az eredmények skálázhatósága

A jelen fejezet kísérletei egy egyszerűsített ízületi szegmensen készültek, ezért adódik a kérdés, miként vihetők át a következtetések több szabadságfokú humanoid végtagokra. A kulcsfogalom itt a reflektált tömeg, vagyis az a testtartásfüggő eredő tömeg, amely a kontaktus irányában látszik az érintkezési pontból [21].

$$m_{ref}(q) = (J_c(q)M^{-1}(q)J_c^T(q))^{-1} \quad (4.4)$$

A (4.4) általános robotikai összefüggésben $m_{ref}(q)$ a kontaktusirányra reflektált tömeg, $J_c(q)$ a kontaktusirányra vett Jacobi, $M(q)$ pedig a teljes rendszer tehetetlenségi mátrixa. A képlet lényege, hogy ugyanaz a végtag más testtartásban más ütközési karaktert mutathat, még azonos lokális szabályozási paraméterek mellett is. Ez azt jelenti, hogy a jelen mért reakcióidők és impulzusok nem egyszerűen konstans rendszerjellemzők, hanem a munkaponttal együtt értelmezendők.

A laborplatformon mért előterhelésfüggő viselkedés ebből a nézőpontból egy általánosabb jelenség speciális esete. Az előterhelés növekedése az aktuátor oldalon

növelte a csúcsimpulzust, míg teljes humanoid végtag esetén a testtartásfüggő reflektált tömeg hasonló irányban módosíthatja a kezdeti ütközési súlyosságot. Másképpen fogalmazva: a kockázatot nemcsak a lokális izom vagy szelepállapot, hanem a teljes mechanizmus konfigurációja is alakítja.

$$J_{csúcs} \approx m_{ref}(q) \cdot \Delta v \quad (4.5)$$

A (4.5) közelítő relációban $J_{csúcs}$ az átadott impulzus, $m_{ref}(q)$ a reflektált tömeg, Δv pedig a relatív sebességváltozás. A reláció leegyszerűsített, mégis szemléletes, az átadott impulzus a reflektált tömeg és a relatív sebesség szorzatával arányos. Ha ugyanaz a védelmi logika eltérő testhelyzetekben működik, akkor a mechanikai súlyosság a $m_{ref}(q)$ változása miatt jelentősen különbözhet. Ez közvetlenül indokolja, hogy humanoid rendszereknél a kontaktusvalidációt ne csak egyetlen reprezentatív konfiguráción, hanem több, szélső és tipikus testtartáson is el kell végezni.

A skálázhatóság másik fontos feltétele az érzékelési architektúra. Több szabadságfokú végtagon a lokális FSR vagy tapintócsatorna, a csuklószintű erő- vagy nyomatékbecslés, valamint a testtartásból számolt reflektált tömeg együtt adhat megfelelő képet a veszélyességről. Ebből következően a jövőbeni humanoid biztonsági validáció célszerűen nem egyetlen globális határértékre, hanem konfigurációfüggő kockázati térképre épülhet. A jelen fejezet ehhez a konfigurációfüggő térképhez szolgáltat egy lokális, kísérletileg jól azonosított építőelemet.

A laborplatform eredményeinek általánosíthatóságát tehát nem az biztosítja, hogy az egyszerűsített ízület „ugyanaz”, mint egy teljes humanoid kar, hanem az, hogy a domináns jelenségek, mint a gyors mechanikai tehermentesülés, a lassabb pneumatikus rendeződés, az előterhelés impulzusnövelő hatása és a lokális érzékelés szükségessége - a bonyolultabb rendszerekben is várhatóan fennmaradnak. Emiatt a dolgozatban közölt mérési és modellezési eredmények a teljes humanoid rendszertervezéshez is releváns tervezési elveket adnak.

4.7 Az előterhelés mint kockázati tényező

Az előterhelés a jelen fejezetben kísérleti paraméterként jelent meg, valójában azonban a védelmi reakció egyik állapotváltozója. A részletes időalapú kiértékelés azt mutatta, hogy a 10 N, 50 N és 100 N előterhelési tartományban a fő időjellemzők csak kismértékben

váltak, miközben az abszolút erő és nyomásszintek, valamint az erőcsúcsig felhalmozott impulzus egyértelműen növekedtek. Ez arra utal, hogy a reakcióidőt elsősorban a teljes rendszer integrált dinamikája, a vezérlő végrehajtási ideje, a szelep válasza és a mechanikai megfelelőség határozza meg, míg az előterhelés főként a kontaktus súlyosságát módosítja.

A nagyobb előterhelés ebből következően kettős kockázatot hordoz. Egyrészt nagyobb kezdeti merevséget és nagyobb csúcsterhelést eredményez, másrészt csökkenti a szerkezet mozgástartalékát. A korábbi kontaktusprofil-vizsgálatokkal együtt értelmezve ez azt is jelenti, hogy a magasabb üzemi pont nemcsak veszélyesebb ütközést okozhat, hanem bizonyos érzékelési csatornák diagnosztikai informatív értékét is ronthatja, mert a kvázi-statisztikus és tranzienst jelölő jelalakok elkülönülése kevésbé markáns.

Az előterhelés ezért nem kezelhető pusztán kényelmi vagy beállítási paraméterként. Humanoid ízületek és végtagmodulok esetében az üzemi pont meghatározza a passzív megfelelőséget, a kezdeti merevséget, az átadott impulzust és részben az érzékelési kiértékelés megbízhatóságát is. A védelmi reakció tervezésénél tehát nem elegendő a névleges nyomás- vagy erőértékek figyelembevétele, az aktuális előterheléshez tartozó állapotot is biztonsági változóként kell kezelni.

Mindez azt jelenti, hogy a magasabb előterhelés csak akkor fogadható el, ha az adott konfigurációban a gyors védelmi reakció, a szenzorozás és a szerkezeti megfelelőség együttesen képes ellensúlyozni a növekvő mechanikai súlyosságot. Ezzel az előterhelés nem mellékes üzemeltetési kérdéssé, hanem a kockázatbecslés és a biztonsági tervezés szerves részévé válik. A 8. táblázat az előterhelés állapotfüggő biztonsági hatásait foglalja össze.

8. táblázat: az előterhelés állapotfüggő biztonsági hatásait foglalja össze.

Előterhelési tartomány	Mechanikai következmény	Érzékelési következmény	Biztonságtechnikai következtetés
Alacsony	Nagyobb mozgástartalék, kisebb impulzus	A kontaktustípusok különbsége jól látható	Kedvező diagnosztikai állapot, de a kontaktus meglétének gyors észlelése szükséges
Közepes	Növekvő merevség és csúcselő	A csatornák továbbra is informatívak	Az üzemi pontot már a kockázatbecslés részeként kell rögzíteni
Magas	Korlátozott mozgástartalék, nagyobb impulzus és súlyosság	Bizonyos jelalakok torzulhatnak, a kontaktusminősítés nehezebbé válhat	Csak többbrétegű érzékeléssel és fokozott védelmi tartalékkal célszerű alkalmazni

A táblázatból az következik, hogy az alacsony előterhelés kedvezőbb diagnosztikai állapotot és kisebb mechanikai súlyosságot ad, míg a magas előterhelés csak többbrétegű érzékeléssel és nagyobb védelmi tartalékkal alkalmazható. A H3 hipotézis szempontjából ez azt jelenti, hogy az előterhelés tudatos korlátozása nem kiegészítő, hanem elsődleges biztonságtechnikai tervezési feladat.

4.8 A H3 hipotézis igazolása

A H3 hipotézis a mért adatok alapján igazoltnak tekinthető. A vizsgált PMI-hajtású ízületi szegmens védelmi reakcióját valóban eltérő időléptékű mechanikai és pneumatikus folyamatok határozták meg, és az is egyértelműen igazolódott, hogy az előterhelés növekedése növeli az ütközés során átvitt mechanikai hatást.

A szinkronizált erő, nyomás, helyzet és FSR-jelek alapján a kontaktus utáni erőcsúcs 15-20 ms-on belül alakult ki, az erőjel pedig 20-35 ms alatt visszatért az alapvonal szint alá, illetve 40-50 ms-on belül a kitérés 90%-a lecsengett. Ezzel szemben a PMI nyomásválasza ugyan 5-15 ms-on belül elérte a csúcsát, de a 90%-os nyomáslecsengéshez 155-180 ms-ra volt szükség. A mechanikai tehermentesülés és a pneumatikus rendeződés tehát időben szétválk, az aszinkronitási mutató a vizsgált esetekben megközelítőleg 3,1 és 4,5 közé esett.

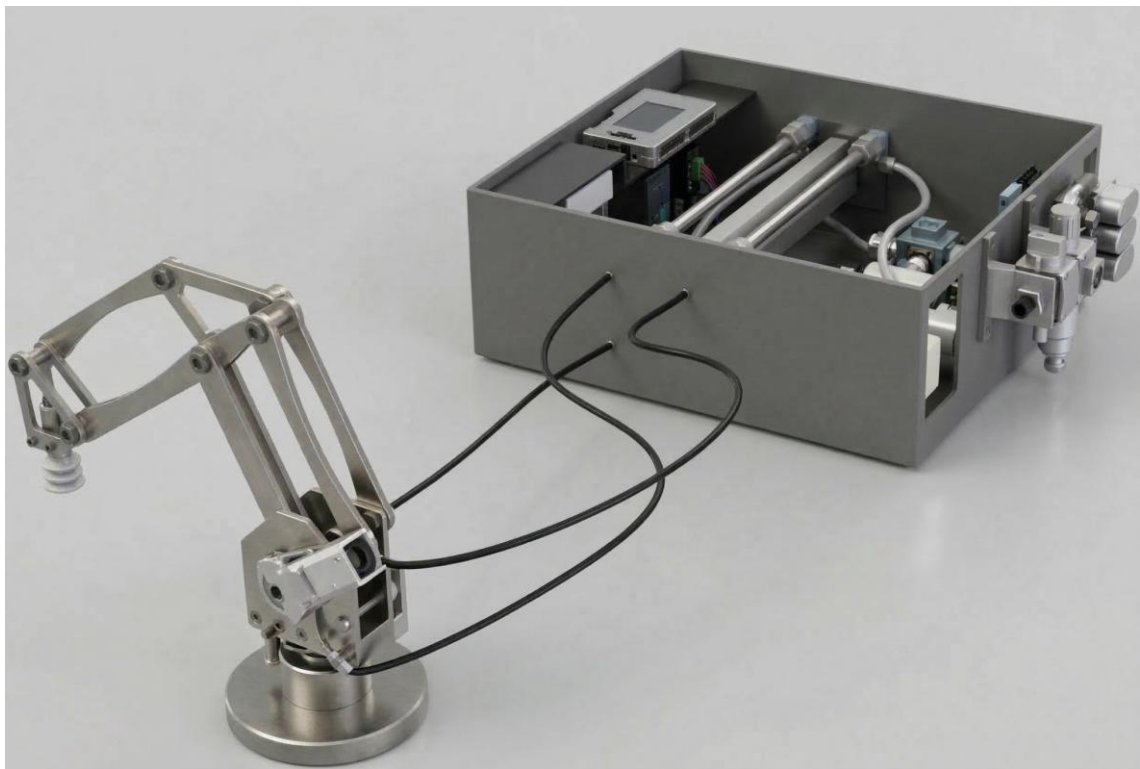
Az előterhelés 10 N-ról 100 N-ra növelése az időjellemzőket csak korlátozottan módosította, ugyanakkor a csúcserő és az erőcsúsig integrált impulzus monoton növekedett. Ez azt jelenti, hogy a PMI passzív megfelelése önmagában nem elegendő a kedvező ütközési viselkedéshez: az üzemi pont megválasztása közvetlenül befolyásolja a kontaktus súlyosságát, ezért a működési pontot a detektálási és reakciós logikával együtt kell optimalizálni.

Fentiekből az adódik, hogy a gyors védelmi funkciók hitelesítése nem építhető kizárólag nyomásalapú kiértékelésre. A biztonságos viselkedéshez gyors helyi kontaktusészlelésre, rövid idejű mechanikai tehermentesítésre és ezt követően lassabb, ellenőrzött pneumatikus állapotrendezésre van szükség. Humanoid rendszereknél a veszélyes erőcsúcs kialakulását már az első néhány tíz milliszekundumban korlátozni kell.

A fejezet módszertani hozadéka az, hogy a humanoid ízületek biztonsági reakcióját nem célszerű kizárólag névleges szelepidőkből vagy állandósult erőhatárokból becsülni. Valós hardveren, szinkron jelrögzítéssel kell mérni a kontaktuskezdet és a tényleges tehermentesülés közötti teljes folyamatot. A bemutatott mérési szemlélet ezért nemcsak a H3 hipotézist támasztja alá, hanem általános tervezési elvet is ad lágy aktuátoros, emberközelű robotrendszerek biztonsági validálásához.

5 ROBUSTUS SZABÁLYOZÁS PNEUMATIKUS MESTERSÉGES IZOMMAL HAJTOTT ROBOTKARON

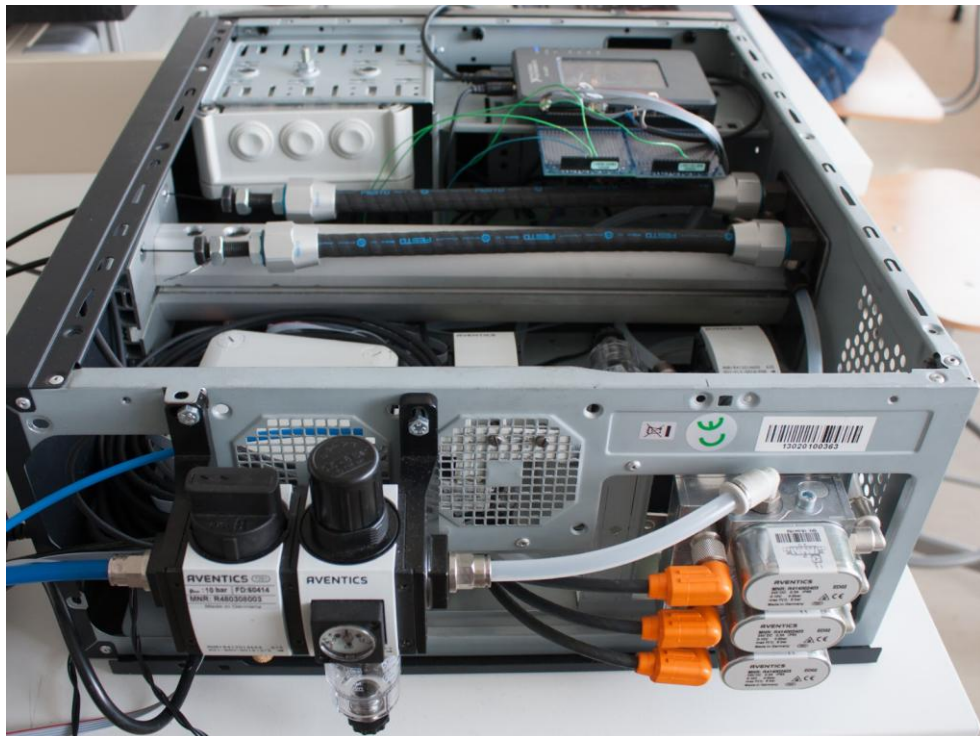
Ebben a fejezetben azt vizsgálom, hogy a pneumatikus mesterséges izommal működtetett, három szabadságfokú mechanizmus, szabályozott mozgása mennyire tekinthető kiszámíthatónak és biztonságtechnikailag elfogadhatónak. A kérdés itt már nem a kontaktus felismerése vagy a tehermentesülés sebessége, hanem az, hogy normál üzemben mennyire sikerül eleve visszafogni a túllövést, a csillapodó lengést és a véghelyzet körüli bizonytalanságot [7, KD7].



34. ábra: PMI-vel működtetett 3 szabadságfokú robotkar elrendezés

A vizsgált mechanizmus, amelyet a 34. és 35. ábra szemléltet, ebben a fejezetben meglévő kísérleti platformként jelenik meg. Az érdemi hozzájárulást nem a mechanikai kialakítás ismételt bemutatása, hanem a megőrzött pozicionálási felvételek egységes, mérésalapú újrakiértékelése adja. Ennek alapján számszerűen jellemezhetővé vált, hogy a zónás, csúszómód jellegű szabályozás milyen beállási, véghelyzeti és tranziens jellemző tulajdonságokat eredményez.

A vizsgálat biztonságtechnikai értelme az, hogy a lágy hajtás önmagában még nem jelent kiszámítható mozgást. Amennyiben a szabályozás túllövő, impulzív vagy hosszan lecsengő választ ad, akkor a szerkezeti engedékenység előnyének egy része elveszik. A robusztus szabályozás jelentőségét jól mutatják a nagy merevségű humanoid aktuátorok precíz nyomatékszabályozására és a hibás karok helyreállítására irányuló közlemények [129, 130].



35. ábra: A 3 szabadság fokú PMI-hajtás kialakítása

Ezért a H4 hipotézis értékelését itt nem pusztán pontossági kérdésként kezelem. A beállási időt, a véghelyzeti szórást, a driftet és a tranziens kitéréseket együtt vizsgálom, mert a biztonságos mozgás ezek összhatásából áll elő.

5.1 A vizsgált robotrendszer és a mérési keret

A vizsgált rendszer három szabadságfokú, nyitott kinematikai láncú manipulátor, amelyben a pneumatikus mesterséges izmok bowden-áttételen keresztül mozgatják a csuklókat. A szerkezet engedékenysége, a súrlódás, a hiszterézis és a munkapontfüggő nyomás-erő kapcsolat miatt a rendszer szabályozási szempontból erősen nemlineáris viselkedést mutat [7, 28].

A videóalapú kiértékeléshez a képsíkbeli skálázást videónként, közelítő vetületi kalibrációval végeztem el a robot névleges geometriai méretei és a lokálisan azonosítható

referenciaelemek alapján. Ez tette lehetővé, hogy a felvételekből időalapú, valamint közelítő hosszalapú mutatókat képezzek.

Mivel a kiértékelés egy kamera képsíkbeli vetületére épült, az időalapú mutatók tekinthetők a legstabilabbnak, míg a mm illetve mm/s egységű jellemzők csak közelítő, összehasonlító jelleggel értelmezhetők. A fejezet következtetéseit ezért nem egyetlen pontossági számra, hanem több, egymást kiegészítő mutató együttesére alapozom.

9. táblázat. A vizsgált robotrendszer fő jellemzői és a mérési értelmezéshez szükséges paraméterei.

Jellemző	Érték	Értelmezés
Szabadságfokok száma	3	Nyitott kinematikai lánc, többcsuklós manipuláció
Névleges geometriai méretek	530 / 425 / 206 / 213 mm	A képsíkbeli skálázás alapja
Munkatér és teher	kb. 250 mm sugarú elérés; 250 g hasznos teher	Közepes energiájú laborplatform
Hajtás és erőátvitel	Pneumatikus mesterséges izom és bowden	Hiszterézis és súrlódási bizonytalanság együtt
Érzékelés és vezérlés	Abszolút enkóderek, myRIO/LabVIEW, zónás SMC	Valós idejű visszacsatolás és biztonságorientált beavatkozás

A robotot ebben a fejezetben kísérleti rendszerként kezelem. A szerkezeti részletek annyiban maradnak lényegesek, amennyiben kijelölik a mérési eredmények érvényességi tartományát. A disszertációs eredményt itt a mozgások új, egységes kiértékelése és biztonságtechnikai értelmezése adja.

A hajtásoldali bizonytalanságok szempontjából különösen fontos a bowden-áttétel, a mesterséges izmok nyomásfüggő viselkedése és a szerkezeti rugalmasság együttes hatása. Emiatt a rendszer válasza nem írható le jól egyetlen lineáris modellel, a stabilitást és a véghelyzeti nyugalmat ezért közvetlenül mért adatok alapján vizsgáltam.

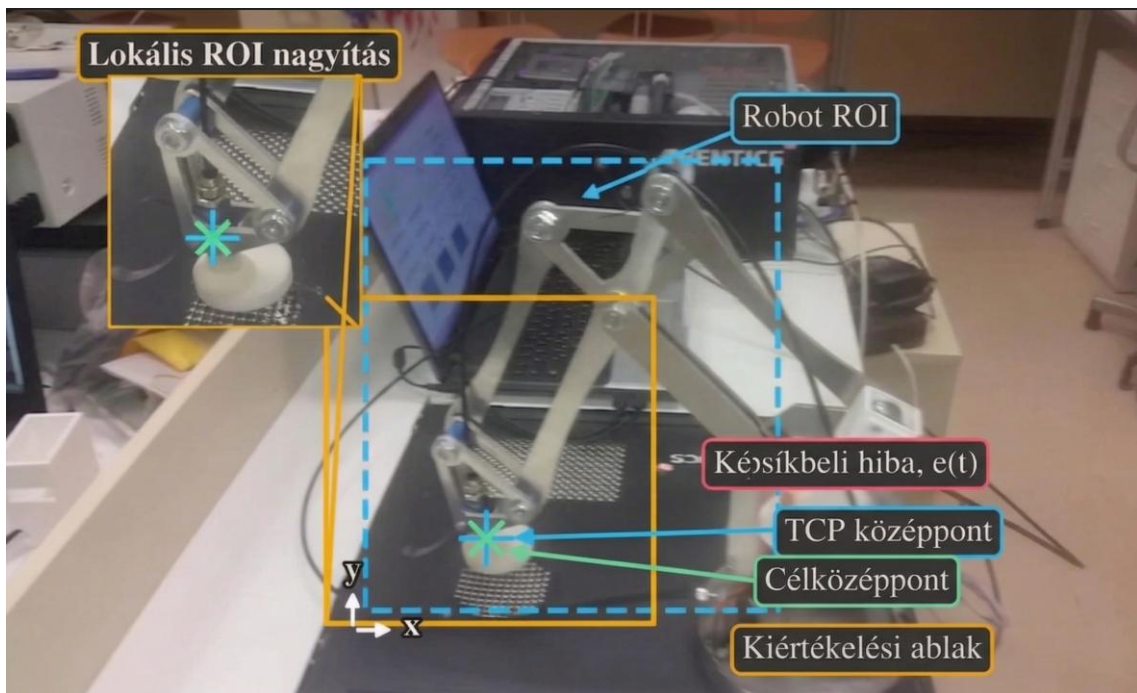
A vezérlési és mérési infrastruktúrát myRIO-alapú beágyazott egység, LabVIEW-környezet és abszolút mágneses szögjeladók alkották. Ez a konfiguráció biztosította, hogy a csuklósögek, a beavatkozás és a végállapotí viselkedés reprodukálható módon legyen elemezhető.

Biztonságtechnikai szempontból ennek az a jelentősége, hogy a kis szerkezeti tömeg és a lágy hajtás csak akkor jelent valós előnyt, ha a szabályozás közben a túllövés, a csillapodó lengés és a maradó drift is kordában marad.

5.2 Videóalapú mérési módszer és adatkinyerés

A kvantitatív kiértékelést a megőrzött kísérleti videófelvevételek újfelfeldolgozására alapoztam. Összesen nyolc ASF videót elemeztem, amelyek közül három bizonyult megbízhatóan, egy pedig feltételesen kvantifikálhatónak.

A fejezet kvantitatív eredményei kis elemszámú, megőrzött kísérleti videófelvevételek videóalapú újraértékeléséből származnak. Ezért az itt közölt mutatók nem teljes robotmetrológiai hitelesítést, hanem közelítő, összehasonlító célú újraelemzést jelentenek. Az időalapú jellemzők megbízhatóbbnak tekinthetők, míg a mm és mm/s egységű mennyiségek a képsíkbeli vetítés és a közelítő kalibráció miatt tűréssel értelmezendők amelyet a megfelelő helyen jelöltem.



36. ábra: Kvantitatív kiértékelés

Az adatkinyerést klasszikus képfeldolgozással és statikus ROI-alapú újrakövetéssel végeztem. A fehér, kör alakú marker lokalizálása HSV-küszöböléssel, morfológiai szűréssel és kontúr-alapú jelöltértékeléssel történt. A kameramozgás miatt a teljes képre

kiterjedő követés nem volt kellően stabil, ezért videónként lokális, statikus ROI-kat definiáltam, és ezeken belül követtem a markert.



37. ábra: A módszer lépései

A módszer egymásra épülő lépésekből állt. Először videónként kiválasztottam a kiértékelhető szakaszt és a lokális ROI-t, majd meghatároztam a marker képpont-koordinátáit. Az így kapott pályákat simítottam, elvégeztem a közelítő mm-skálázást, és az idősorokból sebességet, illetve származtatott teljesítménymutatókat számítottam.

Az időalapú jellemzők robusztusabban becsülhetők, mint a hosszalapú mennyiségek. A beállási időt $\pm 5\%$, illetve minimum ± 3 mm-es sáv alapján határoztam meg, ahol a jel a megfigyelési ablakban nem maradt tartósan a sávban, ott a mutató üresen maradt. Az utólengési frekvenciát és periódust csak kellően stabil, oszcillációt mutató lecsengés esetén közöltem.

5.3 A szabályozási kiindulópont és a kiértékelési mutatók

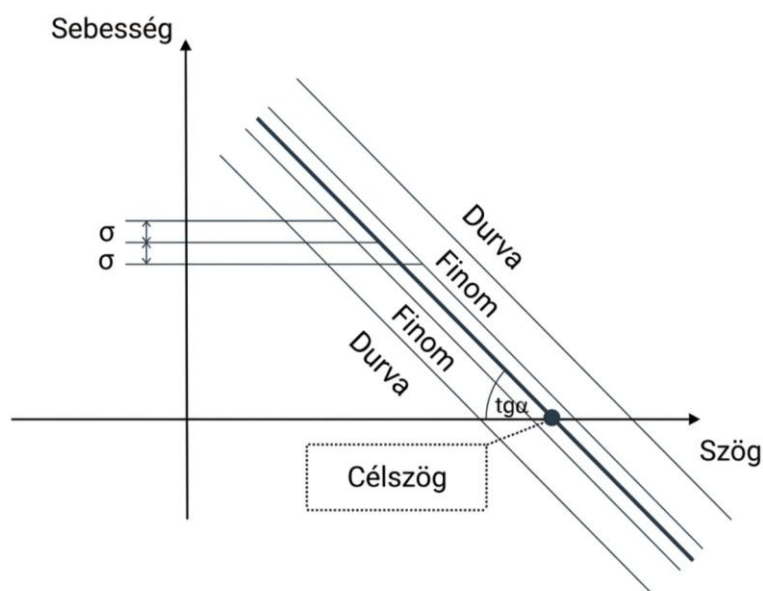
A robotkar kezdeti vizsgálatainál a klasszikus lineáris PID-alapú szabályozás a változó munkapontok és a nagyobb referenciahibák mellett kedvezőtlen átmeneti viselkedést adott. Nagyobb hibáknál jelentős túllövés, a különböző munkapontokban pedig eltérő minőségű beállási viselkedés jelentkezett. Emberközelí alkalmazásban ez nem kedvező, mert a nem szándékolt mozgások önmagukban is kockázatot hordoznak [7].

Ezért zónás, csúszómód jellegű szabályozást alkalmaztam, amely a hibát és a hibasebességet eltérő tartományokban különböző beavatkozási intenzitással kezeli. A szabályozás célja itt nem a lehető legdinamikusabb mozgás, hanem a korlátozott hibadinamika, a visszafogott túllövés és a véghelyzet közeli nyugodt viselkedés.

A két szabályozási logika közötti gyakorlati különbséget a következő összevetés foglalja össze a 10. táblázatban.

10. táblázat. A két szabályozási logika közötti gyakorlati különbség

Szempont	Egyszerű lineáris megközelítés	Zónás csúszómód jellegű megközelítés	Biztonságtechnikai jelentés
Munkapontérzékenység	A működés minősége erőbben függ a munkaponttól.	Jobban tűri a nemlineáris és változó üzemi tartományt.	Csökken a kiszámíthatatlan viselkedés kockázata.
Nagyobb hibák kezelése	Könnyebben jelenik meg túllövés és lengés.	A beavatkozás erősebb, de szabályozott tartományokhoz kötött.	Mérséklődik a nem szándékolt kilengés.
Véghelyzet közeli viselkedés	A beállítás minősége változó, maradhat lengés vagy drift.	Finomabb beavatkozás érhető el a célhelyzet közelében.	Nyugodtabb véghelyzet és kisebb maradó bizonytalanság várható.
Értelmezési fókusz	A pusztán pontosság kerül előtérbe.	A pontosság mellett a hibadinamika is kontroll alatt marad.	A passzív és az aktív biztonság együtt értelmezhető.



38. ábra: A csúszómód jellegű vezérlési tartományok szemléltetése

A 38. ábrán a σ a véghelyzet körüli holtsávot jelöli, amelyben a beavatkozási jel nem változik, ezáltal a lengés mérsékelhető. A tga a csúszóegyenest meredeksége, vagyis a

szögeltérés és a hibasebesség közötti kapcsolati arány. A zónák közötti átkapcsolás célja, hogy a szabályozó a nagy hibák tartományában gyorsan, a véghelyzet közelében pedig kíméletesebben avatkozzon be.

Az értékelési mutatókat három csoportba rendeztem. Az időalapú mutatók közé a beállási idő és a 10-90%-os emelkedési idő, a véghelyzeti mutatók közé a pontosság-proxy, az ismétlőképességi RMS, a hibaellipszis és a driftsebesség, a tranziens kockázatot pedig a túllövés, a csúcssebesség, a mozgásamplitúdó és az egyenletességi index tartozott.

A dinamikai többletmutatókat a szűrt pályákból származtatott sebesség-idősorokból és az elmozdulási válaszból számítottam. A pálya egyenletességét jerk-alapú, normalizált indexszel jellemeztem, minél nagyobb ez az érték, annál simább a mozgás. Az utólengési mutatókat csak akkor közöltem, ha a lecsengésből robusztus becslés volt adható.

A véghelyzeti viselkedést a beállási pontosság-proxy, az RMS ismétlőképesség, a 95%-os ekvivalens hibaellipszis és a driftsebesség írta le. Ezek a mutatók azt mutatják meg, hogy a célpont elérése után mennyi maradó bizonytalanság marad a rendszerben, vagyis a robot mennyire képes nyugodtan megállapodni.

A dinamikai többletmutatókat a mért beállási idő és túllövés alapján felírt alul csillapított másodrendű ekvivalens modell segítségével becsültem. A pálya egyenletességét az emelkedési szakasz átlagsebességének és a csúcssebességnek a hányadosaként definiált mutatóval jellemeztem, minél nagyobb ez az érték, annál egyenletesebb a mozgás.

A robusztusságot itt nem elvont szabályozásméleti tulajdonságként kezelem, hanem úgy, mint a kedvezőtlen átmeneti kitérések, a visszalendülés és a véghelyzet körüli maradó bizonytalanság korlátozhatóságát. A 11. táblázat és a 38. ábra ennek a több szempontú értékelésnek az összefoglalását adják.

5.3.1 Biztonságorientált teljesítményindex és szabályozási kompromisszum

A 5. fejezetben közölt metrológiai eredmények arra utalnak, hogy a lágy aktuátoros manipulátorok megítéléséhez célszerű olyan összetett indexet felírni, amely egyszerre veszi figyelembe a pontosságot és a tranziens kockázatot. A véghelyzeti RMS-hiba önmagában nem elegendő, ha közben a rendszer nagy csúcssebességgel, nagy túllövéssel vagy lassú drift mellett működik [7, 28].

$$J_{safe} = \alpha M_p + \beta T_s + \gamma e_{RMS} + \delta v_{drift} + \varepsilon I_u \quad (5.6)$$

A (5.6) összefüggésben J_{safe} az összetett biztonsági teljesítménymutató, M_p a túllövés, T_s a beállási idő, e_{RMS} a véghelyzeti ismétlőképesség, v_{drift} a maradó sodródás sebessége, I_u pedig a mozgás egyenletességi vagy impulzusszerűségét leíró mutató. Az $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ súlyok alkalmazásfüggő változók, de a képlet szerkezete fontos, miszerint az emberközeli üzemnél a tranziens és a maradó mozgás komponensei legalább olyan súllyal szerepelnek, mint a statikus pontosság.

A jelen mérési eredmények jó példát adnak. A videofelvétel adta a legkedvezőbb megbízható tranziensképet: a 10-90%-os emelkedési idő 0,141 s, a túllövés 11,90%, a driftsebesség 24,59 mm/s, az egyenletességi index pedig 0,312 volt. Bizonyos esetekben nagyobb mozgásamplitúdót és jelentős végállapotú sodródást mutatott 60,60 mm, illetve 110,65 mm/s.

A fenti index bevezetésének további haszna, hogy a szabályozó-hangolás célfüggvénye átirható tisztán pozicionálási feladatból kockázatminimalizálási feladattá.

A kontrollszintű biztonság további, gyakran alulértékelt eleme a munkapontfüggés. A PMI-hajtású rendszereknél a nyomás, az előterhelés és a geometriai áttétel együtt módosítja az effektív merevséget és csillapítást. Ennek megfelelően ugyanaz a szabályozó más tartományban más képet adhat. E jelenség miatt indokolt a szabályozó minősítését nem egyetlen referencia-pályára, hanem reprezentatív működési tartományra és több ciklusra alapozni. A disszertációban alkalmazott ciklusalapú metrológiai újraértékelés éppen ezt az igényt szolgálta ki.

A mutató gyakorlati szerepe az, hogy a szabályozó értékelésekor a beállási pontosság mellett a túllövés, a csúcssebesség, a drift és az egyenletesség is bekerül az összehasonlításba. Ez különösen a 3 szabadságfokú PMI platformon volt lényeges, ahol a kedvező véghelyzeti RMS nem minden esetben járt együtt kedvező tranziens viselkedéssel.

5.3.2 Paraméterhangolás és működési tartomány robusztussági szempontból

A zónás csúszómód-szabályozás gyakorlati értéke erősen függ attól, hogy a finom és durva zónák határai, valamint a hozzájuk rendelt korrekciós erősítések milyen működési tartományra lettek beállítva.

A hangolás során célszerű a paramétereket nem pusztán kísérleti úton, hanem fizikai jelentésük alapján rendezni. A λ paraméter a hiba és hibasebesség-csatolás erősségét adja

meg, a k_f és k_r a korrekció energikusságát, míg a σ_f és σ_r zónahatárok a megengedett nyugalmi hibasávot és a durva/finom beavatkozás közötti váltási pontot jelölik. Ha a durva zóna túl szűk, a szabályozó lomha lesz és a nagy hiba sokáig fennmarad. Ha túl széles, a beavatkozás szükségtelenül impulzív válik. Ugyanez igaz a finom zónára is: a túl keskeny holtáv rángatást, a túl széles holtáv pontatlanságot okoz.

$$\Omega_{bize} = \{ (q, p, m_L) : M_p \leq M_{(p,max)}, e_{RMS} \leq e_{lim}, v_{drift} \leq v_{lim} \} \quad (5.8)$$

Az (5.8) halmazban Ω_{bize} a szabályozó biztonságos működési tartománya, q a csuklószög, p az aktuátornyomás vagy munkapont, m_L a hasznos terhelés, $M_{(p,max)}$ a megengedett túllövés felső határa, e_{lim} az RMS-hiba határa, v_{lim} pedig a driftsebesség határa. A megfogalmazás lényege nem a pontos határértékek megadása, hanem annak kimondása, hogy a szabályozó elfogadható viselkedése többdimenziós tartományként értelmezendő.

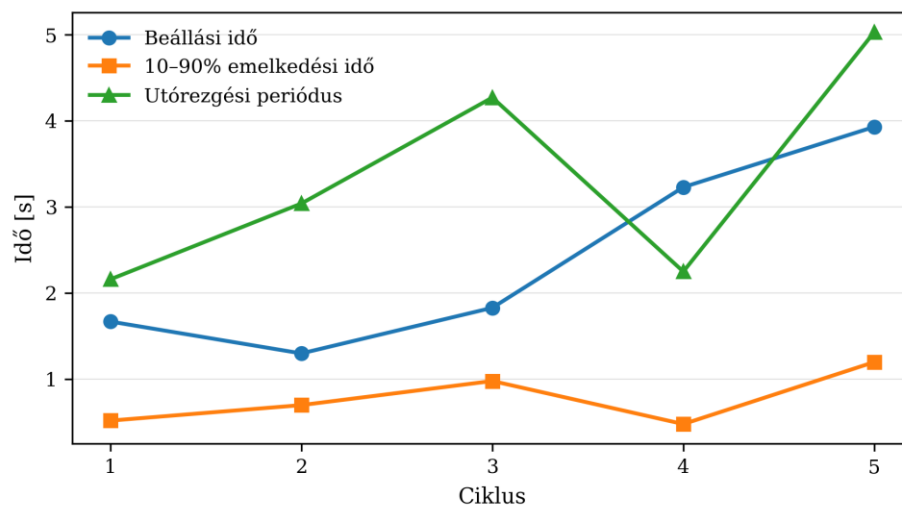
A működési tartomány szemlélete azért is fontos, mert a humanoid rendszereknél a különböző feladatok eltérő optimalizációt igényelnek. Egy kézi megvezetést támogató lassú mozgásnál a nyugodt véghelyzeti viselkedés és az alacsony csúcssebesség lehet elsődleges. Egy gyors pick-and-place feladatnál ugyanakkor valamivel nagyobb átmeneti dinamika is elfogadható lehet, ha a kontaktuskockázat alacsony. A szabályozó hangolását ezért célszerű feladat-specifikus biztonsági követelményekhez kötni, nem csupán abszolút pontossági célokhoz.

A jelen fejezet mérési módszere ezt az irányt készíti elő. Mivel a videóalapú újrakiértékelés egyszerre ad információt a pontosságról, a tranziensről és a végállapoti nyugalomról, a szabályozó paraméterei a jövőben olyan többcélú optimalizálási probléma részeként hangolhatók, amelynek célfüggvénye már eleve biztonságtechnikailag értelmezett. Ez különösen értékes lágy aktuátoros humanoid rendszereknél, ahol a klasszikus lineáris modellalapú hangolás gyakran nem ad elegendő kapaszkodót.

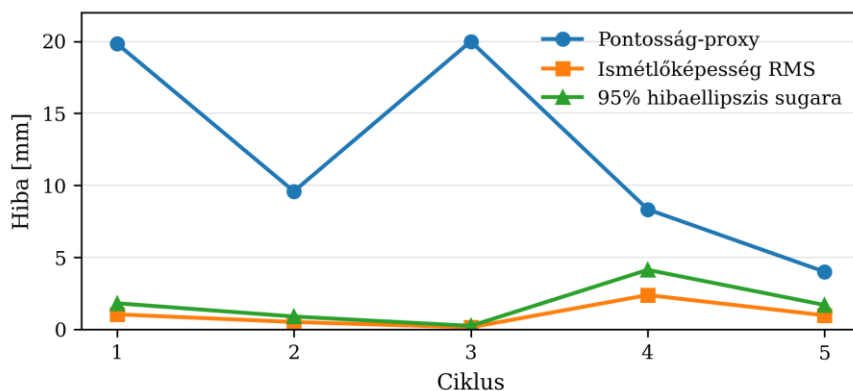
11. táblázat. A 3 szabadság fokú PMI-vel működtetett mechanizmus reprezentatív teljesítmény és dinamikai mutatói az öt vizsgált ciklus alapján.

Paraméter	Reprezentatív érték	Tartomány
Beállási idő [s]	1,83	1,30–3,93
10–90%-os emelkedési idő [s]	0,70	0,48–1,20
Beállási pontosság-proxy [mm]	9,59	4,01–20,00
Ismétlőképesség RMS [mm]	0,98	0,15–2,39
Túllövés [%]	7,46	0,93–24,79
Csúcssebesség [mm/s]	246,92	110,76–1094,03
Mozgásamplitúdó [mm]	18,40	7,06–41,23
Utólengési frekvencia [Hz]	0,329	0,199–0,462
Utólengési periódus [s]	3,04	2,16–5,03
Driftsebesség a végállapotban [mm/s]	1,20	0,31–2,87
Egyenletességi index [-]	0,068 (medián)	0,034–0,345
95%-os ekvivalens véghelyzeti hibaellipszis [mm]	$a = b \approx 1,70$	összevont: $a = b \approx 2,20$

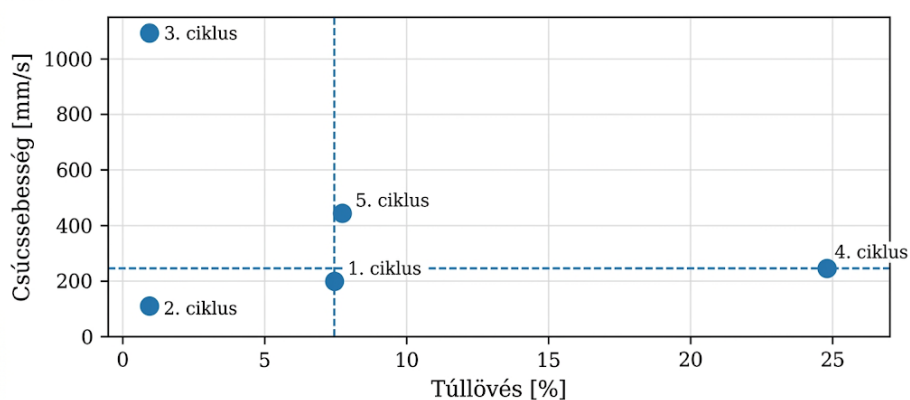
A 11. táblázat a reprezentatív értékeket foglalja össze. A tipikus beállási idő 1,83 s, a 10–90%-os emelkedési idő 0,70 s, az ismétlőképesség 0,98 mm RMS, a reprezentatív túllövés 7,46%, a domináns csillapodó lengési frekvencia pedig 0,329 Hz. A 39. és 40. ábrák ehhez képest azt mutatják meg, hogyan oszlanak el ezek a jellemzők az egyes ciklusok között. A 41. ábra pedig a túllövés és csúcssebesség kapcsolatát mutatja



39. ábra: Az időalapú mutatók ciklusonkénti alakulása (beállási idő, 10–90%-os emelkedési idő, csillapodó lengési periódus).



40. ábra: A hibamutatók ciklusonkénti alakulása



41. ábra: A túllövés és csúcssebesség kapcsolata

5.4 Kísérleti eredmények és biztonságtechnikai értelmezés

Az időalapú mutatók alapján a robot tipikusan 1,83 s alatt áll be, a 10-90%-os emelkedési idő pedig 0,70 s nagyságrendű. A legkedvezőbb időalapú összképet a 2. ciklus adta, ahol a beállási idő 1,30 s, a túllövés 0,93%, az egyenletességi index pedig 0,345 volt. Ezzel szemben az 5. ciklus a lassú lecsengés miatt kedvezőtlenebb, mert itt a beállási idő 3,93 s-ra, a csillapodó lengési periódus pedig 5,03 s-ra nőtt.

A véghelyzeti mutatók azt mutatják, hogy a szabályozás tipikusan jó-közepes végállapoti ismétlőképességet biztosított. A reprezentatív RMS hiba 0,98 mm, a 95%-os ekvivalens hibaellipszis sugara $a = b \approx 1,70$ mm, konzervatív összevont becsléssel pedig $a = b \approx 2,20$ mm. A legkisebb véghelyzeti szórást a 3. ciklus adta, ahol az RMS hiba 0,15 mm, a hibaellipszis sugara pedig 0,25 mm volt.

A kedvező véghelyzeti szórás ugyanakkor nem jelent automatikusan kedvező tranziens viselkedést. A 3. ciklusban a csúcsebesség 1094 mm/s, a mozgásamplitúdó pedig 41,2 mm volt, vagyis a végállapoti pontosság nem párosult feltétlenül nyugodt átmenettel. A legkedvezőtlenebb tranziens a 4. ciklusban jelent meg, ahol a túllövés 24,79% volt, és ezzel együtt az RMS hiba 2,39 mm-re, a 95%-os hibaellipszis 4,14 mm-re nőtt.

A végállapotban mért reprezentatív driftsebesség 1,20 mm/s nagyságrendű volt, a domináns csillapodó lengés pedig 0,329 Hz, vagyis kb. 3,04 s periódusú. Ez azt jelenti, hogy a célhelyzet elérése után is marad egy lassú, lecsengő dinamika, amelyet a szabályozás minősítésekor figyelembe kell venni.

A ciklusok összevetése jól mutatja, hogy a gyors beállítás, a kicsi véghelyzeti szórás és a kedvező tranziens nem ugyanaz a tulajdonság. A 2. ciklus adta a legegyszerűsebb mozgást, a 3. ciklus a legkisebb véghelyzeti szórást, a 4. ciklus pedig a legrosszabb túllövést. Ebből az következik, hogy a szabályozás megítéléséhez több mutató együttes vizsgálata szükséges.

Biztonságtechnikai szempontból ez azért lényeges, mert emberközeli működésben nem elegendő a célhelyzet egyszeri elérése. A szabályozásnak azt is biztosítania kell, hogy a robot a célhelyzet közelében ne hozzon létre újabb, kisebb amplitúdójú, de nem szándékolt mozgásokat. A kapott eredmények alapján a robusztus szabályozás a biztonságtechnikai architektúra aktív rétegeként értelmezhető.

5.5 A H4 hipotézis igazolása

A H4 hipotézist a vizsgált 3 szabadságfokú PMI-hajtású laborplatformon, a megadott pozicionálási feladatra és működési tartományra a kapott eredmények alátámasztják. A videóalapú, kis elemszámú és közelítő metrológiai újrakiértékelés azt mutatta, hogy a robusztus, zónás csúszómód jellegű szabályozás a vizsgált körülmények között kedvezőbben korlátozta a túllövést, a lecsengő lengést és a véghelyzeti bizonytalanságot, mint az egyszerű lineáris referencia-megközelítés.

A fejezet hozzájárulása ezért nem platformfüggetlen fölénybizonyítás, hanem annak bemutatása, hogy ezen a lágy aktuátoros rendszeren a biztonságtechnikailag kedvezőbb tranziens viselkedés robusztus nemlineáris szabályozással jobban elérhető. A kvantitatív mutatók a vizsgált videóanyag és a közelítő képalapú kiértékelés érvényességi tartományában értelmezhetők.

A H4 hipotézis tehát olyan értelemben nyert alátámasztást, hogy a vizsgált laborplatformon a biztonságosan elfogadható működéshez nem elegendő a statikus pontosság, hanem mérsékelt tranziens és kiszámítható véghelyzeti viselkedés is szükséges.

6 MESTERSÉGES INTELLIGENCIA ALAPÚ VEZÉRLÉS ÉS BIZTONSÁGOS BETANÍTÁS

Ebben a fejezetben azt vizsgálom, hogyan vezethető be tanuló algoritmus fizikai rendszerre úgy, hogy maga a betanítás se váljon indokolatlan kockázati forrássá. A kérdés itt nem az, hogy a neurális megközelítés minden mutatóban jobb-e a klasszikus szabályozásnál, hanem az, hogy a tanulás melyik szervezési módja vihető át biztonságosan valós hardverre [29, KD8, 31]. A tanuló vezérlés újabb hullámát a nagyobb, általánosabb modellrétegek megjelenése is erősíti a humanoid mozgásvezérlésben [131].

A 3-5. fejezetek a biztonságos működés fizikai rétegeit tették mérhetővé: a kontaktus felismerését, a védelmi reakció késleltetését és a szabályozott mozgás nyugalmát. A jelen fejezet ehhez kapcsolódva azt mutatja meg, hogyan kezelhető a fejlesztési kockázat, amikor a vezérlő maga tanulási folyamat során alakul ki.

A vizsgálatot egy saját tervezésű és építésű alacsony energiájú, jól kontrollálható asztalgolyó rendszeren végeztem el. Ez a rendszer nem humanoid platform, de a nemlineáris viselkedés, a próba-hiba alapú tanulás és a szimuláció-valóság eltérés problémáját jól elkülöníthető formában jeleníti meg. Emiatt a H5 hipotézishez itt elsősorban módszertani bizonyítást adok.

6.1 A kísérleti rendszer és kísérleti protokoll

A vizsgált rendszerben egy acélgolyó mozog egy két tengely mentén dönthető lapon, miközben a lap helyzetét két szervomotor állítja. Az asztal-golyó rendszer a nemlineáris szabályozás klasszikus modellje, ezért jól használható arra, hogy a tanuló algoritmus és a hagyományos szabályozás viselkedése ellenőrzött környezetben legyen összevethető [30].

A fizikai berendezés kisméretű, kompakt és alacsony energiájú volt. Ez nemcsak laboratóriumi egyszerűséget, hanem kísérletbiztonsági előnyt is jelentett, mert a hibás akciók következményei kezelhető tartományban maradtak. A rendszer ezért alkalmas volt arra, hogy a betanítási stratégiák közötti különbségek valós hardveren is mérhetőek legyenek. A rendszert a 42. ábra és a 43. ábra szemlélteti.

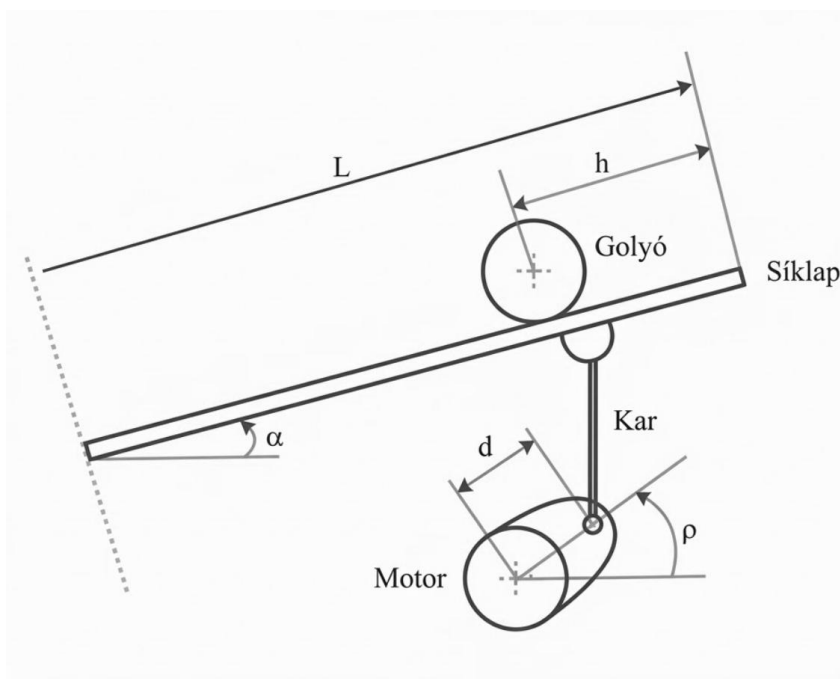


42. ábra: Az asztal-golyó rendszer szemléltetése

A mechanikai egyszerűsítés szerint az x és y irányok egymástól függetlenül modellezhetők. A golyó gyorsulása a tálca dőlésével arányos, ezért a rendszer jó kiindulópontot ad a szimuláció és a valós működés közötti átmenet vizsgálatához.

$$a_x = g \sin \alpha, \quad a_y = g \sin \beta \quad (6.1)$$

A modell természetesen idealizált, mert a valós rendszerben a gördülési ellenállás, a szenzor zaj és a szervó mozgás nemlinearitása is jelen van. Éppen ez a különbség teszi a szimuláció-valóság átmenet kérdését módszertanilag lényegessé. A szerkezeti elrendezést a 43. ábra mutatja.



43. ábra: A rendszer egyszerűsített kinematikai modellje

6.2 A virtuális környezet és a betanítási forgatókönyvek

A valós rendszer mellett egy virtuális környezetet is kialakítottam, amely az asztal-golyó rendszer kinematikai és szabályozási jellemzőit egyszerűsített formában képezte le. A szimuláció célja nem a teljes fizikai azonosság, hanem a kezdeti, sok hibával járó felfedezési szakasz leválasztása volt a valós hardverről [KD8, 93].

A virtuális környezet szerepe ezért kettős. Egyrészt lehetővé teszi az állapottér, az akciótér és a jutalmazási szerkezet gyorsabb hangolását, másrészt áthelyezi a korai exploráció kockázatának egy részét a fizikai rendszerről egy kezelhetőbb közegbe.

A tanítási eljárás három forgatókönyvet különített el: kizárólag valós környezetben végzett tanulást, kizárólag virtuális környezetben végzett tanulást, valamint virtuális előtanítást követő valós finomhangolást. Az összehasonlítás alapjaként hagyományos PID szabályozást is alkalmaztam.

A rendszer ezen a ponton azért lényeges, mert rajta a tanítási rendszer minősége közvetlenül megfigyelhető, miközben a hibás döntések kockázata még kezelhető. Így a tanítási stratégia hatása elválasztható a nagy energiájú vagy összetettebb robotrendszerekből származó zavaró tényezőktől.

A rendszer alacsony energiájú, de instabil rendszer, ezért jól látható rajta, ha a policy túl agresszív, bizonytalan vagy lassan áll be. Ez teszi alkalmassá arra, hogy a betanítási stratégiák közötti különbségek ne csak algoritmikus, hanem fizikai viselkedésben is értelmezhetők legyenek.

A szimuláció ebben a fejezetben nem a valóság teljes másolata, hanem kockázatsökkentő eszköz. A cél az volt, hogy a rossz kezdeti akciók minél kisebb hányada a valós hardveren jelenjen meg.

$$\begin{aligned} a_x &= g \sin \alpha, & a_y &= g \sin \beta \\ a_x &\approx g \alpha, & a_y &\approx g \beta \quad (|\alpha|, |\beta| \ll 1) \end{aligned} \quad (6.2)$$

A fizikai modell egyszerűsége lehetővé tette, hogy a szimuláció és valóság eltérésének hatása világosan megfigyelhető legyen. Ez különösen a tisztán virtuális tanítás és a valós finomhangolás összevetésénél vált fontossá.

A mély Q-tanulás (DQN) állapotleírása a golyó helyzetét, sebességét, a tálca dőlésszögeit és az előző akciót tartalmazta. Ez az információhalmaz elegendő volt ahhoz, hogy a policy ne csak a pillanatnyi helyzetre, hanem a mozgás közvetlen előzményére is reagáljon.

$$s_t = [x_t, y_t, v_{x,t}, v_{y,t}, \alpha_t, \beta_t, \Delta\alpha_{t-1}, \Delta\beta_{t-1}]^T \quad (6.3)$$

Ahol s_t az aktuális állapotvektor, x_t és y_t a golyó helyzete, $v_{x,t}$ és $v_{y,t}$ a sebességkomponensek, α_t és β_t a tálca dőlésszögei, $\Delta\alpha_{t-1}$ és $\Delta\beta_{t-1}$ pedig az előző lépésben kiadott akciók.

Az állapotleírás gyakorlati jelentősége abban áll, hogy a rendszer részben késleltetett és nemlineáris viselkedése így közvetve megjelenik a tanulásban is.

Ebből az következik, hogy a betanítás minősége nemcsak a neurális háló méretétől, hanem az állapot- és akcióter helyes megválasztásától is függ. A fejezet szempontjából ez azért lényeges, mert a rosszul megválasztott reprezentáció felesleges valós próbálkozásokhoz vezethet.

6.3 Az értékelési mutatók és a PID referencia

Az értékelés fő mutatói az átlagos pozícióhiba, a beállási idő és az átlagos golyósebesség voltak. Ezek együtt mutatják meg, hogy a szabályozó mennyire pontos, mennyire gyors és közben mennyire nyugodt mozgást hoz létre.

A PID referencia azért szükséges, mert kijelöli a klasszikus referenciát. A cél annak megmutatása, hogy a tanuló szabályozás milyen bevezetési stratégiával vihető át a valós rendszerre úgy, hogy a kockázatos valós próbálkozások száma csökkenjen.

A DQN műszaki tartalmát az állapotleírás, az akcióter és a jutalmazási szerkezet együttese határozta meg. E három elem nemcsak a tanulás minőségét, hanem a tanítás közbeni fizikai viselkedést is befolyásolja, ezért biztonságtechnikai szempontból sem közömbös a megválasztásuk.

A jutalmazási függvény úgy került kialakításra, hogy ne csak a középpont elérését, hanem a nyugodt és kis energiájú mozgást is előnyben részesítse. Ez azért lényeges, mert alacsony pozícióhiba mellett is kialakulhat kedvezőtlen, oszcilláló vagy túl gyors mozgás.

Biztonságtechnikai olvasatban tehát ugyanazok a mutatók maradnak fontosak, mint a korábbi fejezetekben: nem elég a célhelyzet elérése, a beavatkozás dinamikájának is kezelhetőnek kell maradnia.

$$R_t = \max\{K_t - (x_t^2 + y_t^2) - (v_{x,t}^2 + v_{y,t}^2), 0\} \quad (6.4)$$

$$K_t = 10 \text{ ha } (x_t, y_t) \in C, \text{ különben } K_t = 0$$

A jutalomfüggvényben R_t az aktuális jutalom, K_t a középpont körüli preferált tartományhoz rendelt bónusz, x_t és y_t a relatív helyzethibák, $v_{x,t}$ és $v_{y,t}$ pedig a sebességkomponensek. A C halmaz a célzónát jelöli, ha a golyó ebben marad, a bónusz aktív, ellenkező esetben nullává válik.

A kiválasztott metrikák ezért nemcsak teljesítménymutatók, hanem a betanítási stratégia kockázati tartalmának indikátorai is. A rövidebb beállási idő, a kisebb hiba és a mérsékelt golyósebesség együtt jelez kedvezőbb működést.

$$Q(s_t, a_t) = R_t(s_t, a_t) + \gamma \max_{a'} Q(s_{t+1}, a') \quad (6.5)$$

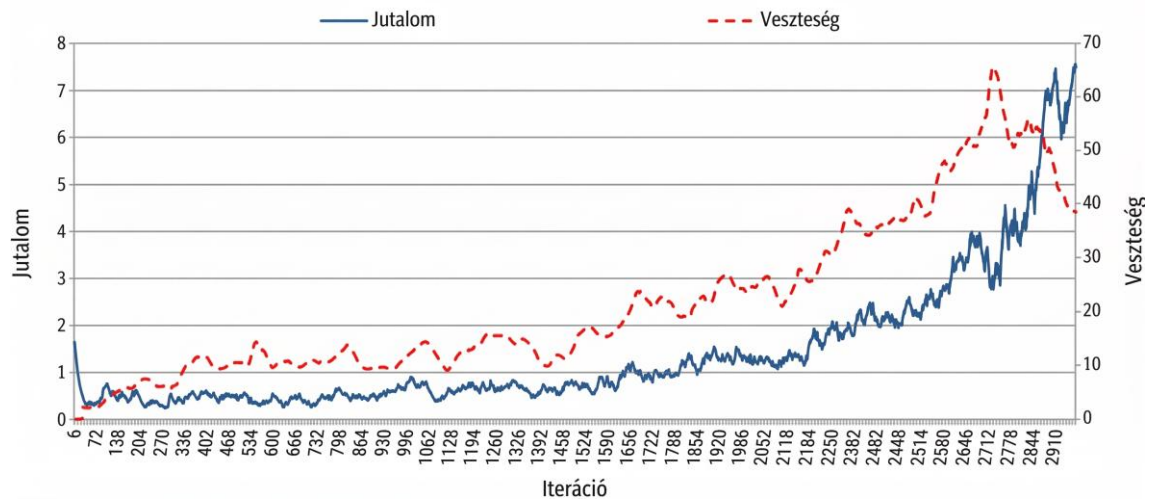
$$L(\theta) = \mathbb{E} \left[\left(Q_\theta(s, a) - \left(r + \gamma \max_{a'} Q_\theta(s', a') \right) \right)^2 \right] \quad (6.6)$$

A (6.5) összefüggésben $Q(s_t, a_t)$ az állapot-akció párhoz rendelt várható kumulatív jutalom, γ a diszkonttényező, s_{t+1} a következő állapot, a' pedig a lehetséges következő akció. A (6.6) veszteségfüggvényben $L(\theta)$ a minimalizálandó cél, θ a neurális háló

paramétervektora, r a közvetlen jutalom, a minimalizálás célja, hogy a háló a Bellman-típusú célértékhez illeszkedjen.

6.4 Eredmények és biztonsági értelmezés

A DQN ágensek tanítása virtuális és valós környezetben is megtörtént. Harmadik vizsgálatként a virtuális környezetben előtanított ágenszt valós környezetben finomhangoltam. Mivel a virtuális környezet méretei és paraméterei a valós rendszerhez igazodtak, az eredmények közvetlenül összehasonlíthatók voltak. A valós környezetben végzett tanítás során megközelítőleg 3000 iterációra volt szükség ahhoz, hogy az ágens stabilan képes legyen a golyót az asztal középpontja közelében tartani. Tapasztalati alapon az átlagosan körülbelül 7-es jutalomérték már megfelelő szabályozási teljesítményre utalt, amit a 44. ábra szemléltet.

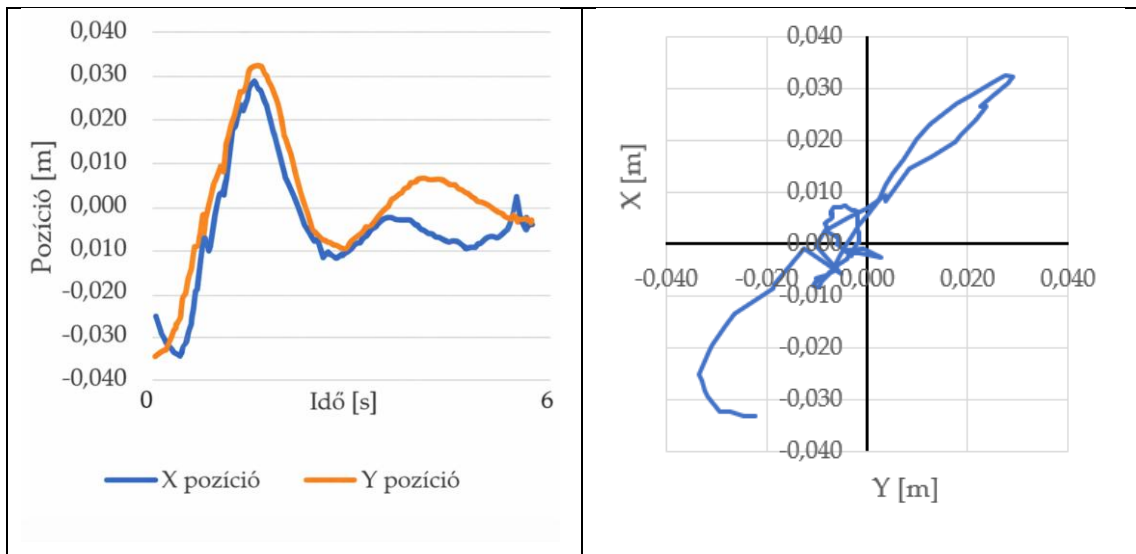


44. ábra: Tanítás valós környezetben.

Az egyes próbák során gyűjtött átlagos jutalomértékek. Tapasztalati alapon a megközelítőleg 7-es átlagos jutalom azt jelezte, hogy az ágens képes a golyót a középpont közelében tartani.

Valós környezetben a tanítás időigénye jelentős volt, mivel egy próba 6 másodpercig tartott, így a teljes tanulási folyamat hozzávetőleg 6 órát vett igénybe. Ezzel szemben a virtuális környezetben a tanítás néhány perc alatt végrehajtható volt, és ehhez megközelítőleg 1700 iteráció is elegendőnek bizonyult. A virtuális előtanítást követően a valós környezetben már mintegy 300 további iteráció elegendő volt a finomhangoláshoz, ami kevesebb mint 1 óra további tanítási időt jelentett.

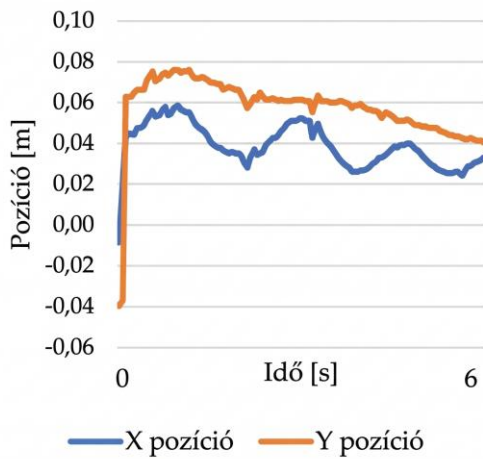
A valós környezetben mind a valós rendszerben tanított, mind a kizárólag virtuális környezetben tanított ágenseket teszteltem. A valós környezetben tanított ágens esetében a rendszer képes volt a golyót a középpont közelében tartani.



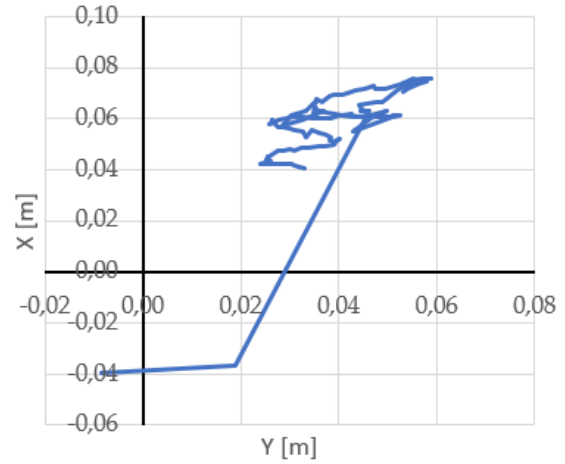
45. ábra: Példafutás valós környezetben valós rendszerben tanított ágens alkalmazásával: a) az X és Y helyzetkoordináták időfüggvénye, b) a helyezési pontosság kétdimenziós ábrázolása.

A kiértékeléshez 200 darab, egyenként 6 másodperces tesztfutást végeztem. Ebben az esetben az átlagos helyzethiba az X irányban 2,1 mm, az Y irányban 2,0 mm volt. Az átlagos beállási idő 3,4 s-nak, míg a golyó átlagos sebessége $v = 0,27\text{m/s}$ -nak adódott mint ahogy a 45. ábra is szemlélteti.

Amennyiben az ágens kizárólag virtuális környezetben került tanításra, a valós rendszerben ugyan képes volt a golyót az asztalon tartani, azonban azt tartósan a középponttól távol szabályozta, hozzávetőlegesen $Y = 40\text{mm}$ és $X = 60\text{mm}$ környezetében. Ez az eltérés a tesztfutások során következetesen megjelent, és elsősorban a virtuális és a valós környezet közötti különbségekre, valamint a valós rendszer helyzetmérési és szabályozási bizonytalanságaira vezethető vissza.



a)

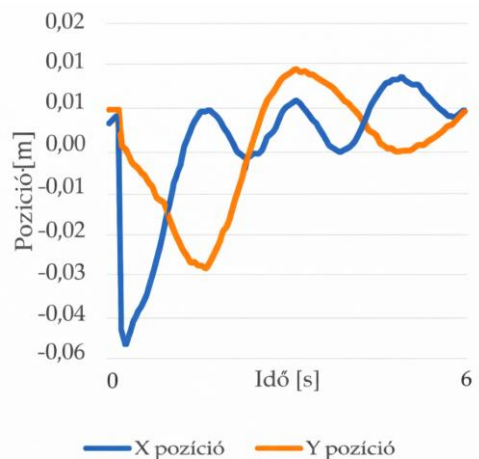


(b)

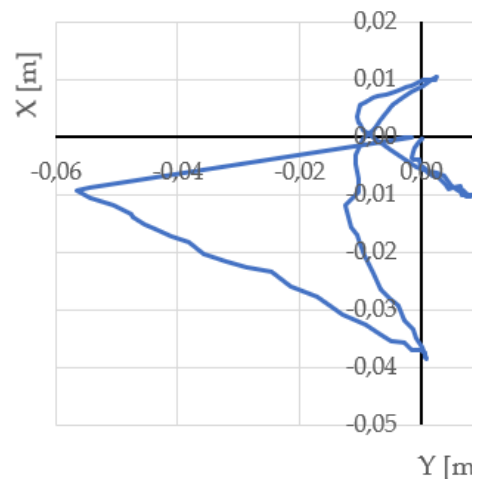
46. ábra: Példafutás valós környezetben kizárólag virtuális környezetben tanított ágens alkalmazásával: a) az X és Y helyzetkoordináták időfüggvénye, b) a pozíciók kétdimenziós eloszlása.

Kétszáz darab, 6 másodperces tesztfutás alapján az átlagos helyzethiba $X = 45\text{mm}$ és $Y = 61\text{mm}$ volt. Az átlagos beállási idő 5,6 s-nak adódott, ugyanakkor a rendszer a középpontot nem érte el. A golyó átlagos sebessége ebben az esetben $v = 0,30\text{m/s}$ volt, amint a 46. ábra szemléltet.

A virtuális környezetben előtanított, majd valós környezetben finomhangolt ágens esetében megfigyelhető volt, hogy a finomhangolás jelentősen csökkentette a kizárólag virtuális tanításból adódó helyzeteltolódási hibát.



a)

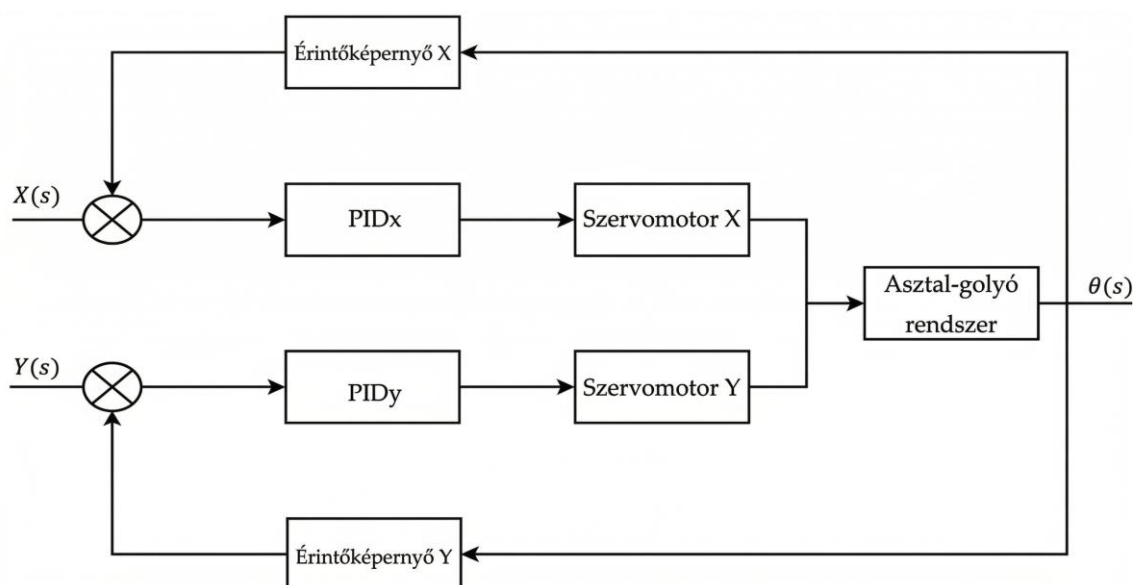


(b)

47. ábra: Példafutás valós környezetben előtanított és valós környezetben finomhangolt ágens alkalmazásával: a) az X és Y helyzetkoordináták időfüggvénye, b) a pozíciók kétdimenziós ábrázolása.

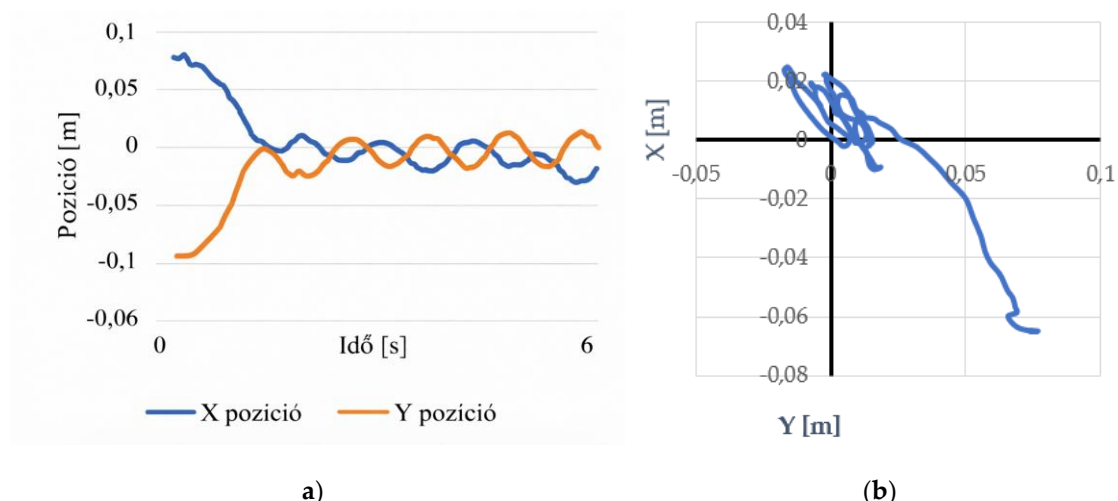
Kétszáz tesztfutás alapján az átlagos helyzethiba $X = 3,1\text{mm}$, illetve $Y = 5,7\text{mm}$ volt. Az átlagos beállási idő $2,8\text{ s}$ -nak, míg a golyó átlagos sebessége $v = 0,36\text{m/s}$ -nak adódott, amit a 47. ábra szemléltet.

Összehasonlítási alapként mindkét tengelyre külön PID szabályozót alkalmaztam. Ebben a megközelítésben az egyes tengelyek külön-külön asztal-golyó részrendszerként kezelhetők: a PID_x szabályozó az X , míg a PID_y szabályozó az Y tengely szabályozásáért felel. Kísérleti finomhangolás után a legjobb eredményt az alábbi paraméterek adták: $K_{px} = 0,75$, $K_{py} = 0,8$, $K_{ix} = 0,9$, $K_{iy} = 0,8$, $K_{dx} = 0,8$, $K_{dy} = 0,75$.



48. ábra: A PID szabályozási rendszer felépítése.

A PID szabályozóval kapott eredmények alapján a helyezési pontosság és a golyó átlagos sebessége nagyságrendileg hasonló volt a neurális hálózatos megoldásokéhoz, ugyanakkor az átlagos beállási idő kedvezőbbnek adódott. A PID-alapú szabályozás tipikus működését a 48. ábra szemlélteti. Megjegyzendő, hogy a középre állított asztal vízszintestől való eltérése kedvezőtlenül befolyásolhatja a PID szabályozó pontosságát, míg a megerősítéses tanuláson alapuló módszerek az ilyen eltérésekhez könnyebben tudnak alkalmazkodni.



49. ábra: Példafutás valós környezetben PID szabályozás alkalmazásával: a) az X és Y helyzetkoordináták időfüggvénye, b) a pozíciók kétdimenziós ábrázolása.

Száz PID-alapú tesztfutás alapján az átlagos helyzethiba az X irányban 2,1 mm, az Y irányban 2,2 mm volt. Az átlagos beállási idő 1,3 s-nak, míg a golyó átlagos sebessége $v = 0,26\text{m/s}$ -nak adódott, amit a 49. ábra szemléltet.

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a kizárólag virtuális környezetben tanított ágens valós környezetben önmagában nem biztosított megfelelő pontosságot, ugyanakkor a valós környezetben végzett finomhangolás jelentősen javította a teljesítményt. A PID szabályozó továbbra is kedvezőbb beállási időt mutatott, míg a neurális hálózatos megközelítések fő előnye az alkalmazkodóképességben és a környezeti eltérésekhez való rugalmasabb igazodásban jelent meg. A tanítási módok és a PID szabályozás összehasonlítása az asztal-golyó rendszeren a 12. táblázatban foglaltam össze.

12. táblázat. A tanítási módok és a PID szabályozás összehasonlítása az asztal-golyó rendszeren.

Módszer	Átlagos X hiba [mm]	Átlagos Y hiba [mm]	Átlagos beállási idő [s]	Átlagos golyósebesség [m/s]
Valós környezetben tanított DQN	2,1	2,0	3,4	0,27
Virtuális környezetben tanított DQN	45	61	5,6	0,30
Virtuális előtanítás + finomhangolás	3,1	5,7	2,8	0,36

PID szabályozás	2,1	2,2	1,3	0,26
-----------------	-----	-----	-----	------

Az eredmények egyértelműen megmutatták a szimuláció és a valós rendszer közötti rés jelentőségét. A tisztán virtuálisan tanult szabályozó közvetlen alkalmazása a valós rendszeren nem adott elfogadható pozicionálási pontosságot, és a beállási idő is kedvezőtlen maradt.

A kísérleti eredmények egyik lényegi következtetése, hogy a szimulációs előtanítás elsődleges előnye nem a végső pontosságban, hanem a mintahatékonyságban jelenik meg. A kizárólag virtuális modell közvetlen valós alkalmazása nem elegendő, a korlátozott valós finomhangolás azonban lényegesen csökkentette a szükséges valós próbálkozások számát.

6.5 A H5 hipotézis igazolása

A H5 hipotézist a kapott eredmények módszertani értelemben alátámasztják. Az alacsony energiájú asztal-golyó rendszeren végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a tisztán valós próba-hiba alapú tanítás jelentős idő és hardverterheléssel jár. A valós környezetben végzett tanítás megközelítőleg 3000 iterációt és mintegy 6 órát igényelt, míg a tisztán virtuálisan tanított ágens közvetlen valós alkalmazása önmagában nem adott elfogadható pozicionálási eredményt. A fő hozzájárulás ezért nem egy humanoid platformon igazolt teljesítményelőny, hanem annak kísérleti bemutatása, hogy a szimulációs előtanítás és a korlátozott valós finomhangolás kombinációja csökkentheti a valós hardveren végzett kockázatos próbálkozások számát [KD8].

Tervezési következtetésként megállapítható, hogy érzékeny vagy biztonságkritikus robotikai hardveren a tanuló szabályozás közvetlen valós környezetben történő indítása nem célszerű. A korai, nagy hibákkal járó tanulási szakaszt szimulációban kell elvégezni, majd a valós rendszeren csak korlátozott finomhangolást és validációt indokolt végrehajtani. Ez a megközelítés csökkenti a hardverterhelést, mérsékli a hibás beavatkozások kockázatát, és biztonságosabb átmenetet biztosít a tanult vezérlés valós alkalmazása felé. Mindezek alapján a H5 hipotézis a vizsgált alacsony energiájú demonstrátoron, módszertani és biztonságtechnikai értelemben igazoltnak tekinthető: a szimulációs előtanítás nem helyettesíti a valós validációt, de jelentősen csökkentheti a valós hardveren végzett kockázatos próba-hiba tanítás mértékét.

ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

Az értekezés célja annak bemutatása volt, hogy a humanoid robotok biztonsága csak többdimenziós, egymásra épülő mérnöki keretben vizsgálható. A dolgozat öt hipotézise ezt a kérdést a fogalmi és szabványi kerettől a kontaktusészlelésen, a reakciódinamikán és a robusztus szabályozáson át a tanuló vezérlések biztonságos bevezetéséig egységes logikában tárgyalta.

A H1 hipotézist a szakirodalmi feltárás eredményei erősen alátámasztották: a humanoid robotok biztonsága nem írható le kizárólag klasszikus gépbiztonsági vagy ipari robotcellákra épülő kockázatértékelési szemlélettel. A fizikai biztonság, a kiber-fizikai működés, a szabványi megfelelés, valamint a társadalmi és etikai tényezők egymástól nem független rétegek, hanem közösen határozzák meg a humanoid rendszerek biztonságos alkalmazhatóságát.

A H2 hipotézis vizsgálata alapján a kvázi-statisztikus és tranziens kontaktusok több szenzor együttes kiértékelésével a vizsgált rendszerben elkülöníthetők. Az eredmények fő üzenete nem egy végleges osztályozó megadása, hanem annak bizonyítása, hogy az kontaktusdetektálás, a korrelációs információ és a relatív mozgástartalék együtt használható alapot ad a biztonságkritikus kontaktusminősítéshez.

A H3 hipotézishez tartozó mérések igazolták, hogy a PMI-hajtású ízület védelmi reakcióját eltérő időléptékű mechanikai és pneumatikus folyamatok alakítják. Az előterhelés növekedése ezzel párhuzamosan a kontaktus súlyosságát növelte, ezért a működési pont megválasztása maga is biztonságtechnikai tervezési feladat.

A H4 hipotézis eredményei azt támasztották alá, hogy a vizsgált lágy aktuátoros laborplatformon a robusztus nemlineáris szabályozás kedvezőbben korlátozza a kedvezőtlen tranzienseket, mint az egyszerű lineáris referencia-megközelítés. A biztonságtechnikailag lényeges különbség itt nem pusztán a statikus pontosságban, hanem a túllövés, a lecsengő lengés és a véghelyzeti nyugalom együttes alakulásában jelent meg.

A H5 hipotézis eredményei módszertani értelemben azt támasztották alá, hogy a tanuló vezérlések biztonságos bevezetésének kulcsa a szimulációs előtanítás, a korlátozott valós finomhangolás és a védelmi logikák rétegzett kombinációja. A hozzájárulás lényege itt nem általános teljesítményfölény, hanem a fejlesztési kockázat mérnöki csökkentése.

A dolgozat fő szintézise, hogy a humanoid robotok biztonsága rétegzett mérnöki architektúraként írható le. Ebben a gyors eseményészlelés, a kontaktusprofil minősítése, a mitigációs reakció, a stabil visszarendező szabályozás és a tanuló komponensek kockázatkorlátozott bevezetése egymást feltételező funkciók, nem egymást helyettesítő megoldások.

Ebből az következik, hogy a humanoid rendszerek biztonságos bevezetésének minimális mérnöki sorrendje a többrétegű kockázátértelmezés, a detektálási és minősítési csatornák megtervezése, a reakciódinamika valós hardveres validálása, a normál üzemi mozgás robusztus tranzienskorlátozása, végül pedig a tanuló komponensek fokozatos integrálása.

A kutatás érvényességi határa, hogy a legtöbb saját mérés redukált laborplatformon történt. A dolgozat tudományos értékét ezért nem egyetlen teljes humanoid rendszerre vonatkozó közvetlen általánosítás, hanem a skálázható tervezési elvek azonosítása adja: gyors kontaktusdetektálás, konfigurációfüggő súlyosság, kétidőskálás mitigáció, robusztus tranzienskorlátozás és biztonságos sim-to-real bevezetés.

Új tudományos eredmények

1. Saját publikációimra építve kidolgoztam a humanoid és kollaboratív robotok biztonságának integrált értelmezési keretét, amely a fizikai biztonságot, a kiberbiztonságot és szoftveres robusztusságot, a szabványi-szabályozási megfelelést, valamint az etikai-társadalmi dimenziókat egymással összefüggő biztonsági réteggént kezeli. Az eredmény rámutat arra, hogy a humanoid robotok biztonsága nem írható le kizárólag klasszikus gépbiztonsági vagy robotcellás kockázátértékelési logikával, hanem többdimenziós, kiber-fizikai és emberközpontú mérnöki megközelítést igényel. [KD1].
2. PMI-hajtású kísérleti mérőrendszeren igazoltam, hogy a kvázi-statisztikus és tranziens kontaktusok multimodális szenzorfüziónal elkülöníthetők. A terhelőerő, a nyomás, az elmozdulás és az FSR-alapú kontaktusjel együttes kiértékelésével olyan kontaktusprofil-értelmezési módszert alapoztam meg, amely alkalmas a kontaktus kezdetének és súlyosságának rétegzett becslésére [KD4].
3. Kvantitatívan meghatároztam a PMI-hajtású humanoid ízület előterhelésfüggő védelmi reakciódinamikáját. Kimutattam, hogy a mechanikai tehermentesülés és a pneumatikus nyomáskiegyenlítődés eltérő időskálán zajlik, valamint igazoltam, hogy az előterhelés növekedése növeli az ütközés során átadott impulzust. Az eredmény alapján az

előterhelés nem csupán üzemi paraméter, hanem önálló biztonságtechnikai kockázati tényező [KD5].

4. Egy 3 szabadságfokú PMI-hajtású laborplatform megőrzött kísérleti videóalapú, közelítő metrológiai értékelésével számszerűsítettem a zónás csúszómód-szabályozás biztonságtechnikailag releváns jellemzőit. Az eredmények a vizsgált tartományban azt támasztották alá, hogy a robusztus nemlineáris szabályozás kedvezőbben korlátozza a túllövést, a lecsengő lengést és a véghelyzeti bizonytalanságot [KD7].

5. Egy nemlineáris asztal-golyó kísérleti rendszeren igazoltam, hogy a tanuló vezérlések biztonságos bevezetésében a szimulációs előtanítás és a korlátozott valós finomhangolás kombinációja mérnökiileg kedvezőbb, mint a tisztán valós próba-hiba alapú tanítás. [KD8].

Az új tudományos eredmények közös sajátossága, hogy mindegyik közvetlenül saját publikációra támaszkodik, amit a 13. táblázatban foglaltam össze, ugyanakkor a disszertációban egymásra épülő rendszerlogikaként jelenik meg.

13. táblázat: Saját közlemények, a hipotézisek és a disszertáció fő fejezeteinek kapcsolata

Irodalomjegyzék	Hivatkozás	Saját közlemény	Hipotézis	Fejezet
[16]	[KD1]	Safety Engineering for Humanoid Robots in Everyday Life—Scoping Review (Q2)	H1	2.
[132]	[KD2]	The Safety of Collaborative Robotics – A Review	H1	2.
[102]	[KD3]	Kollaboratív robotok ipari alkalmazása – áttekintés	H1	2.
[19]	[KD4]	Analysis of Collision Types in Collaborative Robots Using Mechanism Actuated by Pneumatic Artificial Muscle (Q2)	H2	3.

[20]	[KD5]	Preload-Dependent Protective Reaction Latency in Pneumatic Artificial Muscle Actuated Humanoid Joint (Q2)	H3	4.
[133]	[KD6]	Kollaboratív funkció megvalósítása négy szabadságfokú robotkaron	-	-
[18]	[KD7]	Design and Implementation of a 3 Degrees of Freedom Robotic Arm Powered by Pneumatic Artificial Muscle	H4	5.
[30]	[KD8]	Two-Dimensional Positioning with Machine Learning in Virtual and Real Environments (Q2)	H5	6.
[134]	[KD9]	Humanoid robotok biztonságtechnikája—Áttekintés	H1	2.
Hipotézishez nem kapcsolódó közlemények				
[135]	[KD10]	Soft-aktuátorral ellátott exoskeletonok szerkezeti és szabványosítási vizsgálata		

A vizsgálati eredmények alapján a humanoid robotok tervezésénél célszerű a biztonsági funkciókat rétegzett architektúrában kezelni. A gyors detektálást, a kontaktusprofil

minősítését, a mitigációs reakciót és a visszatérési logikát egymástól elkülönítve, de összehangoltan kell megtervezni.

A lágy aktuátorok alkalmazásánál különösen fontos az előterhelés, a szelepkarakterisztika és a mechanikai átvitel együttes optimalizálása. A szerkezeti engedékenység előnyei csak akkor érvényesülnek, ha a rendszer működési pontja nem kerül olyan tartományba, ahol a szabályozási bizonytalanság dominál.

A tanuló algoritmusok bevezetésénél javasolt a szimuláció-valóság átviteli megközelítés és a kockázatkorlátozó védelmi logika alkalmazása. A szimulációs előtanítás, a korlátozott valós finomhangolás, valamint a stop mechanizmusok kombinációja csökkenti a fizikai kockázatot.

A jövőbeni kutatás egyik iránya a több szenzoros, adatvezérelt ütközésprofil-adatbázisok létrehozása lehet. Egy ilyen összehasonlító adatbázis nemcsak az eltérő mechanizmusok, szenzorarchitektúrák és reakcióstratégiák objektívebb összevetését segítené, hanem a humanoid robotok biztonsági validációját is egységesebb alapokra helyezhetné.

További kutatási feladat a szabványi és szabályozási környezet követése, különösen az AI-rendszerekre és a fizikai érintkezésre vonatkozó új előírások terén. A humanoid robotok szélesebb körű alkalmazása csak olyan integrált szemlélettel lehetséges, amely a műszaki, jogi és társadalmi követelményeket egyszerre kezeli.

Ajánlások

Különösen indokolt egy egységes humanoid biztonsági összehasonlító keret kidolgozása, amely ugyanabban a validációs struktúrában kezeli a kontaktusdetektálást, a reakciókésleltetési időkeretet, a szoftverrobusztusságot és az észlelt biztonságot. A jelen dolgozat eredményei alapján ilyen keret alapjául szolgálhatnak az ütközés késleltetés, a 90%-os erőcsökkenés ideje, az impulzus a csúcsig, a szabályozási túllövés, valamint a valós finomhangoláshoz szükséges epizódszám mutatói.

Ipari vagy szolgáltatási bevezetés előtt célszerű olyan validációs munkafolyamatot kialakítani, amely explicit sorrendben kezeli a kockázatcsökkentés lépéseit: feladatspecifikus kockázatértékelés és szabványi megfeleltetés, a gyors észlelési és a részletes súlyosság-felügyeleti csatornák külön specifikálása, a reakciólatencia valós hardveren történő, end-to-end verifikációja, a tanuló komponensek szimulációs előtanítása és korlátozott valós finomhangolása, végül a teljes rendszer mozgásstabilitásának és hibatűrő viselkedésének ellenőrzése. Az értekezés eredményei ezt a sorrendet műszakilag indokolják.

Hosszabb távú fejlesztési irányként indokolt a H2, H3 és H5 eredményeinek egyetlen integrált biztonsági vezérlőben való összevezetése, ahol a kontaktusdetektálás, a reakciólatencia-felügyelet és a robusztus mozgásszabályozás közös döntési logikában működik. Ez jelentheti a kapcsolatot az egyszerűsített laborplatformok és a teljesebb humanoid rendszerek felé.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Pohl, C.; Hegemann, P.; An, B.; Grotz, M.; Asfour, T. Humanoid robotic system for grasping and manipulation in decontamination tasks: Humanoides Robotersystem für das Greifen und Manipulieren bei Dekontaminierungsaufgaben. *at-Automatisierungstechnik* 2022, 70, 850–858. <https://doi.org/10.1515/auto-2022-0060>.
- [2] Lavin, P.; Lesage, M.; Monroe, E.; Kanevsky, M.; Gruber, J.; Cinalioglu, K.; Rej, S.; Sekhon, H. Humanoid Robot Intervention vs. Treatment as Usual for Loneliness in Long-Term Care Homes: Study Protocol for a Pilot Randomized Controlled Trial. *Front. Psychiatry* 2022, 13, 1003881. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2022.1003881>.
- [3] Arents, J.; Abolins, V.; Judvaitis, J.; Vismanis, O.; Oraby, A.; Ozols, K. Human–Robot Collaboration Trends and Safety Aspects: A Systematic Review. *J. Sens. Actuator Netw.* 2021, 10, 48. <https://doi.org/10.3390/jsan10030048>.
- [4] Ruscelli, F.; Rossini, L.; Hoffman, E.M.; Baccelliere, L.; Laurenzi, A.; Muratore, L.; Antonucci, D.; Cordasco, S.; Tsagarakis, N.G. Design and Control of the Humanoid Robot COMAN+: Hardware Capabilities and Software Implementations. *IEEE Robot. Autom. Mag.* 2025, 32, 12–23. <https://doi.org/10.1109/MRA.2024.3505773>.
- [5] Farajtabar, M.; Charbonneau, M. The Path towards Contact-Based Physical Human–Robot Interaction. *Robot. Auton. Syst.* 2024, 182, 104829. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104829>.
- [6] Zhang, Z.; Qian, K.; Schuller, B.W.; Wollherr, D. An Online Robot Collision Detection and Identification Scheme by Supervised Learning and Bayesian Decision Theory. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 2021, 18, 1144–1156. <https://doi.org/10.1109/TASE.2020.2997094>.
- [7] Lin, C.-J.; Sie, T.-Y.; Chu, W.-L.; Yau, H.-T.; Ding, C.-H. Tracking Control of Pneumatic Artificial Muscle-Activated Robot Arm Based on Sliding-Mode Control. *Actuators* 2021, 10(3), 66. <https://doi.org/10.3390/act10030066>.
- [8] Scianca, N.; Ferrari, P.; De Simone, D.; Lanari, L.; Oriolo, G. A Behavior-Based Framework for Safe Deployment of Humanoid Robots. *Auton. Robots* 2021, 45, 435–456. <https://doi.org/10.1007/s10514-021-09978-5>.
- [9] Alenjareghi, M.J.; Keivanpour, S.; Chinniah, Y.A.; Jocelyn, S.; Oulmane, A. Safe Human-Robot Collaboration: A Systematic Review of Risk Assessment Methods

- with AI Integration and Standardization Considerations. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2024, 133, 4077–4110. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13948-3>.
- [10] Shamsuddoha, M.; Nasir, T.; Fawaaz, M.S. Humanoid Robots like Tesla Optimus and the Future of Supply Chains: Enhancing Efficiency, Sustainability, and Workforce Dynamics. *Automation* 2025, 6, 9. <https://doi.org/10.3390/automation6010009>.
- [11] Slane, A.; Pedersen, I. Bringing Older People’s Perspectives on Consumer Socially Assistive Robots into Debates about the Future of Privacy Protection and AI Governance. *AI Soc.* 2025, 40, 691–710. <https://doi.org/10.1007/s00146-024-01894-3>.
- [12] Liao, Y.-J.; Jao, Y.-L.; Boltz, M.; Adekeye, O.T.; Berish, D.; Yuan, F.; Zhao, X. Use of a Humanoid Robot in Supporting Dementia Care: A Qualitative Analysis. *SAGE Open Nurs.* 2023, 9, 23779608231179528. <https://doi.org/10.1177/23779608231179528>.
- [13] Roštšinskaja, A.; Saard, M.; Korts, L.; Kööp, C.; Kits, K.; Loit, T.-L.; Juhkami, J.; Kolk, A. Unlocking the Potential of Social Robot Pepper: A Comprehensive Evaluation of Child-Robot Interaction. *J. Pediatr. Health Care* 2025, 39, 572–584. <https://doi.org/10.1016/j.pedhc.2025.01.010>.
- [14] Lee, S.H.; Kim, J.S.; Yu, S. The Impact of Care Robots on Older Adults: A Systematic Review. *Geriatr. Nur.* 2025, 65, 103507. <https://doi.org/10.1016/j.gerinurse.2025.103507>.
- [15] Sánchez-Orozco, D.; Valdez, R.; Uchuari, Y.; Fajardo-Pruna, M.; Quero, L.C.; Algabri, R.; Yumbla, E.Q.; Yumbla, F. YAREN: Humanoid Torso Robot Platform for Research, Social Interaction, and Educational Applications. *IEEE Access* 2025, 13, 106175–106187. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3581134>.
- [16] Kóczi D.; Sárosi J. Safety Engineering for Humanoid Robots in Everyday Life—Scoping Review. *Electronics* 2025, 14, 4734. <https://doi.org/10.3390/electronics14234734>.
- [17] Tricco, A.C.; Lillie, E.; Zarin, W.; O’Brien, K.K.; Colquhoun, H.; Levac, D.; Moher, D.; Peters, M.D.J.; Horsley, T.; Weeks, L.; et al. PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation. *Ann. Intern. Med.* 2018, 169, 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>.

- [18] Kóczi D.; Sárosi J. Design and Implementation of a 3 Degrees of Freedom Robotic Arm Powered by Pneumatic Artificial Muscle. *Analecta Technica Szegedinensia* 18(2) (2024) 1–10. <https://doi.org/10.14232/analecta.2024.2.1-10>.
- [19] Kóczi D.; Sárosi J. Analysis of Collision Types in Collaborative Robots Using Mechanism Actuated by Pneumatic Artificial Muscle. *Actuators* 2025, 14, 22. <https://doi.org/10.3390/act14010022>.
- [20] Kóczi, D.; Sárosi, J. Preload-Dependent Protective Reaction Latency in Pneumatic Artificial Muscle Actuated Humanoid Joint. *Actuators* 2026, 15, 277. <https://doi.org/10.3390/act15050277>.
- [21] Goodrich, M.A.; Schultz, A.C. Human-Robot Interaction: A Survey. *Found. Trends Hum.-Comput. Interact.* 2007, 1, 203–275. <https://doi.org/10.1561/11000000005>.
- [22] Sheridan, T.B. Human–Robot Interaction: Status and Challenges. *Hum. Factors* 2016, 58, 525–532. <https://doi.org/10.1177/0018720816644364>.
- [23] ISO/TS 15066:2016; Robots and Robotic Devices–Collaborative Robots. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2016. Elérhető: <https://www.iso.org/standard/62996.html>.
- [24] Sun, Y.; Jeelani, I.; Gheisari, M. Safe Human-Robot Collaboration in Construction: A Conceptual Perspective. *J. Saf. Res.* 2023, 86, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.06.006>.
- [25] Lv, M.; Feng, Z.; Yang, X.; Liu, B. A Method for Human–Robot Complementary Collaborative Assembly Based on Knowledge Graph. *CCF Trans. Pervasive Comput. Interact.* 2025, 7, 70–86. <https://doi.org/10.1007/s42486-024-00171-y>.
- [26] Duan, H.; Wang, P.; Yang, Y.; Li, D.; Wei, W.; Luo, Y.; Deng, G. Reactive Human-to-Robot Dexterous Handovers for Anthropomorphic Hand. *IEEE Trans. Robot.* 2025, 41, 742–761. <https://doi.org/10.1109/TRO.2024.3508194>.
- [27] Rodgers, J. L.; Nicewander, W. A.: Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient. *The American Statistician*, 42(1), 59–66, 1988. DOI: 10.1080/00031305.1988.10475524.
- [28] Liang, D.; Sun, N.; Wu, Y.; Liu, G.; Fang, Y. Fuzzy-Sliding Mode Control for Humanoid Arm Robots Actuated by Pneumatic Artificial Muscles with Unidirectional Inputs, Saturations, and Dead Zones. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2022, 18, 3011–3021. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3111655>.

- [29] Baltes, J.; Christmann, G.; Saeedvand, S. A Deep Reinforcement Learning Algorithm to Control a Two-Wheeled Scooter with a Humanoid Robot. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2023, 126, 106941. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106941>.
- [30] Kóczi D.; Németh J.; Sárosi J. Two-Dimensional Positioning with Machine Learning in Virtual and Real Environments. *Electronics* 2023, 12, 671. <https://doi.org/10.3390/electronics12030671>.
- [31] Wu, M.; Cao, Y. Robust Human-Machine Teaming Through Reinforcement Learning from Failure via Sparse Reward Densification. *IEEE Control Syst. Lett.* 2025, 9, 2315–2320. <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2025.3591199>.
- [32] Rutili de Lima, C.; Khan, S.G.; Tufail, M.; Shah, S.H.; Maximo, M.R.O.A. Humanoid Robot Motion Planning Approaches: A Survey. *J. Intell. Robot. Syst.* 2024, 110, 86. <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02117-z>.
- [33] Bin, T.; Yan, H.; Wang, N.; Nikolić, M.N.; Yao, J.; Zhang, T. A Survey on the Visual Perception of Humanoid Robot. *Biomim. Intell. Robot.* 2025, 5, 100197. <https://doi.org/10.1016/j.birob.2024.100197>.
- [34] Li, Y.; Zheng, H.; Xu, L.; Chen, L.; Xia, F.; Song, Y. A Biomimetic Nanofluidic Tongue for Highly Selective and Sensitive Bitterness Perception. *J. Mater. Chem. A* 2025, 13, 31023–31033. <https://doi.org/10.1039/D5TA02127H>.
- [35] Hajiabbasi, M.; Akhtarkavan, E.; Majidi, B. Cyber-Physical Customer Management for Internet of Robotic Things-Enabled Banking. *IEEE Access* 2023, 11, 34062–34079. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3263859>.
- [36] Zhou, X.; Menassa, C.C.; Kamat, V.R. Siamese Network with Dual Attention for EEG-Driven Social Learning: Bridging the Human-Robot Gap in Long-Tail Autonomous Driving. *Expert Syst. Appl.* 2025, 291, 128470. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128470>.
- [37] Aller, F.; Pinto-Fernandez, D.; Torricelli, D.; Pons, J.L.; Mombaur, K. From the State of the Art of Assessment Metrics Toward Novel Concepts for Humanoid Robot Locomotion Benchmarking. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2020, 5, 914–920. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2952291>.
- [38] Fosch-Villaronga, E.; Shaffique, M.R.; Schwed-Shenker, M.; Mut-Piña, A.; van der Hof, S.; Custers, B. Science for Robot Policy: Advancing Robotics Policy through the EU Science for Policy Approach. *Technol. Forecast. Soc. Change* 2025, 218, 124202. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124202>.

- [39] Sharkawy, A.-N.; Koustoumpardis, P.N. Human–Robot Interaction: A Review and Analysis on Variable Admittance Control, Safety, and Perspectives. *Machines* 2022, 10, 591. <https://doi.org/10.3390/machines10070591>.
- [40] Zhang, J.; Chen, X.; Yu, Z.; Han, L.; Gao, Z.; Zhao, Q.; Huang, G.; Li, K.; Huang, Q. HTEC Foot: A Novel Foot Structure for Humanoid Robots Combining Static Stability and Dynamic Adaptability. *Def. Technol.* 2025, 44, 30–51. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.08.010>.
- [41] Huang, Y.; Chen, Y.; Zhang, X.; Zhang, H.; Song, C.; Ota, J. A Novel Cable-Driven 7 DOF Anthropomorphic Manipulator. *IEEE ASME Trans. Mechatron.* 2021, 26, 2174–2185. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.3033309>.
- [42] Pang, S.; Shang, W.; Dai, S.; Deng, J.; Zhang, F.; Zhang, B.; Cong, S. Stiffness Optimization of Cable-Driven Humanoid Manipulators. *IEEEASME Trans. Mechatron.* 2024, 29, 4168–4178. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2024.3367926>.
- [43] Palleschi, A.; Hamad, M.; Abdolshah, S.; Garabini, M.; Haddadin, S.; Pallottino, L. Fast and Safe Trajectory Planning: Solving the Cobot Performance/Safety Trade-Off in Human-Robot Shared Environments. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2021, 6, 5445–5452. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3076968>.
- [44] Xiong, Y.; Zhai, D.-H.; Xia, Y. Robust Whole-Body Safety-Critical Control for Sampled-Data Robotic Manipulators via Control Barrier Functions. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 2025, 22, 16050–16061. <https://doi.org/10.1109/TASE.2025.3574342>.
- [45] Higashi, K.; Koyama, K.; Ficuciello, F.; Ozawa, R.; Kiyokawa, T.; Wan, W.; Harada, K. Synergy Hand Using Fluid Network: Realization of Various Grasping/Manipulation Styles. *IEEE Access* 2024, 12, 164966–164978. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3494025>.
- [46] Xiong, Q.; Li, D.; Zhou, X.; Xin, W.; Wang, C.; Ambrose, J.W.; Yeow, R.C.-H. Single-Motor Ultraflexible Robotic (SMUFR) Humanoid Hand. *IEEE Trans. Med. Robot. Bionics* 2024, 6, 1666–1677. <https://doi.org/10.1109/TMRB.2024.3464107>.
- [47] Qiu, Y.; Ye, Z.; Tan, X.; Dai, M.; Ge, S.; Zhao, X.; Kong, D.; Ruan, Y. Fruit Grasping Evaluation Based on a Humanoid Underactuated Manipulator and an Adaptive Grasping Algorithm. *Smart Agric. Technol.* 2025, 11, 101007. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101007>.

- [48] Bertoni, L.; Baccelliere, L.; Muratore, L.; Tsagarakis, N.G. A Proximity-Based Framework for Human-Robot Seamless Close Interactions. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2025, 10, 8514–8521. <https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3585762>.
- [49] Huang, X.; Ying, Y.; Dong, W. CEASE: Collision-Evaluation-Based Active Sense System for Collaborative Robotic Arms. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2024, 73, 1–11. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3478318>.
- [50] Vikas; Parhi, D.R. Chaos-Based Optimal Path Planning of Humanoid Robot Using Hybridized Regression-Gravity Search Algorithm in Static and Dynamic Terrains. *Appl. Soft Comput.* 2023, 140, 110236. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110236>.
- [51] Kashyap, A.K.; Parhi, D.R.; Pandey, A. Multi-Objective Optimization Technique for Trajectory Planning of Multi-Humanoid Robots in Cluttered Terrain. *ISA Trans.* 2022, 125, 591–613. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.06.017>.
- [52] Li, F.; Kim, Y.-C.; Lyu, Z.; Zhang, H. Research on Path Planning for Robot Based on Improved Design of Non-Standard Environment Map With Ant Colony Algorithm. *IEEE Access* 2023, 11, 99776–99791. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3312940>.
- [53] De Luca, A.; Muratore, L.; Tsagarakis, N.G. Autonomous Navigation with Online Replanning and Recovery Behaviors for Wheeled-Legged Robots Using Behavior Trees. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2023, 8, 6803–6810. <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3313052>.
- [54] Shamsah, A.; Gu, Z.; Warnke, J.; Hutchinson, S.; Zhao, Y. Integrated Task and Motion Planning for Safe Legged Navigation in Partially Observable Environments. *IEEE Trans. Robot.* 2023, 39, 4913–4934. <https://doi.org/10.1109/TRO.2023.3299524>.
- [55] Xu, C.; Zhou, Y.; He, B.; Wang, Z.; Zhang, C.; Sang, H.; Liu, H. An Active Strategy for Safe Human–Robot Interaction Based on Visual–Tactile Perception. *IEEE Syst. J.* 2023, 17, 5555–5566. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2023.3317328>.
- [56] Ma, J.; Dai, H.; Mu, Y.; Wu, P.; Wang, H.; Chi, X.; Fei, Y.; Zhang, S.; Liu, C. DOZE: A Dataset for Open-Vocabulary Zero-Shot Object Navigation in Dynamic Environments. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2024, 9, 7389–7396. <https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3426381>.

- [57] Li, Z.; Zeng, J.; Chen, S.; Sreenath, K. Autonomous Navigation of Underactuated Bipedal Robots in Height-Constrained Environments. *Int. J. Robot. Res.* 2023, 42, 565–585. <https://doi.org/10.1177/02783649231187670>.
- [58] Dai, S.; Hofmann, A.; Williams, B. Fast-Reactive Probabilistic Motion Planning for High-Dimensional Robots. *SN Comput. Sci.* 2021, 2, 484. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00878-0>.
- [59] Dawood, M.; Pan, S.; Dengler, N.; Zhou, S.; Schoellig, A.P.; Bennewitz, M. Safe Multi-Agent Reinforcement Learning for Behavior-Based Cooperative Navigation. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2025, 10, 6256–6263. <https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3560830>.
- [60] Özbaltan, M.; Özbaltan, N.; Bıçakcı Ye, silkaya, H.S.; Demir, M.; ,Seker, C.; Yıldırım, M. Task Scheduling of Multiple Humanoid Robot Manipulators by Using Symbolic Control. *Biomimetics* 2025, 10, 346. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10060346>.
- [61] Salt Ducaju, J.; Olofsson, B.; Johansson, R. Model-Based Predictive Impedance Variation for Obstacle Avoidance in Safe Human– Robot Collaboration. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 2025, 22, 9571–9583. <https://doi.org/10.1109/TASE.2024.3508718>.
- [62] Wang, Y.; Wang, G.; Ge, W.; Duan, J.; Chen, Z.; Wen, L. Perceived Safety Assessment of Interactive Motions in Human–Soft Robot Interaction. *Biomimetics* 2024, 9, 58. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9010058>.
- [63] Yang, L.; Zhao, Z. A Meniscus-Like Structure in Anthropomorphic Joints to Attenuate Impacts. *IEEE Trans. Robot.* 2024, 40, 3109–3126. <https://doi.org/10.1109/TRO.2024.3408005>.
- [64] Jassim, H.S.; Akhter, Y.; Aalwahab, D.Z.; Neamah, H.A. Recent Advances in Tactile Sensing Technologies for Human-Robot Interaction: Current Trends and Future Perspectives. *Biosens. Bioelectron. X* 2025, 26, 100669. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2025.100669>.
- [65] Bao, R.; Tao, J.; Zhao, J.; Dong, M.; Li, J.; Pan, C. Integrated Intelligent Tactile System for a Humanoid Robot. *Sci. Bull.* 2023, 68, 1027–1037. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.04.019>.
- [66] Fan, Z.; Gao, F.; Chen, Z.; Yin, Y.; Yang, L.; Xi, Q.; Yang, E.; Luo, X. Force-Compliance MPC and Robot-User CBFs for Interactive Navigation and User-Robot

- Safety in Hexapod Guide Robots. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 2025, 22, 20296–20310. <https://doi.org/10.1109/TASE.2025.3596630>.
- [67] Zhang, Z.; Zhang, M.; Guo, J.; He, H. Barrier Offset Varying-Parameter Dynamic Learning Network for Solving Dual-Arms Human-Like Behavior Generation. *IEEE Trans. Cogn. Dev. Syst.* 2025, 17, 1199–1211. <https://doi.org/10.1109/TCDS.2025.3541070>.
- [68] Subburaman, R.; Kanoulas, D.; Tsagarakis, N.; Lee, J. A Survey on Control of Humanoid Fall Over. *Robot. Auton. Syst.* 2023, 166, 104443. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104443>.
- [69] Zhang, C.; Gao, J.; Chen, Z.; Zhong, S.; Qiao, H. Fall Analysis and Prediction for Humanoids. *Robot. Auton. Syst.* 2025, 190, 104995. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2025.104995>.
- [70] Khan, S.G. Adaptive Chaos Control of a Humanoid Robot Arm: A Fault-Tolerant Scheme. *Mech. Sci.* 2023, 14, 209–222. <https://doi.org/10.5194/ms-14-209-2023>.
- [71] Palmieri, J.; Di Lillo, P.; Lippi, M.; Chiaverini, S.; Marino, A. A Control Architecture for Safe Trajectory Generation in Human-Robot Collaborative Settings. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 2025, 22, 365–380. <https://doi.org/10.1109/TASE.2024.3350976>.
- [72] Shi, K.; Chang, J.; Feng, S.; Fan, Y.; Wei, Z.; Hu, G. Safe Human Dual-Robot Interaction Based on Control Barrier Functions and Cooperation Functions. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2024, 9, 9581–9588. <https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3458597>.
- [73] Cai, Z.; Yu, Z.; Chen, X.; Huang, Q.; Kheddar, A. Self-Protect Falling Trajectories for Humanoids with Resilient Trunk. *Mechatronics* 2023, 95, 103061. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2023.103061>.
- [74] Lin, S.; Liu, H.; Wu, C.; Huang, L.; Chen, Y. Anti-Falling of Wheeled Humanoid Robots Based on a Novel Variable Stiffness Mechanism. *Smart Mater. Struct.* 2025, 34, 085002. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/adf37f>.
- [75] Lippi, V.; Mergner, T. A Challenge: Support of Standing Balance in Assistive Robotic Devices. *Appl. Sci.* 2020, 10, 5240. <https://doi.org/10.3390/app10155240>.
- [76] Yu, J.; Zhang, S.; Wang, A.; Li, W.; Song, L. Musculoskeletal Modeling and Humanoid Control of Robots Based on Human Gait Data. *PeerJ Comput. Sci.* 2021, 7, e657. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.657>.

- [77] Scianca, N.; Smaldone, F.M.; Lanari, L.; Oriolo, G. A Feasibility-Driven MPC Scheme for Robust Gait Generation in Humanoids. *Robot. Auton. Syst.* 2025, 189, 104957. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2025.104957>.
- [78] Ferrari, P.; Rossini, L.; Ruscelli, F.; Laurenzi, A.; Oriolo, G.; Tsagarakis, N.G.; Mingo Hoffman, E. Multi-Contact Planning and Control for Humanoid Robots: Design and Validation of a Complete Framework. *Robot. Auton. Syst.* 2023, 166, 104448. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104448>.
- [79] Luo, Y.; Zhang, M.; Liu, Y.; Lin, J.; Zhang, Z. Dynamic Neural Learning for Obstacle Avoidance of Humanoid Robot Performing Cooperative Tasks. *Neurocomputing* 2025, 633, 129727. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2025.129727>.
- [80] Zheng, B.; Liang, D.; Huang, Q.; Liu, Y.; Zhang, P.; Wan, M.; Song, W.; Wang, B. Frame-By-Frame Motion Retargeting with Self-Collision Avoidance from Diverse Human Demonstrations. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2024, 9, 8706–8713. <https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3451365>.
- [81] Li, H.; Wang, Y.; Guo, Y.; Duan, J. Vole Foraging-Inspired Dynamic Path Planning of Wheeled Humanoid Robots Under Workshop Slippery Road Conditions. *Biomimetics* 2025, 10, 277. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10050277>.
- [82] Lai, J.; Chen, X.; Yu, Z.; Chen, Z.; Dong, C.; Liu, X.; Huang, Q. Towards High Mobility and Adaptive Mode Transitions: Transformable Wheel-Biped Humanoid Locomotion Strategy. *ISA Trans.* 2025, 158, 184–196. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2025.01.029>.
- [83] Zhao, Z.; Sun, S.; Huang, H.; Gao, Q.; Xu, W. Design and Control of Continuous Jumping Gaits for Humanoid Robots Based on Motion Function and Reinforcement Learning. *Procedia Comput. Sci.* 2024, 250, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.11.008>.
- [84] Ding, J.; Lam, T.L.; Ge, L.; Pang, J.; Huang, Y. Safe and Adaptive 3-D Locomotion via Constrained Task-Space Imitation Learning. *IEEE ASME Trans. Mechatron.* 2023, 28, 3029–3040. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3239099>.
- [85] Oruma, S.O.; Sánchez-Gordón, M.; Colomo-Palacios, R.; Gkioulos, V.; Hansen, J.K. A Systematic Review on Social Robots in Public Spaces: Threat Landscape and Attack Surface. *Computers* 2022, 11, 181. <https://doi.org/10.3390/computers11120181>.

- [86] Biström, D.; Westerlund, M.; Duncan, B.; Jaatun, M.G. Privacy and Security Challenges for Autonomous Agents: A Study of Two Social Humanoid Service Robots. In Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom), Bangkok, Thailand, 13–16 December 2022; pp. 230–237. <https://doi.org/10.1109/CloudCom55334.2022.00040>.
- [87] Park, C.-Y.; Lee, S.-J.; Lee, I.-G. Secure and Lightweight Firmware Over-the-Air Update Mechanism for Internet of Things. *Electronics* 2025, 14, 1583. <https://doi.org/10.3390/electronics14081583>.
- [88] Agrawal, A.K.; Kumar, J. Humanoid Left Arm Collaboration Empowered by IoT and Synchronization of Human Joints: IOT BASED JOINT SYNCHRONIZED COLLABORATIVE HUMANOID ARM. *J. Sci. Ind. Res. JSIR* 2024, 83, 819–829. <https://doi.org/10.56042/jsir.v83i8.7879>.
- [89] Ahn, J.; Park, S.; Sim, J.; Park, J. Dual-Channel EtherCAT Control System for 33 DOF Humanoid Robot TOCABI. *IEEE Access* 2023, 11, 44278–44286. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3272045>.
- [90] Ghandour, M.; Jleilaty, S.; Ait Oufroukh, N.; Olaru, S.; Alfayad, S. Real-Time EtherCAT-Based Control Architecture for Electro- Hydraulic Humanoid. *Mathematics* 2024, 12, 1405. <https://doi.org/10.3390/math12091405>.
- [91] Misaros, M.; Stan, O.P.; Enyedi, S.; Stan, A.; Donca, I.; Miclea, L.C. A Method for Assessing the Reliability of the Pepper Robot in Handling Office Documents: A Case Study. *Biomimetics* 2024, 9, 558. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9090558>.
- [92] Bodmann, P.R.; Saveriano, M.; Kritikakou, A.; Rech, P. Neutrons Sensitivity of Deep Reinforcement Learning Policies on EdgeAI Accelerators. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2024, 71, 1480–1486. <https://doi.org/10.1109/TNS.2024.3387087>.
- [93] Sekkat, H.; Moutik, O.; El Kari, B.; Chaibi, Y.; Tchakoucht, T.A.; El Hilali Alaoui, A. Beyond Simulation: Unlocking the Frontiers of Humanoid Robot Capability and Intelligence with Pepper’s Open-Source Digital Twin. *Heliyon* 2024, 10, e34456. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34456>.
- [94] Altan, D.; Sariel, S. CLUE-AI: A Convolutional Three-Stream Anomaly Identification Framework for Robot Manipulation. *IEEE Access* 2023, 11, 48347–48357. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3276297>.

- [95] Du, X.; Ye, Y.; Jiao, B.; Kong, Y.; Yu, L.; Liu, R.; Yun, S.; Lu, D.; Qiao, J.; Liu, Z.; et al. A Flexible Thermal Management Method for High-Power Chips in Humanoid Robots. *Device* 2025, 3, 100576. <https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100576>.
- [96] Ali, A.R.; Kamal, H. Robust Fault Detection in Industrial Machines Using Hybrid Transformer-DNN With Visualization via a Humanoid-Based Telepresence Robot. *IEEE Access* 2025, 13, 115558–115580. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3584997>.
- [97] Catuogno, L.; Galdi, C. Secure Firmware Update: Challenges and Solutions. *Cryptography* 2023, 7, 30. <https://doi.org/10.3390/cryptography7020030>.
- [98] Lin, X.; Guo, Z.; Jin, X.; Guo, H. Digital Twin-Enabled Safety Monitoring System for Seamless Worker-Robot Collaboration in Construction. *Autom. Constr.* 2025, 174, 106147. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106147>.
- [99] Bonnet, V.; Mirabel, J.; Daney, D.; Lamiroux, F.; Gautier, M.; Stasse, O. Practical Whole-Body Elasto-Geometric Calibration of a Humanoid Robot: Application to the TALOS Robot. *Robot. Auton. Syst.* 2023, 164, 104365. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104365>.
- [100] ISO 10218-1:2025; Robotics—Safety Requirements Part 1: Industrial Robots. ISO: Geneva, Switzerland, 2025. Elérhető: <https://www.iso.org/standard/73933.html>.
- [101] Jacobs, T.; Virk, G.S. ISO 13482—The New Safety Standard for Personal Care Robots. In *Proceedings of the ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics*, Munich, Germany, 2–3 June 2014; pp. 1–6. Elérhető: <https://www.vde-verlag.de/proceedings-en/453601102.html>.
- [102] Kóczi D.; Sárosi J. Kollaboratív robotok ipari alkalmazása - áttekintés. *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok XVII.* 1-2. (2022) 145–152. <https://doi.org/10.14232/jtgf.2022.1-2.145-152>.
- [103] Fosch-Villaronga, E.; Calleja, C.J.; Drukarch, H.; Torricelli, D. How Can ISO 13482:2014 Account for the Ethical and Social Considerations of Robotic Exoskeletons? *Technol. Soc.* 2023, 75, 102387. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102387>.
- [104] IEC 61508:2010; Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems—Part 1: General Requirements (See Functional Safety and IEC 61508). IEC: Geneva, Switzerland, 2010. Elérhető: <https://webstore.iec.ch/en/publication/5515>.

- [105] Zuo, Y.; Guo, B.H.W.; Goh, Y.M.; Lim, J.-Y. Identifying Human-Robot Interaction (HRI) Incident Archetypes: A System and Network Analysis of Accidents. *Saf. Sci.* 2025, 191, 106959. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106959>.
- [106] ISO 10218-2:2025; Robotics—Safety Requirements Part 2: Industrial Robot Applications and Robot Cells. ISO: Geneva, Switzerland, 2025. Elérhető: <https://www.iso.org/standard/73934.html>.
- [107] Bhattathiri, S.S.; Bogovik, A.; Abdollahi, M.; Hochgraf, C.; Kuhl, M.E.; Ganguly, A.; Kwasinski, A.; Rashedi, E. Unlocking Human-Robot Synergy: The Power of Intent Communication in Warehouse Robotics. *Appl. Ergon.* 2024, 117, 104248. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104248>.
- [108] Chen, K. Does Ascribing Robots with Mental Capacities Increase or Decrease Trust in Middle-Aged and Older Adults? *Int. J. Soc. Robot.* 2025, 17, 1617–1631. <https://doi.org/10.1007/s12369-025-01307-5>.
- [109] Holbrook, C.; Krishnamurthy, U.; Maglio, P.P.; Wagner, A.R. Physical Anthropomorphism (but Not Gender Presentation) Influences Trust in Household Robots. *Comput. Hum. Behav. Artif. Hum.* 2025, 3, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.chbah.2024.100114>.
- [110] Song, C.S.; Kim, Y.-K.; Jo, B.W.; Park, S.-h. Trust in Humanoid Robots in Footwear Stores: A Large-N Crisp-Set Qualitative Comparative Analysis (csQCA) Model. *J. Bus. Res.* 2022, 152, 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.07.012>.
- [111] Tobis, S.; Piasek-Skupna, J.; Neumann-Podczaska, A.; Suwalska, A.; Wieczorowska-Tobis, K. The Effects of Stakeholder Perceptions on the Use of Humanoid Robots in Care for Older Adults: Postinteraction Cross-Sectional Study. *J. Med. Internet Res.* 2023, 25, e46617. <https://doi.org/10.2196/46617>.
- [112] Tobis, S.; Piasek-Skupna, J.; Suwalska, A.; Wieczorowska-Tobis, K. The Impact of Real-World Interaction on the Perception of a Humanoid Social Robot in Care for Institutionalised Older Adults. *Technologies* 2025, 13, 189. <https://doi.org/10.3390/technologies13050189>.
- [113] Tsumura, T.; Yamada, S. Shaping Empathy and Trust Toward Agents: The Role of Agent Behavior Modification and Attitude. *IEEE Access* 2025, 13, 116908–116923. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3584456>.

- [114] Song, C.S.; Kim, Y.-K. The Role of the Human-Robot Interaction in Consumers' Acceptance of Humanoid Retail Service Robots. *J. Bus. Res.* 2022, 146, 489–503. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.03.087>.
- [115] Lee, C.-L.; Kwak, H.S. Effect of Cooking and Food Serving Robot Design Images and Information on Consumer Liking, Willingness to Try Food, and Emotional Responses. *Food Res. Int.* 2025, 214, 116626. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116626>.
- [116] Cao, X.; Wu, Y.; Nielsen, M.; Wang, F. Does Appearance Affect Children's Selective Trust in Robots' Social and Emotional Testimony? *J. Appl. Dev. Psychol.* 2025, 96, 101739. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2024.101739>.
- [117] Wang, Z.; Law, T.S.-T.; Yeung, S.S.S. Let Robots Tell Stories: Using Social Robots as Storytellers to Promote Language Learning among Young Children. *Comput. Hum. Behav. Artif. Hum.* 2025, 6, 100210. <https://doi.org/10.1016/j.chbah.2025.100210>.
- [118] Kim, J.; Kang, T.; Song, D.; Ahn, G.; Yi, S.-J. Development of Dual-Arm Human Companion Robots That Can Dance. *Sensors* 2024, 24, 6704. <https://doi.org/10.3390/s24206704>.
- [119] Tobis, S.; Piasek-Skupna, J.; Neumann-Podczaska, A.; Religioni, U.; Suwalska, A. Determinants of Attitude to a Humanoid Social Robot in Care for Older Adults: A Post-Interaction Study. *Med. Sci. Monit.* 2023, 29, e941205. <https://doi.org/10.12659/MSM.941205>.
- [120] Lapresa, M.; Lauretti, C.; Cordella, F.; Reggimenti, A.; Zollo, L. Reproducing the Caress Gesture with an Anthropomorphic Robot: A Feasibility Study. *Bioinspir. Biomim.* 2024, 20, 016010. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ad912c>.
- [121] Jing, Z.; Luo, A.; Liu, X.; Wang, H.; Li, H.; Song, B.; Lu, S. Precision Actuation Method for Humanoid Eye Expression Robots Integrating Deep Reinforcement Learning. *Sens. Actuators Phys.* 2025, 393, 116762. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116762>.
- [122] Trieu, N.; Nguyen, T. Enhancing Emotional Expressiveness in Biomechanics Robotic Head: A Novel Fuzzy Approach for Robotic Facial Skin's Actuators. *CMES—Comput. Model. Eng. Sci.* 2025, 143, 477–498. <https://doi.org/10.32604/cmes.2025.061339>.

- [123] Johnson, E.A.; Dudding, K.M.; Carrington, J.M. When to Err Is Inhuman: An Examination of the Influence of Artificial Intelligence- Driven Nursing Care on Patient Safety. *Nurs. Inq.* 2024, 31, e12583. <https://doi.org/10.1111/nin.12583>.
- [124] Sandoval, E.B.; Sosa, R.; Cappuccio, M.; Bednarz, T. Human–Robot Creative Interactions: Exploring Creativity in Artificial Agents Using a Storytelling Game. *Front. Robot. AI* 2022, 9, 695162. <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.695162>.
- [125] Aryania, A.; Aghdasi, H.S.; Heshmati, R.; Bonarini, A. Robust Risk-Averse Multi-Armed Bandits with Application in Social Engagement Behavior of Children with Autism Spectrum Disorder While Imitating a Humanoid Robot. *Inf. Sci.* 2021, 573, 194–221. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.05.067>.
- [126] Wong, C.Y.; Vergez, L.; Suleiman, W. Visionand Tactile-Based Continuous Multimodal Intention and Attention Recognition for Safer Physical Human–Robot Interaction. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 2024, 21, 3205–3215. <https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3276856>.
- [127] Dou, R.; Yu, S.; Li, W.; Chen, P.; Xia, P.; Zhai, F.; Yokoi, H.; Jiang, Y. Inverse Kinematics for a 7 DOF Humanoid Robotic Arm with Joint Limit and End Pose Coupling. *Mech. Mach. Theory* 2022, 169, 104637. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104637>.
- [128] Kang, M.; Fan, Z.; Yu, X.; Wan, H.; Chen, Q.; Wang, P.; Fu, L. Division-Merge Based Inverse Kinematics for Multi DOF Humanoid Robots in Unstructured Environments. *Comput. Electron. Agric.* 2022, 198, 107090. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107090>.
- [129] Liu, Y.; Chen, X.; Yu, Z.; Yu, H.; Meng, L.; Yokoi, H. High-Precision Dynamic Torque Control of High Stiffness Actuator for Humanoids. *ISA Trans.* 2023, 141, 401–413. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.06.031>.
- [130] Khan, S.G.; Bendoukha, S.; Abdelmalek, S. Chaos Stabilization and Tracking Recovery of a Faulty Humanoid Robot Arm in a Cooperative Scenario. *Vibration* 2019, 2, 87–101. <https://doi.org/10.3390/vibration2010006>.
- [131] Sun, S.; Li, C.; Zhao, Z.; Huang, H.; Xu, W. Leveraging Large Language Models for Comprehensive Locomotion Control in Humanoid Robots Design. *Biomim. Intell. Robot.* 2024, 4, 100187. <https://doi.org/10.1016/j.birob.2024.100187>.

- [132] Kóczi, D.; Sárosi, J. The Safety of Collaborative Robotics—A Review. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara—International Journal of Engineering* 2022, 20, 73–76. Elérhető: <http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2022/ANNALS-2022-2-10.pdf>.
- [133] Kóczi D.; Jernei M; Sárosi J. 2023. „Kollaboratív Funkció megvalósítása négy szabadságfokú Robotkaron”. *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok* 18 (Különszám):247-58. <https://doi.org/10.14232/jtgf.2023.kulonszam.247-258>.
- [134] Kóczi, D.; Sárosi, J. Humanoid robotok biztonságtechnikája—Áttekintés. *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok* 2025, 20, 95–109. <https://doi.org/10.14232/jtgf.2025.3.95-109>.
- [135] Mészáros, A.; Kóczi, D.; Sárosi, J. Soft-aktuátorral ellátott exoskeletonok szerkezeti és szabványosítási vizsgálata. *Biztonságtudományi Szemle* 2023, 5, 101–116. Elérhető: <https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/309>.

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

AI - mesterséges intelligencia

AMR - autonóm mobil robot

ASD - autizmus spektrumzavar

CNN - konvolúciós neurális háló

DOF - szabadságfok

DRL - mély megerősítéses tanulás

DQN - mély Q-háló

FSR - erőérzékeny ellenállás (Force-Sensitive Resistor)

FTA - hibafaelemzés

HAZOP - veszély- és működtethetőségi elemzés

HRC - ember–robot kollaboráció

HRI - ember–robot interakció

IEC - Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság

ISO - Nemzetközi Szabványügyi Szervezet

IoT - dolgok internete

KD - a szerző saját közleményeire használt rövid hivatkozási jelölés

MPC - modellprediktív szabályozás

OTA - vezeték nélküli / távoli szoftverfrissítés (over-the-air)

PFL - erő- és teljesítménykorlátozás (power and force limiting)

PFMEA - folyamat-FMEA

PID - arányos–integráló–deriváló szabályozás

PMI - pneumatikus mesterséges izom

PRISMA-ScR - Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
– Scoping Reviews

pHRI - fizikai ember–robot interakció

ROS 2 - Robot Operating System 2

sim-to-real - szimuláció-valóság átvezetés

SMC - csúszómód szabályozás

SRMS - safety-rated monitored stop

SSM - sebesség- és távolságfelügyelet (speed and separation monitoring)

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat. A humanoid biztonságtechnika fő tartományai és kapcsolata a disszertáció érdemi fejezeteivel.
2. táblázat. A humanoid robotoknál figyelembe vehető fő szabványok és szerepük
3. táblázat. Mérési esetek különböző előterhelési szinteken
4. táblázat. Pearson-féle korrelációs együtthatók az erőmérő cella és az erőérzékeny ellenállás értékei között
5. táblázat. A mért adatokból kinyert időjellemzők
6. táblázat. Súlyossági mutatók és szenzorkorreláció a mért adatok alapján
7. táblázat. Reakcióidő-költségvetés a PMI-hajtású védelmi reakció értékeléséhez
8. táblázat. Az előterhelés állapotfüggő biztonsági hatásai
9. táblázat. A vizsgált robotrendszer fő jellemzői és a mérési értelmezéshez szükséges paraméterei.
10. táblázat. A két szabályozási logika közötti gyakorlati különbség
11. táblázat. A 3 szabadság fokú PMI-hajtású robotkar reprezentatív teljesítmény- és dinamikai mutatói az öt vizsgált ciklus alapján.
12. táblázat. A tanítási módok és a PID szabályozás összehasonlítása az asztal-golyó rendszeren.
13. táblázat. Saját közlemények, a hipotézisek és a disszertáció fő fejezeteinek kapcsolata

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A kvázi-statikuss és tranziens kontaktus alapelvi szemléltetése. (Saját szerkesztés [23] alapján)
2. ábra: Pneumatikus mesterséges izom
3. ábra: PRISMA-ScR kiválasztási diagram
4. ábra: A felhasznált publikációk éves eloszlása
5. ábra: A humanoid HRI többretegű fizikai biztonsági architektúrája.
6. ábra: A kontaktus kockázatának értelmezése ember–robot megosztott térben: (A) alacsony kockázatú, feladatszerű kontaktus; (B) magas kockázatú, véletlenszerű ütközés.
7. ábra: A kiber-fizikai fenyegetési felület szemléltetése
8. ábra: A kiber-biztonsági intézkedések elemzése
9. ábra: A biztonsági szabványok alkalmazhatósági mátrixa a humanoid robotok alkalmazási területein.
10. ábra: A társadalmi biztonság és bizalom fogalmi keretrendszere
11. ábra: Mérési elrendezés
12. ábra: Mérőrendszer. (a) Az összeszerelt mérőrendszer képe; (b) Ütközőfelület az érzékelővel.
13. ábra: A rendszer be- és kimeneti kapcsolatai
14. ábra: LabVIEW felhasználói felület
15. ábra: A pozíciómérés eredményei: A PMI összehúzódása az idő függvényében tranziens ütközés esetén
16. ábra: A pozíciómérés eredményei: A PMI összehúzódása az idő függvényében kvázi-statikuss ütközés esetén.
17. ábra: A nyomásmérés eredményei: A PMI nyomásváltozása az idő függvényében tranziens ütközés esetén
18. ábra: A nyomásmérés eredményei: A PMI nyomásváltozása az idő függvényében kvázi-statikuss ütközés esetén.
19. ábra: Az erőmérő cella mérési eredményei: A PMI által kifejtett erő az idő függvényében tranziens ütközés esetén
20. ábra: Az erőmérő cella mérési eredményei: A PMI által kifejtett erő az idő függvényében kvázi-statikuss ütközés esetén.
21. ábra: Az erőérzékeny ellenállás mérési eredményei: A PMI feszültségválasza az idő függvényében tranziens ütközés esetén
22. ábra: Az erőérzékeny ellenállás mérési eredményei: A PMI feszültségválasza az idő függvényében kvázi-statikuss ütközés esetén.
23. ábra: Szinkronizált mérési jelek példája kvázi-statikuss kontaktus esetén, 10 N előterhelési beállítás mellett.
24. ábra: Az elfogadható és a nem elfogadható erő-, illetve nyomásértékek szemléltető ábrázolása.
25. ábra: Erőválaszok kvázi-statikuss kontaktus esetén.

26. ábra: Erőválaszok tranziens kontaktus esetén.
27. ábra: PMI-nyomás kvázi-statisztikus kontaktus esetén.
28. ábra: PMI-nyomás tranziens kontaktus esetén.
29. ábra: A nyomáscsúcs és az erőcsúcs eléréséhez tartozó idő.
30. ábra: Az erő- és nyomásjel 90%-os lecsengési ideje.
31. ábra: Az erőcsúcsig számított impulzus.
32. ábra: Korai időszakra vonatkozó merevségi mutató.
33. ábra: Minimális átmenetfeltételek
34. ábra: PMI-vel működtetett 3 szabadság fokú robotkar elrendezés
35. ábra: A 3 szabadság fokú PMI-hajtás kialakítása
36. ábra: Kvantitatív kiértékelés
37. ábra: A módszer lépései
38. ábra: A csúszómód jellegű vezérlési tartományok szemléltetése
39. ábra: Az időalapú mutatók ciklusonkénti alakulása (beállási idő, 10–90%-os emelkedési idő, csillapodó lengési periódus).
40. ábra: A hiba mutatók ciklusonkénti alakulása
41. A túllövés és csúcssebesség kapcsolata
42. ábra: Az asztal-golyó rendszer szemléltetése
43. ábra: A rendszer egyszerűsített kinematikai modellje
44. ábra: Tanítás valós környezetben.
45. ábra: Példafutás valós környezetben valós rendszerben tanított ágens alkalmazásával:
a) az X és Y helyzetkoordináták időfüggvénye, b) a helyezési pontosság kétdimenziós ábrázolása.
46. ábra: Példafutás valós környezetben kizárólag virtuális környezetben tanított ágens alkalmazásával: a) az X és Y helyzetkoordináták időfüggvénye, b) a pozíciók kétdimenziós eloszlása.
47. ábra: Példafutás valós környezetben előtanított és valós környezetben finomhangolt ágens alkalmazásával: a) az X és Y helyzetkoordináták időfüggvénye, b) a pozíciók kétdimenziós ábrázolása.
48. ábra: A PID szabályozási rendszer felépítése.
49. ábra: Példafutás valós környezetben PID szabályozás alkalmazásával: a) az X és Y helyzetkoordináták időfüggvénye, b) a pozíciók kétdimenziós ábrázolása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőmnek, Prof. Dr. Sárosi Józsefnek a szakmai iránymutatást, a kutatás során nyújtott támogatást és a közös munka során kapott értékes tanácsokat. Köszönettel tartozom kollégáimnak és társszerzőimnek is, akik szakmai és emberi oldalról egyaránt hozzájárultak az értekezés elkészítéséhez.

Köszönettel tartozom az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskolájának is azért a szakmai és intézményi háttérért, amely lehetővé tette a munka megvalósítását.

Köszönöm családomnak a türelmet, a biztatást és azt a háttérrel, amely nélkül ez a munka nem készülhetett volna el. Köszönöm édesanyámnak, hogy mindig hitt bennem, és támogatott.

Feleségemnek külön is köszönöm a szeretetét, türelmét és kitartását. Természetesen ezt csak illendőségből írom le, hiszen a doktori munka éve alatt „csupán” a családi háttér fenntartásával, a doktori munka okozta hangulatingadozásaim diplomatikus kezelésével, a biztatással és a „most már tényleg mindjárt kész vagyok” mondatok hősie kezelésével járult hozzá az értekezés elkészítéséhez.

Zalánnak, Kendének és Ervinnek pedig köszönöm, hogy újra és újra emlékeztettek rá, hogy a legfontosabb határidők mellett is van élet, játék, mese és néha sürgősen megjavítandó játék. Legyetek boldog felnőttek!

Végül köszönöm mindenkinek, aki bármilyen módon segítette e munka elkészítését.