

Óbudai Egyetem

Doktori (PhD) értekezés



**Járó robot szerkezeti optimalizálása validált
dinamikus szimulációs modell alkalmazásával**

Burkus Ervin

Témavezető:

Dr. Odry Péter, PhD

**Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott
Matematikai Doktori Iskola**

Budapest, 2023.

Szigorlati bizottság:

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Nyilvános védés időpontja:

Nyilatkozat

Alulírott Burkus Ervin kijelentem, hogy a „Járó robot szerkezeti optimalizálása validált dinamikus szimulációs modell alkalmazásával” című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2023.06.15.

Burkus Ervin
(Doktorjelölt)

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Odry Péternek a sokéves szakmai támogatásért és folyamatos ösztönzésért, melyek nélkül ezen értekezés nem jöhetett volna létre.

Köszönettel tartozom a szigorlati bizottság tagjainak, valamint a doktori iskola vezetőjének, Prof. Dr. Tar Józsefnek.

Szeretném megköszönni a Dunaújvárosi Egyetemnek a doktori ösztöndíjon keresztül nyújtott anyagi támogatást. A disszertációmban bemutatott kutatást az EFOP-3.6.1-16-2016-00003 projekt támogatta. A projekt az Európai Unió társfinanszírozásával valósul meg.

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	1
1 Szabad(ka)-II robot modellezése.....	4
1.1 Szerkezeti megoldások áttekintése hasonló hexapod robotok esetén.....	6
1.2 Kinematikai és dinamikai modellezés Simscape Multibody segítségével	10
1.3 Elektromos és szabályozó felület modellezése.....	16
1.4 Csukló súrlódás, reduktor önzárás és fogaskerék holtjáték modellezése	19
1.5 Eredmények	20
1.6 1. tézis.....	21
2 Validálási eljárás a csukló súrlódás, reduktor önzárás és fogaskerék holtjáték paramétereinek azonosítására.....	22
2.1 Szabad(ka)-II modell validálása	25
2.2 Csukló szögek összehasonlítása	25
2.3 Motoráramok összehasonlítása.....	26
2.4 Alkalmazott optimalizálási eljárás.....	29
2.5 Súrlódás modellezése	29
2.6 Reduktor önzárásának modellezése.....	30
2.7 Holtjáték modellezése.....	31
2.8 Eredmények	35
2.9 2. téziscsoport.....	36
3 Szabad(ka)-III robot új lábszerkezetének kutatása és megvalósítása.....	38
3.1 Lábszerkezeti megvalósítások áttekintése hasonló járó robotok esetén	38
3.2 A robotláb kinematikai kialakítása	40
3.3 Szabad(ka)-III lábszerkezete	41
3.4 A láb differenciális meghajtó rendszere	44
3.5 A láb rugó-csillapító rendszere.....	45
3.6 A motorok hajtása és szabályozása	46
3.7 Eredmények	48
3.8 3. tézis.....	49
4 Szabad(ka)-III robot szerkezeti optimalizálásának kutatása	50
4.1 Szerkezeti optimalizációs eljárások áttekintése hasonló járó robotok esetén.....	51
4.2 Szabad(ka)-III mechanikai és elektronikai felépítése.....	54
4.2.1 Mechanikai rendszer	54
4.2.2 Elektronikai rendszer.....	55

4.3	Szabad(ka)-III robot modell	56
4.4	Az optimalizálási probléma megfogalmazása	61
4.4.1	Optimalizálási célok (fitness függvény)	62
4.4.2	Optimalizálandó paraméterek	68
4.4.3	A paraméterek számának csökkentése	71
4.4.4	Tesztkörnyezet	73
4.5	Optimalizálás	75
4.5.1	Fitness függvény meghatározása	75
4.5.2	Egy-lépéses optimalizálás eredményei	76
4.5.3	Csuklónyomatékok kivizsgálása	80
4.5.4	Több-lépéses optimalizáció	81
4.5.5	Két-lépéses optimalizálás eredményei	83
4.5.6	Az optimalizáció verifikálása független tesztkörnyezetekkel	87
4.6	Eredmények	88
4.7	4. téziscsoport	90
	Összegzés (tézisek)	91
	Irodalmi hivatkozások listája	96
	Rövidítésjegyzék	105
	Táblázatjegyzék	106
	Ábrajegyzék	107

Abstract

The research of mobile robots is a steadily expanding field of science, the potential of which is constantly growing. Accordingly, researchers are showing increasing interest in the development of various mobile devices, which solve dedicated tasks with high efficiency. Mobile robots are most often wheeled or climbing robots. Of these, both the mechanical design and control of legged robots are among the most complex problems. In return, however, there are many more opportunities to use them, as they can overcome significantly higher and more difficult obstacles due to their more versatile gaits.

The research and development related to the Szabad(ka) hexapod walking robots, which is the subject of this dissertation, aims to realize a six-legged walking robot with an optimized (better, more advantageous) body and leg structure. However, this process required the creation of several robot prototypes and involved several research phases.

Szabad(ka)-I was the first six-legged robot, which had a metal structure and used servo motors with planetary gearboxes. During its progress, the technologies required for the design of mechanical and embedded systems were developed. However, the robot was a relatively rudimentary structure, not having the precision to provide the necessary measurements.

The next robot, Szabad(ka)-II, was fundamentally similar to its predecessor, but its mechanical structure was much more precise and lighter. The design of Szabad(ka)-II was not preceded by adequate structural optimization, as this would have required a validated model. However, after the construction of the physical robot, the modeling and validation of the robot could be performed, as the robot provided sufficiently accurate measurement data. During validation, the motor currents measured on the robot and those generated by the model were compared and the goal was to minimize the differences in a model validation process. During the evaluation of the results, some specific phenomena arose. These were identified as the result of joint friction, reductor self-locking, and gear backlash. In the process, a heuristic, numerical optimization procedure was developed to identify the parameters of the three phenomena. During the model establishment, the MATLAB Simscape Multibody features were utilized, which significantly simplified and accelerated the model-building process. The very detailed analysis and the resulting validated model provided a good basis for the structural optimization of the next robot, Szabad(ka)-III.

To perform the structural optimization of the Szabad(ka)-III robot, the simulation environment of the new robot was derived, i.e., the parameterizable model of the robot, which was based on the validated model of its predecessor (Szabad(ka)-II). The advantage of using simulation is that structural optimization can be performed before production, and the tests of motion algorithms can be run in parallel and fast without the use of a real robot. The optimization was performed using a Particle Swarm Optimization (PSO) heuristic search algorithm. The optimization defined the optimal robot structure and determined whether the selected motor-reductor units were suitable. The multi-purpose structural optimization offers flexibility to set custom goals, e.g., to minimize energy consumption, minimize mass, maximize speed and dexterity, minimize unwanted body motion, minimize adverse effects on the structure, and minimize differences in joint torques. During the optimization, I examined several scenarios; the simulations were performed on straight ground, on a slope of 30 degrees inclination, and on a slope of -30 degrees inclination.

During the first attempt of the optimization, all structural parameters of the robot were determined simultaneously. Using this traditional method, the resulting fitness values were similarly low, but the parameters varied too much. To solve the problem and speed up the process, a novel, multi-step optimization process was developed and then the verification of the optimization on independent scenarios was performed. The mechanically most complex part of the robot is its leg with a triple spring-damper system and its differential drive unit. This unit was elaborated in detail (i.e., its kinematic structure was established, and its mechanical CAD models were created) and built physically.

During the development of the three generations of Szabad(ka) robots, the electronic, mechanical, and software systems of the robot gradually evolved as well. At the end of the process, we achieved our goal with the Szabad(ka)-III robot and created a six-legged walking robot with state-of-the-art mechatronic elements and an optimized structure. Although the entire robot has not yet been built, both the drive electronics and the leg have been physically implemented, and the other components of the structure have been designed.

Bevezetés

A mobil robotok kutatása folyamatosan bővülő tudományterület, melynek potenciálja szüntelenül növekszik. Ennek megfelelően a kutatók egyre nagyobb érdeklődést mutatnak a különféle mobil eszközök fejlesztése iránt. A mobil robotok esetén legtöbbször kerekés vagy mászó-járó robotokról (CLAWAR) van szó. Ezek közül, a lábakkal ellátott robotok mechanikai összetettsége és vezérlése sokkal bonyolultabb. Cserébe viszont a felhasználásukban sokkal több lehetőség van, mivel sokoldalúbb járásuknak köszönhetően jelentősen magasabb és összetettebb akadályokat is le tudnak küzdeni.

A disszertációm tárgyát képező, **Szabad(ka)** hexapod járó robotokkal kapcsolatos kutatás és fejlesztés célja létrehozni egy hatlábú járó robotot, mely egy optimalizált (jobb, előnyösebb) test- és lábszerkezettel rendelkezik. Ez a folyamat azonban több prototípus létrehozását és kutatási fázis megvalósítását igényelte.

Szabad(ka)-I volt az első, fémszerkezetű, szervomotorokat és bolygóműves reduktorokat használó hatlábú robot. Fejlesztése során kidolgoztam a mechanikai- és a beágyazott rendszerek tervezéshez szükséges technológiákat. A robot azonban viszonylag kezdetleges szerkezet volt, és ebből adódóan nem rendelkezett a megfelelő pontossággal, hogy elvégezhessem rajta a további lépésekhez szükséges méréseket.

A következő robot, **Szabad(ka)-II** alapjaiban megegyezett elődjével, de mechanikai szerkezete sokkal precízebb és könnyebb volt. Szabad(ka)-II tervezését nem előzte meg megfelelő szerkezeti optimalizálás, mivel ehhez szükséges lett volna egy validált modell. A szerkezet megépítését követően viszont már el lehetett végezni a robot modellezését és a modell validálását, mivel a robot megfelelően precíz mérési adatokat szolgáltatott. A validálás során, a roboton mért és a modell által generált motoráramok kerültek összehasonlításra és a különbségek minimalizálása volt a cél. Az eredmények kiértékelése folyamán felmerült néhány különleges jelenség. Ezeket sikerült a csukló súrlódás, reduktor önzárás és fogaskerék holtjáték eredményeként beazonosítani. A folyamat során kidolgoztam egy heurisztikus, numerikus optimalizálási eljárást a három jelenség paramétereinek azonosítására. A modell megalkotásakor a MATLAB Simscape Multibody által nyújtott lehetőségeket használtam ki, ami jelentősen leegyszerűsítette és felgyorsította a modellépítés folyamatát. A részletes elemzés eredményeként létrejött validált modell megfelelő alapot adott a következő robot, Szabad(ka)-III szerkezeti optimalizálásának elvégzéséhez.

A **Szabad(ka)-III** robot szerkezeti optimalizálásának elvégzéséhez először létrehoztam az új robot szimulációs környezetét, vagyis a robot paraméterezzhető modelljét, ami elődjének (Szabad(ka)-II) validált modelljére épült. A szimuláció használatának előnye, hogy a szerkezeti optimalizálás elvégezhető a gyártás előtt, illetve, hogy a járásalgoritmusok tesztjei is párhuzamosítva és gyorsan futtathatók a valós robot használata nélkül. Az optimalizálást a Particle Swarm Optimization (PSO) algoritmus segítségével valósítottam meg. Az optimalizáció definiálta az előnyösebb robot szerkezetet és meghatározta, hogy megfelelnek-e a kiválasztott motor-reduktor egységek. Mindezt lábankénti három és négy szabadságfokot alkalmazó megoldások esetén kutattam. A többcélú szerkezeti optimalizálás célja az energiafogyasztás minimalizálása, a tömeg minimalizálása, a sebesség és mozgékonyág maximalizálása, a test nem kívánt mozgásának minimalizálása, a szerkezetet érő káros behatások minimalizálása, és a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálása lehet. Az optimalizáció folyamán több scenáriót is vizsgáltam; a szimulációkat vízszintes talajon, lejtőn és emelkedőn futtattam.

Az optimalizálási folyamat során először egyszerre próbáltam meghatározni a robot összes szerkezeti paraméterét. Ennél a hagyományos eljárásnál az eredményként kapott fitness értékek ugyan hasonlóan alacsonyak voltak, de a paramétereik szórtak. A probléma megoldásának és a folyamat felgyorsításának érdekében kidolgoztam egy újszerű, több-lépéses optimalizációs folyamatot, majd pedig elvégeztem az optimalizáció helytállóságának verifikálását független tesztkörnyezetek segítségével.

A robot mechanikailag legösszetettebb része, a paraméterezzhető, hármas rugózással és csillapítással rendelkező láb, illetve annak differenciális meghajtó egysége. Ezt az egységet részletesen kidolgoztam (megalapoztam a kinematikai felépítését és megalkottam a gépészeti CAD modelleket) és fizikailag is megvalósítottam.

A Szabad(ka) robotok három generációjának fejlesztése során, fokozatosan fejlődött a szerkezetek elektronikai, mechanikai és szoftveres rendszere is. A folyamat végén, Szabad(ka)-III robottal elértem célokat és létrehoztam egy validált modellel megalapozott, optimalizált szerkezettel rendelkező, korszerű mechatronikai elemeket használó, hatlábú járó robotot. A teljes robot ugyan még nem került megépítésre, de a meghajtó elektronikát és a lábat fizikailag megvalósítottam, illetve a szerkezet többi elemét is meghatároztam. A végleges robot fizikai megvalósításának feltétele anyagi jellegű.

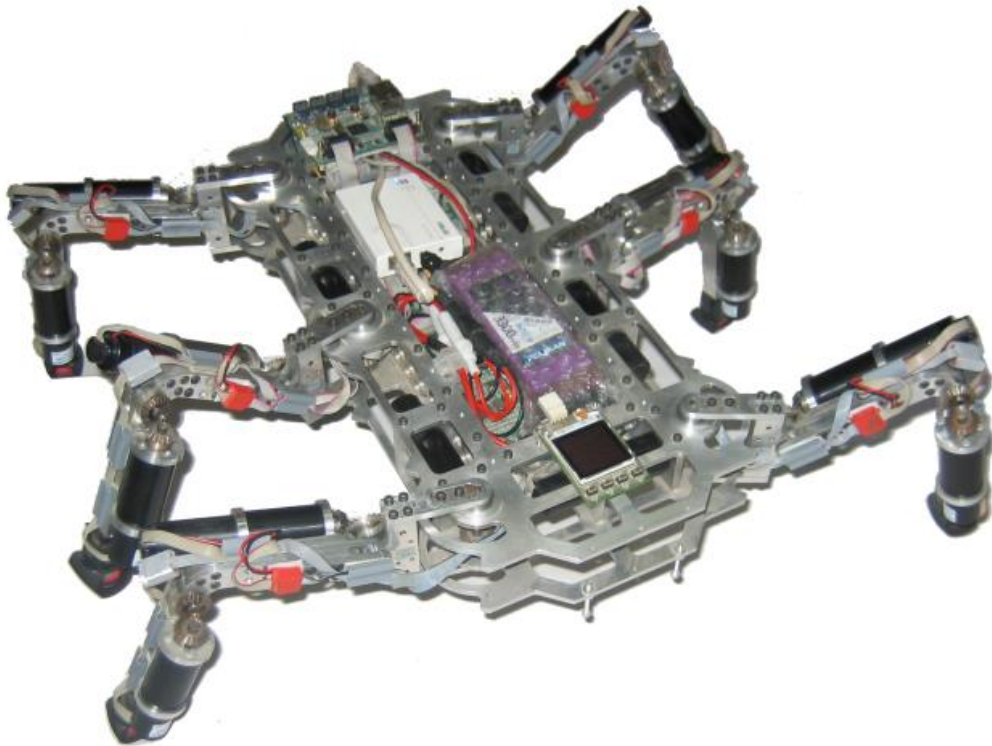
A disszertáció szerkezete a következőképpen épül fel:

- Az első fejezet bemutatja a Szabad(ka)-II robot dinamikus modelljének megépítését, beleértve a mechanikai, elektronikai és szoftveres elemek működésének leírását. A későbbi, Szabad(ka)-III robot modelljét is ezekkel az eljárásokkal hoztam létre.
- A második fejezet a Szabad(ka)-II robot modelljének validálását írja le. Kifejtésre kerülnek a modell és a valós robot viselkedésének összehasonlítására használt módszerek, az eltéréseket okozó jelenségek (súrlódás, holtjáték és reduktor önzárás), és a jelenségek paramétereinek meghatározására kidolgozott optimalizációs eljárás.
- A harmadik fejezet a Szabad(ka)-III robot legösszetettebb és legfontosabb elemének, a lábszerkezetnek a kutatását fejt ki. Ennek részét képezi a láb kinematikai szerkezetének kiválasztása, valamint a differenciális meghajtó rendszer, a rugó-csillapító rendszer és a hajtás kialakítása.
- A negyedik fejezet a Szabad(ka)-III robot szerkezeti optimalizálását vizsgálja. Először a hasonló járó robotok esetén alkalmazott szerkezeti optimalizációs eljárások kerülnek ismertetésre. Ezt követően Szabad(ka)-III mechanikai és elektronikai felépítése van prezentálva. A fejezet következő, lényegi része részletesen bemutatja az optimalizálás céljait és paramétereit, valamint a tesztkörnyezetet és a folyamat által elért eredményeket. Kifejtésre kerül, az össz-paraméteres, majd pedig a felmerült problémák megoldására kifejlesztett több-lépéses optimalizációs eljárás, valamint az optimalizáció helytállóságának verifikálása független tesztkörnyezetek segítségével.

1 Szabad(ka)-II robot modellezése

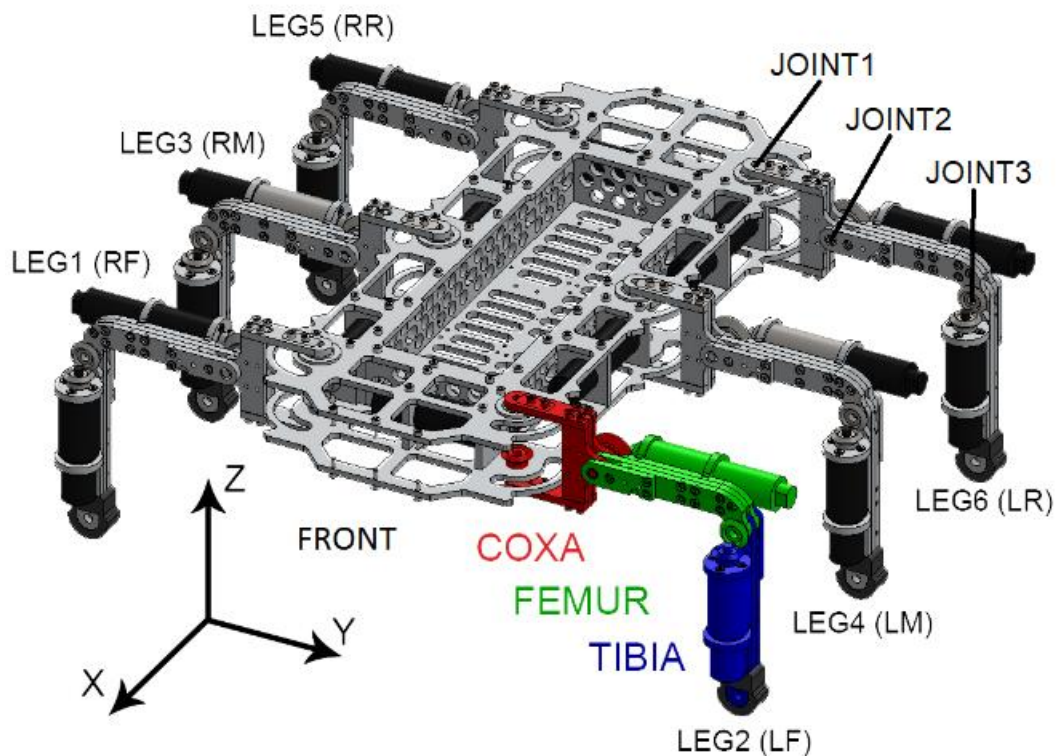
Szabad(ka)-II elődjének a mechanikailag és elektronikailag továbbfejlesztett változata. A robot létrehozásának fő célja az volt, hogy tervezésének folyamán javítsam a mechatronikai és szabályozástechnikai technológiákat, illetve, hogy a későbbiekben validált modellre alapozva elvégezhessem a következő robot, Szabad(ka)-III szerkezeti optimalizálását.

Szabad(ka)-II egy hatlábú járó robot, mely lábanként három szabadságfokkal (DOF) rendelkezik (1. ábra). A szerkezetet 18 darab Faulhaber által gyártott, enkóderekkel ellátott egyenáramú szervomotor hajtja. A motorok meghajtása saját tervezésű motormeghajtókkal történik. A szerkezet legtöbb része alumíniumból készült. A csuklóban a nyomaték átvitelét kúp fogaskerekekkel ellátott reduktorok, valamint IGUS gyártmányú siklócsapágyak és SKF gyártmányú golyóscsapágyak biztosítják. A robot súlya teljes felszereléssel mindössze 6,5 kg. Az első és hátsó lábak tengelye közötti távolság 320 mm.



1. ábra - Szabad(ka)-II hatlábú járó robot.

A robot testének közepén található az elektronikai elemek és az akkumulátor. Minden láb három szegmensből áll: tibia, femur és coxa. A thorax-coxa (Joint1) csukló a vízszintes síkban, míg a coxa-femur (Joint2) és a femur-tibia (Joint3) csuklók a függőleges síkban mozoghatnak. A lábak és a lábsegmensek elrendezése a 2. ábrán látható.



2. ábra - Szabad(ka)-II robot SolidWorks modellje.

A robot modell több, egymásba ágyazott egységből áll. Ezek az egységek jellemzőik alapján a következő főbb kategóriákba sorolhatók:

- kinematika és dinamika,
- vezérlés, elektronika és meghajtás,
- nem ideális mechanikai jelenségek.

A robot dinamikus mozgásegyenlete széles körben ismert, és általában az (1.1) egyenlettel fejezhető ki:

$$\tau = H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + J(q)^T f_{ext}, \quad (1.1)$$

ahol n csukló esetén (robotunk esetében $n = 18 + 6 = 24$) τ a hajtónyomatékok/erők $n \times 1$ dimenziós mátrixa, q a csukló koordináták $n \times 1$ dimenziós oszlopvektora, $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$, $H(q)$ az $n \times n$ dimenziós tehetetlenségi mátrix, $C(q, \dot{q})$ a coriolis- és centrifugális nyomatékok $n \times n$ dimenziós mátrixa, $g(q)$ a gravitációs erő $n \times 1$ dimenziós oszlopvektora, f_{ext} a külső erők $6N_E$ dimenziós vektora, N_E az effektorok száma (egy hexapod esetében $N_E = 6$ láb, $6N_E = 36$), $J(q)^T$ a robot effektorának $6N_E \times n$ dimenziós Jacobi-mátrixa.

Az áttekintett publikációkban a robot egyenleteinek megoldására több módszert is alkalmaztak (erről egy részletesebb elemzés az [1] publikációban olvasható). Kutatásom során a Simscape Multibody szimulációs környezetet használtam a robot mozgásegyenletének megfogalmazására és megoldására.

A vezérlési folyamatok megvalósításához Simulink elemeket használtam, az elektronikai és mechanikai elemek megvalósításához pedig a Simscape Electronics, Electrical, Mechanical és Driveline könyvtárakat alkalmaztam.

Az alfejezetek részletesen ismertetik a modellezési folyamatot. Először a megfelelő kinematikai szerkezet és az alatechnológiák kiválasztásának folyamata és az irodalmi áttekintés kerül ismertetésre. Ezután a robot kinematikája és dinamikája, majd a csuklók meghajtásához szükséges elektromos és szabályozó rendszerek lesznek bemutatva. Végül a későbbi validálás során fellépő nem ideális jelenségek modellezéséhez szükséges mechanikai megoldások kerülnek kifejtésre.

1.1 Szerkezeti megoldások áttekintése hasonló hexapod robotok esetén

A járó robotok a következő kategóriákba sorolhatók: biped, quadruped, hexapod, octopod és „százlábú”. A kettőnél több lábbal rendelkező szerkezetek előnye, hogy esetükben egyszerűbb elérni az egyensúlyt, a súlypont (COG) pedig – a robot méretéhez képest – általában közelebb van a talajhoz. A járásalgorithmus megfelelő megválasztásával megoldható az is, hogy haladás közben legalább három láb folyamatosan kapcsolatban legyen a földdel. A négy lábúak hátránya a hat vagy több lábú szerkezetekkel szemben, hogy ha statikus és stabil járást alkalmaznak, akkor egyszerre csak egy láb lehet a levegőben, ami lassú járást eredményez. Az ügéshez hasonló dinamikus és stabil járás használatával egyszerre két láb emelhető fel, ebben az esetben viszont nehezebb az olyan váratlan eseményekre reagálni, mint például egy akadállyal történő ütközés. A hat lábúaknál, a gyors tripod járás használatakor mindig három láb van a földön és három a levegőben. Ezért egy hat lábú robot haladási sebessége statikus járás esetén akár kétszer-háromszor gyorsabb is lehet, mint egy négy lábú roboté. A nyolclábúak esetében a plusz két láb miatt egyszerre négy láb lehet a földön és négy a levegőben, ennek a szerkezetnek a hátránya, hogy nehezebb egyszerre négy lábbal érinteni a talajt. A nyolclábú robotoknak a súlya és a fogyasztása is nagyobb, és az extra lábak miatt költségesebb az előállításuk.

A [2] cikkben a járőeszközök egy részletes elemzése olvasható. Ez az elemzés külön kitér a robotok maximális sebességére a lábak számának függvényében. A [3] publikáció a lábakkal rendelkező járó rendszerek fejlődésével foglalkozik, és a megvalósítás különböző lehetőségeit mutatja be. A [4] tanulmányban számos optimalizálási példát és módszert mutatnak be az energiafogyasztás minimalizálására a felépítés és a járás módosításával, evolúciós számításokat használva. A járások egy részletes osztályozását az [5] hivatkozás tartalmazza. A fentiek alapján a hatlábú konstrukció tűnik a legraktikusabb választásnak egy járőeszköz létrehozásához.

A robot elektro-mechanikus szerkezetének meghatározása előtt tanulmányoztam a szakirodalomban fellelhető hatlábú robotokat, és nagyszámú, különféle célra épített konstrukciót találtam. Összefoglaltam és szerkezeti jellemzőik alapján összehasonlítottam a hatlábú robotok tulajdonságait. Az 1. táblázat azokat a hatlábú járó robotokat sorolja fel, amelyek érdekesebbek voltak további tanulmányozás céljából. Hasonló táblázatok találhatók a szakirodalomban is, (például [6]), de ezek az összefoglalók nem tárgyalják a jelen kutatás szempontjából releváns elektromechanikai tulajdonságokat.

Robot neve: / Készítés éve:	DOF: / Tömeg:	Robot leírása:
Lauren III 1999	3 18 kg	DC motoros hajtást alkalmazó robot robusztus fogasszíjas erőátvitellel. A fej kamerája forgatható és dönthető. Mindegyik láb háromtengelyes erőérzékelővel van ellátva, és minden motorhoz tartozik egy árammérő szenzor, amely a mozgásnak ellenálló erők érzékelésére használható. [7]
LAVA 1999	3 -	A lábmechanizmus differenciális hajtómű rendszert alkalmaz, DC szervomotorokkal hajtva. A lábakban jelentkező erőhatásokat háromtengelyes piezoelektromos erőérzékelők mérik. A tömeg nincs meghatározva mivel a robot még nem került megépítésre. [8]
Biobot 2000	3 11 kg	A robot csótányszerű (Periplaneta americana) lábszerkezete pneumatikus aktuátorokkal van meghajtva. A három lábpárnak különbözik a mérete és a szerkezete. A robot testének méretei: 580 × 140 × 230 mm. [9]
Hamlet 2001	3 13 kg	Szervomotorokkal hajtott, mechanikailag részletesen kidolgozott robot. A test anyaga szénszálas bevonatú karton, a hat egyforma láb pedig alumíniumból készült. A csuklókat azonos, 10 wattos DC motorok hajtják, 1:246-os reduktorokkal és rugalmas tengelykapcsolókkal. A szélső lábpárok közötti távolság 400 mm. [10]
RHex 2001	1 7 kg	Egyszerű mechanikai felépítésű, 6 darab 20 wattos DC motorral hajtott, küllőszerű lábakkal ellátott szerkezet. A stabil és rendkívül jól manőverezhető mozgás egy nagyon egyszerű óravezérelt, nyitott hurkú tripod járásból ered. A test méretei: 530 × 200 × 150 mm. [11]

Sprawlita 2002	1 (2) <1 kg	A csótány járását imitáló pneumatikus szerkezet. A lökést adó mozgást egy lineáris pneumatikus dugattyú végzi. A dugattyú egy viszkoelasztikus anyagból készült forgócsuklón keresztül csatlakozik a testhez. A test 160 mm hosszú. [12]
LEMUR II 2002	4 9 kg	A NASA által fejlesztett, részletesen kidolgozott, 13 mm átmérőjű Maxon motorokat, bolygómuves reduktorokat, hullámhajtóműveket és enkódereket alkalmazó robot. A rendszer hat darab, négy szabadságfokú végtagból áll, melyek tengelyszimmetrikus elrendezésben vannak elhelyezve egy hatszögletű testplatform körül. A három jellemző szabadságfok mellett a negyedik szabadságfok segítségével a lábak karokként is alkalmazhatók. [13]
Whegs I 2003	1 2,9 kg	Hexapod robot, melynek lábai egyenként három tüskével rendelkeznek. A meghajtáshoz egy RC autómotort, a kormányzáshoz pedig két hobbi szervót használ. A robot 500 mm hosszú és 500 mm széles. [14]
Whegs II 2003	1 3,86 kg	Whegs I továbbfejlesztett változata. A meghajtást egy 90 wattos Maxon motor végzi 26:1 redukcióval. A kormányzáshoz megmaradt a két hobbi szervó használata. A robot 470 mm hosszú és 380 mm széles. [14]
Lauron IV 2004	3 27 kg	Lauron III továbbfejlesztett változata, optimalizált mechanikai szerkezettel és egyforma lábkialakítással. A rendszer ki lett egészítve egy két szabadságfokú fejegységgel. A robot lábai fel vannak szerelve 3D talperő-érzékelőkkel, rugóerő-érzékelőkkel és motoráram-érzékelőkkel. A robot méretei: 1,2 × 1,0 m. [15]
Genghis II 2004	2 -	Mechanikailag egyszerű, csupán két szabadságfokú robot. A lábakat RC szervók mozgatják. A csuklóban jelentkező nyomatékok becslésére árammérést alkalmaznak. A robot méretei: 400 × 150 mm. [16]
BILL-Ant-p 2005	3 2,85 kg	A robot alumíniumból és szén-szálal lemezekből lett kialakítva. A lábakat MPI MX-450HP RC szervók hajtják. A talpakban erőmérő bélyegek találhatóak. A fej három szabadságfokkal és „rágókkal” rendelkezik. A robot méretei: 470 × 330 × 160 mm. [17]
Hexapod 2005	2 1,5 kg	Az általam épített első, üvegszálal lapokból összeállított, hangyaszerű robot. A két szabadságfokkal rendelkező lábakat RC szervók hajtják. A szerkezet méretei: 300 × 180 × 120 mm. [18]
Gregor I 2006	2/3 1,2 kg	Alumínium lapokból és csövekből készült, csótányszerű robot. Az elülső és középső lábak három, míg a hátsó lábak kettő szabadságfokkal rendelkeznek. Minden csuklót RC szervók hajtják. Méretei: 300 × 90 × 40 mm. [19]
ATHLETE 2006	6 450 kg	Ez a nagy tömegű jármű elsődlegesen kerekeken gurul, de szükség esetén lábakként is használhatja a kerekeit. [20]
SLAIR 2 2007	3 3,2 kg	SLIAR utódja. A három szabadságfokú lábakban differenciális hajtást alkalmaztak, módosított RC szervókkal. A test három egyforma szegmensből épül fel, melyek egyenként két szabadságfokkal vannak összekötve. A motoráram mérés mellett a lábakban jelentkező erőket mérik háromtengelyes erőérzékelőkkel. A test 660 mm hosszú. [21]

Szabad(ka)-I 2007	3 10 kg	Az általam épített első, alumínium szerkezetű, szervomotorokkal hajtott hexapod robot. A meghajtást reduktorok, saját gyártású enkóderek és redukciós kúpfogaskerekek segítik. A robot 440 mm hosszú. [18]
SILO6 2007	3 44 kg	Inverz differenciális hajtómű rendszert használó robusztus robot, melynél a fogaskerekes rendszer a testtől távolabbi két csuklót hajtja. Az összes csukló 90 wattos motorokkal van hajtva, különböző reduktorokon keresztül. Méretei: 880 × 450 × 260 mm. [22]
ANTON 2008	3 ~3-4 kg	SLAIR 2 utódja, továbbfejlesztett differenciális csuklóval, ahol a lábön belüli csuklók középpontjait egymáshoz képest eltolták. Az erőátvitel egy huzalos szerkezettel van megoldva. A robot testébe, a három szegmens és a fej közé beépítettek egy-egy két szabadságfokú csuklót, minek következtében a törzs és a fej három pontban el tud fordulni. A lábakban jelentkező erőket háromtengelyes erőérzékelőkkel mérik. [23]
HexCrawler 2008	2 1,8 kg	Alumínium lemezek felhasználásával készített, RC szervókkal hajtott hexapod robot. Erőmérés csak az elülső lábakban történik két erőérzékelő ellenállás segítségével. [24]
Cassino 2008	3 18 kg	Alacsony költségű, hibrid, kommerciális DC motorokkal hajtott és PLC-vel működtetett hexapod robot. A szerkezet befér egy 600 × 600 × 500 mm méretű téglatestbe. [25]
COMET-IV 2009	4 2120 kg	Nagyméretű és tömegű hexapod robot, amelyet egy hidraulikus szivattyú és benzinmotor hajt meg. Méretei: 2,8 × 3,3 × 2,5 m. [26]
Szabad(ka)-II 2009	3 6,5 kg	Szabad(ka)-I utódja továbbfejlesztett szervomotorokkal, reduktorokkal, enkóderekkel és kúpfogaskerekes hajtással. A szerkezetet 18 darab Faulhaber gyártmányú, egyenáramú szervomotor hajtja. A motorok meghajtása saját tervezésű motormeghajtókkal történik. A szerkezet legtöbb része alumíniumból készült. Az első és hátsó lábak tengelye közötti távolság 320 mm. [1]
SpaceClimber 2010	4 23 kg	Részletesen kidolgozott robot, BLDC motorokkal és hullámhajtóművekkel meghajtott lábakkal. A lábakba be van építve egy lineáris enkóder a belső rugó összenyomódásának mérésére, négy nyomásérzékelő a talajérintkezés és a támadási szög mérésére, egy három tengelyű gyorsulásmérő a csúszás észlelésére, és négy opcionális nyúlásmérő a szimmetrikus lábak karmaiban a karom hajlásának mérésére. Méretei: (normál testhelyzetben) 850 × 1000 × 220 mm. [27]
HECTOR 2011	3 12 kg	BLDC motorokkal és hullámhajtóművekkel hajtott robot. A nyomatékátviteli rendszer részét képezi egy nyomatékérzékelővel ellátott elasztomer tengelykapcsoló is. A test szénszál erősítésű műanyagból készült. A robot megközelítőleg 950 mm hosszú. [28]
HITCR-II 2012	3 3,5 kg	Botsáska szerű, moduláris lábszerkezetű, BLDC (Maxon EC 20) motorokkal és hullámhajtóművekkel hajtott robot. A lábfejekben három szabadságfokú erőérzékelő a csuklóban pedig nyomatékérzékelők találhatók. A robot lába egységes moduláris szerkezetként van kialakítva a könnyű cserélhetőség érdekében. A tibiába integrált rugó egy negyedik, passzív szabadságfoknak van tekintve. [29]

ASURA I 2013	4 6 x 3,2 kg (láb)	Kaszáspók szerű, hosszú lábú, DC motorokkal hajtott hexapod robot. A test méreteihez képest hosszú lábak megvalósítása és a lábízületek erőteljes és hatékony meghajtása érdekében bevezetésre került egy speciális párhuzamos összekötő (link) mechanizmus. A láb 1,3 m hosszú. [30]
Lauron V 2013	4 42 kg	Lauron IV utódja továbbfejlesztett kinematikával és robusztus mechanikai szerkezettel. A testet egy csontvázszerű szerkezet képezi, melyet alulról egy erős 3D-nyomtatott héj, felülről pedig egy könnyű műanyag burkolat takar. A fejegység két csuklót tartalmaz. Méretei: 600 × 800 mm. [31]
AntBot 2018	3 2 kg	Dynamixel RC szervókkal hajtott hexapod robot. A test és a lábak PLA-ból készültek 3D nyomtatással. [32]
HAntR 2020	4 2,9 kg	Dynamixel RC szervókkal hajtott tengelyszimmetrikus lábelrendezésű robot. A test és a lábak PLA-ból készültek 3D nyomtatással. Méretei: 500 × 500 × 300 mm. [33]

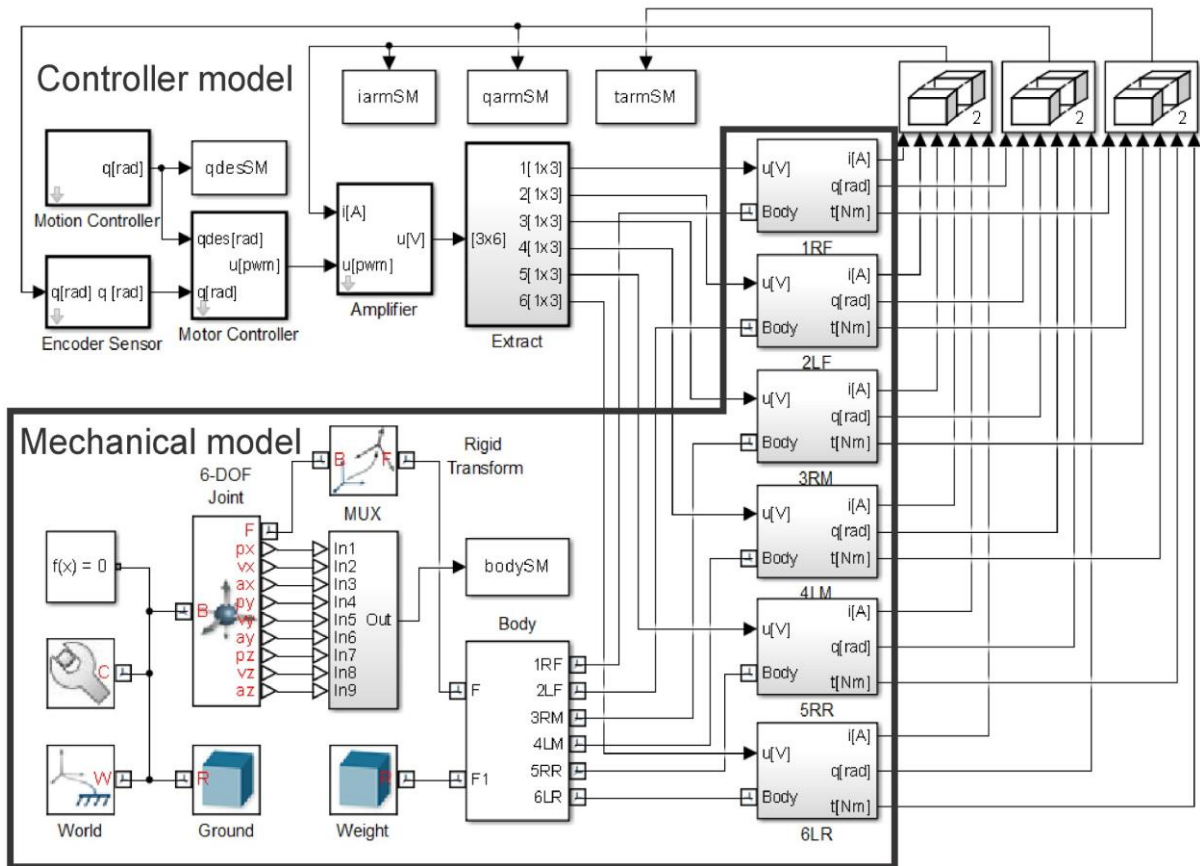
1. táblázat - Hatlábú robotok összehasonlítása.

Az elektro-mechanikus szerkezet tervezése során a fő cél egy viszonylag egyszerű kialakítású, de megfelelő funkcionalitású robot megvalósítása volt. Elvettem a pneumatikus megoldásokat mivel működésük komplex és nem hatékony, valamint a legtöbb alkalmazás még csak kísérleti stádiumban volt [34]. Az RC szervókra épülő megoldásokat szintén elutasítottam, mert a motorszabályozó algoritmusuk nem módosítható [35]. Az irodalomban, a legtöbb, lábanként legalább három DOF-fal rendelkező robot esetében kiemelt figyelmet fordítottak az algoritmusok kidolgozására, míg a szerkezeti optimalizálás kevésbé volt fontos. A szerkezetek többsége viszonylag robusztus volt, és nehézkes járást eredményezett.

1.2 Kinematikai és dinamikai modellezés Simscape Multibody segítségével

A Szabad(ka)-II robot mechanikai CAD modellezését a SolidWorks programban végeztem, ahol meghatároztam az egyes elemek fajlagos anyagsűrűségét. A szoftver segítségével kiszámítható volt a modell test- és lábszegmenseinek tömege és tehetetlensége is. A teljes SolidWorks modellt a Simscape Multibody Link szoftver segítségével importáltam a Simscape Multibody modellbe. A CAD modell importálása után a Simscape Multibody programot használtam a dinamikus modell csukló és szegmensparamétereinek meghatározására. A teljes modell a 3. ábrán látható. A Simscape Multibody modell több szerkezeti elemet tartalmaz. Az első elem a robot teste, amely összeköti az összes többi szerkezeti elemet. A másik fontos elemcsoport a robot lábai, amelyek csuklókon keresztül kapcsolódnak a testhez. A járás során

a másik végük (a robot talpa) vagy a levegőben van, vagy a földet érinti. A lábak csuklós szerkezetűek, és minden láb három DOF-fal rendelkezik.

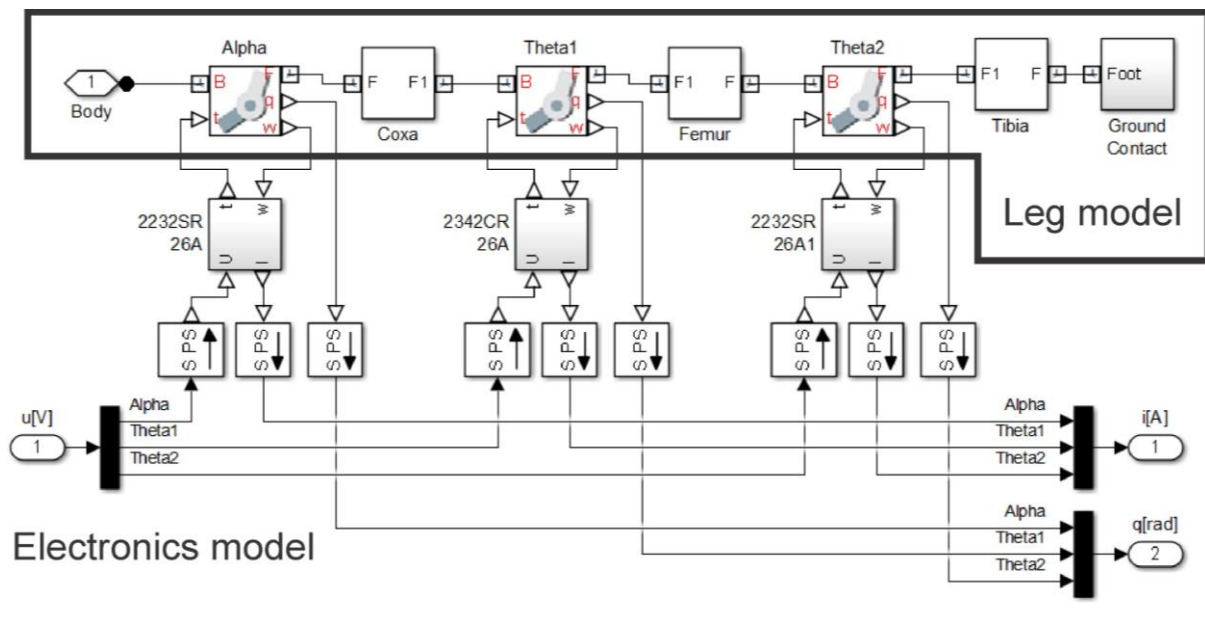


3. ábra - Szabad(ka)-II robot Multibody modellje (mechanikai és a vezérlő alrendszerek).

A Simscape Multibody programba importált modell a blokkok megfelelő rendezése és a logikai alrendszerek létrehozása után a 3. ábrán, a Mechanikai modell (Mechanical model) részen látható. A Test alrendszer a következőkből áll: szilárd testek (Solids) (amelyek a fizikai testet alkotó komponenseket reprezentálják) és az ezeket összekötő merev transzformációk (Rigid Transforms). A robot lábainak (1RF-6LR) összekötésére szolgáló portok szintén merev transzformációkat használnak a test többi eleméhez való csatlakozáshoz.

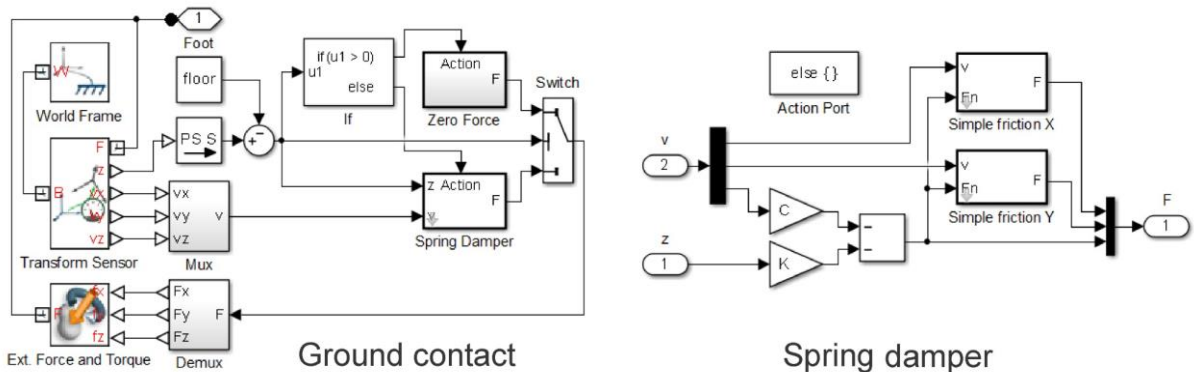
Egy hetedik port (F) használható a test és a talaj összekötésére. A test teljesen szabadon mozoghat a talajhoz képest. A testet és a talajt összekötő 6-DOF csukló feladata a test pozíciójának és orientációjának meghatározása. A robot és a talaj közötti erőhatások csak a lábakon keresztül keletkeznek, amikor egy adott láb érintkezik a talajjal. A testhez rögzített lábak alrendszerei a lábak elhelyezkedése alapján lettek elnevezve (2. ábra): RF - jobb elülső (right front), LF - bal elülső (left front), RM - jobb középső (right middle), LM - bal középső (left middle), RR - jobb hátsó (right rear), és LR - bal hátsó (left rear).

A lábak további alrendszeréből és az azokat összekötő csuklókból állnak (4. ábra). Ezek az alrendszerek a három lábszegmenst (tibia, femur és coxa) reprezentálják, a forgócsuklók (Revolute Joints) pedig a három csuklónak (Joint1, Joint2 és Joint3) felelnek meg. A három alrendszer a komponenseknek megfelelő szilárd testekből és az ezeket összekötő és az orientációt meghatározó merev transzformációkból áll. Minden egyes csukló egy működtető (Actuation) és két érzékelő (Sensing) porttal lett ellátva. A csuklókat a működtető porton keresztül lehet nyomatékkal ellátni, míg az érzékelő portok a szögmozdulás és a szögsebesség mérésére szolgálnak.



4. ábra - Robotláb alrendszer (csuklók, lábszegmensek, motor-reduktor alrendszerek és talajérintkezés alrendszer).

A láb alrendszer utolsó része a talajérintkezés (Ground contact), melynek szerepe a talpra ható erők meghatározása (5. ábra).



5. ábra - Talajérintkezés és rugó-csillapító alrendszerek.

A robot valós viselkedése alapján a talp és a talaj közötti érintkezést csúszásmentes, pontszerű és rugalmas kapcsolatnak tekintjük. A függőleges és vízszintes erők meghatározásához ismerni kell a láb térbeli sebességét, valamint a láb és a talaj közötti függőleges távolságot. Ezeket az adatokat a talp és egy világkoordináta-rendszer (World Frame) közé helyezett transzformációs érzékelő (Transform Sensor) segítségével kaphatjuk meg. A talp abszolút magassága és a talaj magassága közötti különbség adja meg a kettő közötti pozitív vagy negatív távolságot. Ha a távolság pozitív, akkor az adott lábra nem hat erő, mivel az a levegőben van. Ha a távolság negatív, az azt jelenti, hogy a talp érintkezik a talajjal, azaz a talp végén lévő rugalmas gumiláb „összenyomódott”.

Érintkezés esetén a rugó-csillapító (Spring damper) alrendszer kiszámítja a reakcióerőket (5. ábra). A csillapított szabad rezgés fizikai modelljének felhasználásával a vízszintes talaj által a talpra kifejtett normál reakcióerő a következőképpen fogalmazható meg:

$$F_n - cv - kz = 0, \quad (1.2)$$

ahol F_n a lábra, a v sebességgel ellentétes irányban ható normál erőt, z a láb talpának összenyomódását, v a lábnak a talajra merőleges sebességét, c a csillapítási együtthatót és k a rugómerevséget jelöli. A c és k paraméterek meghatározásához ismerni kell a talp paramétereit, a rugalmasságot és a csillapítást. Ezenkívül ezek a validálás során optimalizációs eljárással becsülhetők meg. Esetünkben a rugómerevség meghatározásához egy adott erőt gyakoroltunk a valós talpra, és megmértük annak összenyomódását. A további számításokhoz $k = 10000$ N/m kerekített kiindulási érték lett választva. A csillapítás értékének meghatározásakor a cél az volt, hogy a robot modell ne lengjen járás közben, a valós robothoz hasonlóan. A csillapítás optimalizálásának kezdeti értékeként $c = 150$ Ns/m érték lett meghatározva.

A robotláb viselkedésének modellezéséhez különböző súrlódási modellek alkalmazhatók. A Coulomb-súrlódási modellt használták a LittleDog négy lábú és egy hat lábú robot modellezésére a [36] és [37] tanulmányokban. A [38] cikk részletesen foglalkozik egy hat lábú robot érintkezési erőivel, és elemzi azokat különböző központi mintagenerátorok (CPG) esetén.

A talaj síkjában ható erők a Coulomb-súrlódási modellel a következőképpen fogalmazhatók meg [39]:

$$F = \mu F_n \cdot \text{sign}(v) = F_c \cdot \text{sign}(v),$$

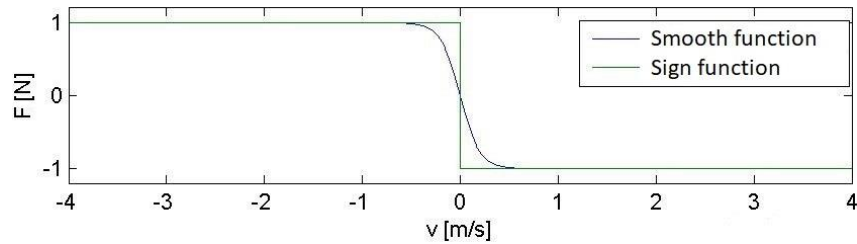
$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{ha } x > 0 \\ 0, & \text{ha } x = 0, \\ -1, & \text{ha } x < 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

ahol F a talp mozgásának irányában ható erő, F_n a normálerő, μ a súrlódási együttható, v a talpnak a talajhoz viszonyított sebessége, F_c pedig a Coulomb-súrlódási erő.

A Coulomb-súrlódási modell nem határozza meg a súrlódási erőt nulla sebesség esetén. Ez lehet nulla, vagy felvehet bármilyen értéket (határozatlan) az $-F_c$ és F_c közötti tartományban, attól függően, hogy az előjelfüggvényt hogyan határozzuk meg. A [40] publikáció a klasszikus súrlódási modell viselkedését írja le nulla sebességnél. A statikus súrlódás az a súrlódás, amikor két felület egymáshoz tapad (tapadóerők „kötnek össze” két felületet). A statikus súrlódás leküzdéséhez és a mozgás megindításához szükséges erőt nevezzük elszakadási erőnek (breakaway force). Az elszakadási erő általában nagyobb, mint a Coulomb-súrlódási erő. A statikus súrlódás egy bizonyos szint alatt ellensúlyozza a külső erőket, és így megakadályozza egy tárgy mozgását. Ezért egyértelmű, hogy a nyugalmi súrlódás nem írható le csak a sebesség függvényeként, hanem az F_e külső erő különböző formáival kell modellezni [40]. A nem folytonos előjel függvényt ((1.3) egyenlet) nehéz szimulálni, ezért egy „simított” (smooth) folytonos függvénnyel közelítjük. A legnagyobb probléma ezzel a közelítéssel az, hogy a sebesség már nagyon kis erőknél is jelentkezik. Ez ellentmondásos, mert ennek az erőnek az értéke sokkal kisebb, mint az elszakadási erő. A [41] cikkben több megoldást is javasolnak erre a problémára, az egyik simított közelítő függvény a következő:

$$F = \mu F_n \left(\frac{2}{e^{-10v} + 1} - 1 \right). \quad (1.4)$$

Az előjel és a simított függvény közötti különbség a 6. ábrán látható $F_n = 1$ és $\mu = 1$ esetében.



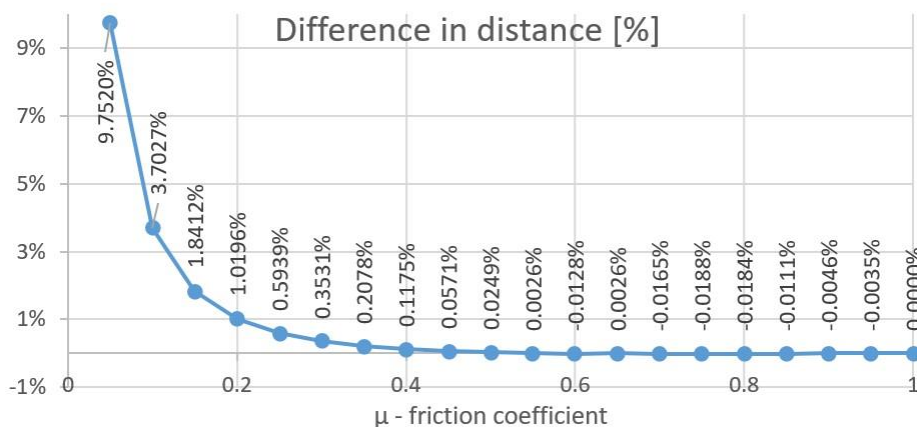
6. ábra - Az előjeles és a simított függvények görbéi.

Robotmodellem az (1.4) egyenlet által leírt súrlódási modellt alkalmazza.

A szakaszos átmenetek kiküszöbölésére hasonló megoldást alkalmaztak egy humanoid robot Simscape Multibody (korábbi nevén SimMechanics) talajérintkezésének megvalósításakor [42].

A talaj és a talp közötti Coulomb-súrlódási együtthatót kísérletileg határoztam meg. A Szabad(ka)-II roboton végzett mérések során a robot olyan felületen járt, amelyen a gumibevonatú lábak nem csúsztak. A szimulációkban a súrlódás értéke 0 és 1 között változott. Megfigyeltem és feljegyeztem azt az értéket, amely felett a Coulomb-súrlódás már nem befolyásolta a robot által, adott idő alatt megtett távolságot. Az eredmények a 7. ábrán láthatók. Az ábra a különböző súrlódási értékek esetén a megtett távolság százalékos változását mutatja a $\mu = 1$ súrlódási együttható esetén megtett távolsághoz képest.

A $\mu = 0,5$ feletti értékek esetén a megtett távolság változása elhanyagolható, és a változás mértéke csak tízezredekben mérhető. A validálás során a súrlódási együttható értékét $\mu = 0,8$ -nak választottam.



7. ábra - A távolság változása a súrlódás függvényében.

Az eddigiekben ismertetett talajérintkezés egyenes talaj esetén használható. A Szabad(ka)-II robot validálására ez megfelelt, mivel a mérések során a valós robotot is egyenes talajon járatam. Szabad(ka)-III szerkezeti optimalizációja során azonban ferde talajt is használtam. A ferde talajon történő járás szimulálásához a MathWorks fejlesztői által később megvalósított megoldást, a „Simscape Multibody Contact Forces Library” könyvtárat alkalmaztam [44].

1.3 Elektromos és szabályozó felület modellezése

Az ebben a fejezetben bemutatásra kerülő vezérlő és szabályozó működését részletesen ismertettük korábbi tanulmányunkban [1]. A robot mozgatásáért felelős algoritmus a két modell (a korábbi tanulmányban és az itt bemutatott), valamint a fizikai robot esetében azonos. A vezérlőelemek a vezérlő-szabályozó modell (Controller model) részben találhatóak (3. ábra). A validáláshoz szükséges mérési eredmények kinyerése során a robotmodellt lépcsőzetes jellel vezéreltem. Ezt a módszert a nemlineáris hatások kiemelése érdekében használtam.

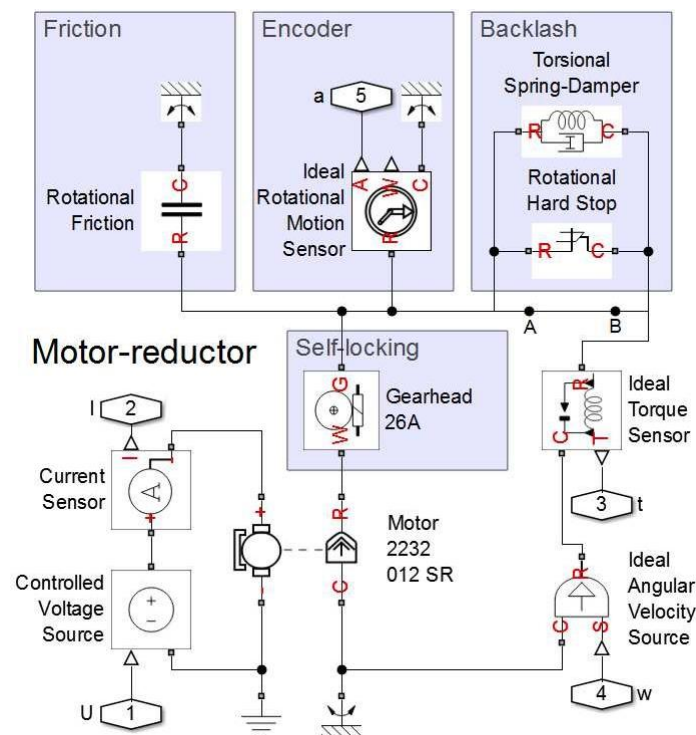
A mozgásvezérlő (Motion Controller) fő feladata a lábak pályájának generálása és az inverz kinematikai számítások elvégzése. A talp pályáját egy egyenes vonal (stance) és egy spline (swing) pontjai határozzák meg, mindkettő mozgás 21 különálló diszkrét részre van felosztva. A járási sebesség a két pont frissítése között eltelt időtől függ. A láb koordinátáit az inverz kinematikai algoritmus transzformálja a csuklóknak (Joint1, Joint2 és Joint3) megfelelő szögekké.

A motorszabályozó (Motor Controller) összehasonlítja a mozgásvezérlőtől kapott elvárt szögeket és a lábak alrendszerében mért valós szögeket. Ezt követően egy P szabályozó kiszámítja a motormeghajtónak továbbítandó PWM értékeket. A motormeghajtó (Amplifier) a PWM jel és az akkumulátor feszültségének függvényében határozza meg a motorok feszültségét, ami viszont a terheléstől függ. Ezért a számításhoz a láb alrendszerekben mért motoráramokat visszavezettem a motormeghajtó alrendszerbe. A láb alrendszereket kibővítettem a fent említett feszültség bemenet jelével (u [V]), valamint a szög (q [rad]) és az áram (i [A]) kimeneti jelekkel (4. ábra).

A csuklókat a motor-reduktor (Motor-reductor) alrendszerek hajtják. Az alrendszer lábon belüli illesztését a 4. ábra elektronikai modell (Electronics model) része mutatja, maga az alrendszer pedig a 8. ábrán látható. A robot kétféle motorral és kétféle reduktorral rendelkezik három kombinációban, a párosítások mechanikai paramétereit a 2. táblázat tartalmazza. Jelöléseik a motor-reduktor párosok nevét jelzik (pl. a 2232SR 26A alrendszer a 2232SR jelzésű motorból

és a 26A jelzésű reduktorból áll). Az alrendszer súrlódással (Friction), enkóderrel (Encoder) és holtjátékkal (Backlash) jelölt részeit később építettem be a rendszerbe.

A motor modellje felépíthető a Simulink standard elemeiből vagy a Simscape Electronics egyenáramú motorjának modelljéből. Jelen esetben az utóbbi megoldást alkalmaztam. Az egyenáramú motor bemenete a feszültség, kimenete pedig a nyomaték. A motoron átfolyó áramot egy áramérzékelővel (Current Sensor) mérhetjük. Mivel az egyenáramú motor Simscape Electronics elemeket, a mechanika pedig Simscape Multibody elemeket tartalmaz, a kettőt össze kellett hangolni. Ezért egy ideális nyomatékérzékelőt (Ideal Torque Sensor) és egy ideális szögsebesség forrást (Ideal Angular Velocity Source) adtam hozzá az egyenáramú motor kimeneti köréhez. Az érzékelő felelős azért, hogy az egyenáramú motor által kiszámított nyomatékot a Simscape Multibody csukló nyomatékmeghajtó (Torque Actuation) portjához juttassa. A forrás pedig a Simscape Multibody csukló sebességérzékelő (Velocity Sensing) portjáról adja vissza a motormodellnek a csukló szögsebességét.



8. ábra - Motor és reduktor alrendszer. A téglalapokkal bekeretezett súrlódás, enkóder és holtjáték részek a nem ideális mechanikai jelenségek modellezésének részét képezik.

A Simscape Electronics DC motor blokkját a valós motor elektromos paramétereit alapján konfiguráltam. Az adatlapról származó paramétereket a 3. táblázat foglalja össze. A reduktor modellezésénél a redukció és az ideális hatásfok értékét adtam meg kiindulási pontként (2. táblázat).

A Szabad(ka)-II robot esetében a testben lévő (Joint1) és az alsó lábszárszakaszt mozgató (Joint3) csuklóokban kisebb nyomatékok jelentkeznek. Ezért ezeket gyengébb motorok és reduktorok, valamint 1:1 áttételű kúpfogaskerekek hajtják. A felső lábszegmenst mozgató csuklóban (Joint2) a nyomatékok nagyobb értékeket vesznek fel, mivel lényegében ezek a csuklók felelősek a robot felemeléséért. Ezért ezek a csuklók erősebb motorokkal és reduktorokkal, valamint 1:2-es áttételű kúpfogaskerekekkel lettek felszerelve [1].

Motor	2232U 012SR	2342S 012CR	2342S 012CR
Reduktor	26A	26A	26/1
Maximális motor nyomaték	10 mNm	19 mNm	19 mNm
Időszakos reduktor nyomaték	1,5 Nm	1,5 Nm	4,5 Nm
Motor tömege	62 g	88 g	88 g
Reduktor tömege	25 g	25 g	162 g
Reduktor áttétele	256	256	246
Reduktor hatásfoka	64%	64%	60%
Egység kimeneti nyomatéka	1,63 Nm	3,11 Nm	3,11 Nm
Csukló	Joint1-Joint3	Joint2-F/R	Joint2-M

2. táblázat - A motorok és reduktorok mechanikai paraméterei.

Adatlapban található megnevezés	Simscape Electronics megnevezés	Érték és mértékegység
Terminal resistance	Armature resistance	4,09 Ω
Rotor inductance	Armature inductance	180 μH
Back-EMF constant	Back-EMF constant	1,68 $\frac{\text{mV}}{\text{rpm}}$
No-load current	No-load current	17,5 mA
Nominal voltage	DC supply voltage	12 V
Rotor inertia	Rotor inertia	3,8 gcm^2

3. táblázat - A motor elektromos jellemzői az adatlapban található adatokkal és a megfelelő Simscape Electronics jelölésekkel.

1.4 Csukló súrlódás, reduktor önzárás és fogaskerék holtjáték modellezése

Az eddig ismertetett modellezési lépések során elkészült egy alapvető robot modell, azonban ez a modell nem ugyanazokat az eredményeket produkálja, mint a valós robot. A valóságban számos, eddig nem említett mechanikai tényező befolyásolja a robot csuklóinak nyomatékait és a motorok áramait. Ezeket a jelenségeket részben előre feltételeztem, részben pedig a validálás során ismertem meg. A valós robot és a modell közötti különbségek főként a következő három folyamatnak köszönhetőek, amelyeket nehéz előre leírni, és amelyek paramétereit nehéz beállítani:

- a mechanikai elemek közötti összetett súrlódás,
- a reduktorok önzárásának jelensége, és
- a fogaskerekek holtjátéka.

Amint az a későbbi fejezetekben világossá válik, a fenti három jellemző paramétere jelentős hatással vannak a robot modell validálására. Ezért e három jelenséggel a modell validálása során részletesebben foglalkoztam.

A validálás során végrehajtott változtatások a modell motor-reduktor alrendszerét érintették. Az új és módosított részeket a 8. ábra bekeretezett részei mutatják. Az alrendszerben a következő változások történtek:

- A súrlódás elérése érdekében a reduktor kimenete és a mechanikai forgási referencia (Mechanical Rotational Reference) között egy forgási súrlódási (Rotational Friction) blokkot helyeztem el. A súrlódást 2.5-ös fejezet ismerteti.
- Az önzárás szimulálása érdekében az egyszerű fogaskerék (Simple Gear) blokkot felváltotta egy csigakerék (Worm Gear) blokk. A 8. ábrán ez a blokk a 26A hajtóműként (Gearhead 26A) van jelölve. Az önzárást a 2.6-os fejezet taglalja.
- A holtjáték szimulálása érdekében egy Rotational Hard Stop és egy Torsional Spring-Damper blokk került a reduktor és a szegmens közé (a rendszer megfelelő működése érdekében az A és B pontok közötti eredeti kapcsolat megszakadt). A holtjáték szerepét a 2.7-es fejezet ismerteti.

A Rotational Hard Stop hozzáadása a szegmens és a motorok közötti szögpozíció megváltozását eredményezte. A modell vezérlőrendszere eredetileg a csuklópályákat a szegmensek pozícióérzékelő (Position Sensing) kimenetéről kapta. Ezzel szemben a valós robot

elektronikája a motor enkóderek jelét dolgozta fel. A probléma megoldására a modellhez hozzáadtam egy ideális forgásmozgás-érzékelőt (Ideal Rotational Motion Sensor), amely a Rotational Hard Stop előtt határozza meg a vezérlő számára szükséges szögpozíciót.

1.5 Eredmények

Megterveztem és megépítettem a Szabad(ka)-II robotot, mely elődjéhez képest sokkal precízebb és könnyebb mechanikai szerkezettel rendelkezik. A fejlesztés részét képezte a gépészeti modellezés, a gyártás felügyelete, a szerelés elvégzése, a beágyazott rendszer megtervezése és megvalósítása, valamint a vezérlő és szabályozó szoftverek létrehozása.

A súlycsökkenést a részletesebb CAD modellezés, valamint az alkatrészek (megfelelően kiválasztott motor-reduktor egységek, csukló elemek) és a felhasznált anyagok körültekintő megválasztásával valósítottam meg. A hatékonyabb működést (jelentősen csökkentett csukló illesztési problémák, javított áramellátás és árammérés, precízebb meghajtás) a csapágyazás, illetve az elektronikai elemek újratervezésével értem el. A továbbfejlesztett Szabad(ka)-II robot megalkotásának egyik főbb célja az volt, hogy megfelelően precíz mérési adatokat szolgáltatson a validálás elvégzéséhez.

Létrehoztam a robot részletesen kidolgozott dinamikus modelljét, mely megfelelő szimulált mérési adatokat szolgáltat a validálás elvégzéséhez. A folyamat során részletesen kidolgoztam az elektronikai, mechanikai és vezérlési (mozgásalgorithmus, inverz kinematika és szabályozó) elemeket. A modell megalkotásához a MATLAB Simscape Multibody környezetet használtam, ami leegyszerűsítette a modell építésének folyamatát, és a szerkezet átláthatóbbá vált a klasszikus leíráshoz képest [1]. Tapasztalataim alapján a Simscape Multibody gyorsabban futott, mint a klasszikus modell, ami fontos, mivel a számítások időigényesek.

A Szabad(ka)-II robottal végzett mérések számos optimalizálási probléma megoldására is fel lettek használva: motorszabályozó optimalizációra [45], [46], lábpálya görbe optimalizációra [47], a robotban implementált szabályozó validálására [48], optimalizációs módszerek összehasonlítására [47], [49], a robot csuklóiban található reduktorok hatékonyságának vizsgálatára [50] és a robot testében implementált IMU szenzor modelljének kalibrálására [51]. Továbbá, olyan multi-szenáriós optimalizációs és minőségmérő módszerek tesztelését is el lehetett végezni, melyekre jellemző a multi-objektivitás, a sok-szabadságfok, a nemlinearitás és a magas komplexitás [52].

1.6 1. tézis

Létrehoztam egy hatlábú járó robot dinamikus modelljét, mely az irodalomban fellelt megoldásokhoz képest részletesebb kidolgozottsággal rendelkezik. A modell az elektronikai, mechanikai és vezérlési elemeken felül képes kezelni a későbbi validálás során felfedezett, nem ideális mechanikai jelenségeket is, valamint megfelelő szimulált mérési adatokat szolgáltat a validálás elvégzéséhez.

A modell alapját az általam tervezett és megépített, elektromechanikailag továbbfejlesztett Szabad(ka)-II robot képezte. A fejlesztés során megvalósított, vezérléshez tartozó algoritmusokat (mozgásalgoritmus, inverz kinematika és szabályozó) a dinamikus modell mellett a valós robot beágyazott rendszerében is implementáltam.

Tézishez kapcsolódó saját publikációk: [18], [53], [43].

2 Validálási eljárás a csukló súrlódás, reduktor önzárás és fogaskerék holtjáték paramétereinek azonosítására

Súrlódás általában minden mechanikai rendszerben előfordul. Egyszerre több formában jelentkezik, és így egy rendkívül összetett, nemlineáris folyamat. A súrlódással kapcsolatos jelenségeket nehéz felismerni, egymástól elkülöníteni és egyértelműen leírni. A súrlódás meghatározó a fogaskerék önzárás és a holtjáték jelenségekben is. Bár létezik a súrlódás leírásával kapcsolatos szakirodalom széles skálája, amelyben a súrlódást sokféleképpen jellemzik, nincs teljes konszenzus erről az összetett jelenségről. A robotok csuklóiban a súrlódás hatásának tanulmányozására és vizsgálatára különböző módszereket alkalmaztak, és a fellelhető szakirodalom általában elméleti szimulációkat és leírásokat tartalmaz.

A súrlódás, mint fizikai jelenség értelmezésének fejlődését a [54] publikáció foglalja össze a kezdeti modellekkel kezdve. A cikk kifejti, hogy a különböző modellek hogyan kerültek be a mérnöki alkalmazásokba; kiindulva a súrlódás Coulomb-modelljétől egészen a mai többparaméteres modell leírásokig. A súrlódás modellezésében először statikus modelleket alkottak, később azonban, ahogy egyre jobban felismerték és megértették a folyamat dinamikus viselkedését, egyre jobb dinamikus modelleket hoztak létre. A [54] cikkben a súrlódási modell validálási folyamatához a szerzők egy kísérleti eszközt is használtak. A [55] tanulmányban a Froube-ingát használták a súrlódási paraméterek eredményeinek meghatározásához. A mérési eredmények lehetővé tették a rendszermodell validálását, majd a modell segítségével a súrlódási jellemzők meghatározását. Az összetett súrlódási jelenség leírásakor a Stribeck-görbét egy köbös b-spline-nal helyettesítették. A [56] cikk részletesen ismerteti egy „pinion” fogaskerék súrlódási mechanizmusát. A numerikus modellezéshez két összetett súrlódási paraméter formulációt használnak: a Niemann- és a Hybrid formulát.

A holtjáték a fogaskerék fogai közötti hézagok (clearance) által okozott távolság vagy mozgásvesztés egy mechanizmusban. A [57] forrás együttesen tárgyalja a súrlódás és a holtjáték fizikai jelenségeit egy nemlineáris fogaskerék-átviteli rendszer esetében. Továbbá feltárja a statikus és a dinamikus holtjáték közötti különbségeket.

A [58] publikációban részletes toleranciaelemzést végeztek egy forgócsuklós járó robotról. A modellezéshez és az optimalizáláshoz egy adaptív neuro-fuzzy következtetési rendszer (ANFIS) optimalizálási eljárást használtak. Emellett elemezték a különböző méretű hézagok hatására jelentkező pozícióhiba mértékét.

A [59] cikk szerzői definiálták a fogaskerék hézag forrásait, és a következő következtetést

vonták le: „A szöghézagot (angular clearance) a motoron vagy a hajtóművön belüli holtjáték is okozhatja”. Ebben a cikkben bemutatnak és elemeztek egy hézaggal rendelkező 5R mechanizmust, és meghatározták a hézag hatásai által okozott hibatartományt a munkatérben.

A [60] tanulmányban részletesen ismertetnek egy négy szabadságfokú manipulátort olajkutatok elágazó szerkezeteinek tapintásos feltárására. A szerzők holtjáték-identifikációt végeztek, és arra a következtetésre jutottak, hogy a csukló szög mérési hibája kizárólag a holtjátékból adódik. A cikk új értelmezést ad a holtjáték jelenségének, és elemzi a pozíció pontosságát a holtjáték függvényében.

A [61] cikk az RV20-16 6-DOF-os ipari robot manipulátor példáján keresztül elemzi a rugalmas csukló súrlódás, a holtjáték és az ebből eredő hiszterézis modelljét vizsgálati körülmények között.

Az ALEX-I robot egyensúlyozására a Zero Moment Point koncepciót használják [62]. Ebben a cikkben a szerzők feltételezik, hogy a modellparaméterek bizonytalanok, ezért a holtjátékot és a csukló toleranciát zavarnak tekintik. A robot vezérlésében egy fuzzy logikai szabályozót (FLC) használnak a zavar alapjel kompenzálására.

A fogaskerekek hibáinak (például a holtjáték hibájának) jellemzésére, kiértékelésére és számszerűsítésére a [63] cikkben leírt kutatásban egy gyors Fourier-transzformáció (FFT) alapuló eljárást dolgoztak ki. Azt is megállapították, hogy az excentricitási hibák, a szerkezeti deformációk és a holtjáték a legfontosabb hibaforrások, amelyek befolyásolják a vizsgált ipari robot pontosságát és működésének ismételtetését.

A csukló, amely az egyik fő alkotóelem egy űrmanipulátorban [64], jelentősen befolyásolja a mozgás minőségét. A holtjáték növekedésével a válasz az egyfrekvenciás választól a káoszra, illetve a lineáris jellegtől a teljesen nemlineárisig változik. Ezért a holtjáték hatását súlyozottan kell figyelembe venni a bolygóműves sebességváltó áttételének modellezésekor. A csukló modellezéséhez egy nemlineáris dinamikus modellt dolgoztak ki a holtjáték leírására.

A test mozgásának nem kívánt hibáinak korrigálása érdekében többek között a járó robot lábainak csuklóiban fellépő holtjáték-hatás leírására is szükség van [65], mivel ellenkező esetben nehéz lehet megoldani a robot pontos lokalizációját. Az enkóderek és az elektromágneses iránytűk nem képesek érzékelni az ilyen típusú testmozgást, így a testhelyzet becslése nem érzékeli a holtjátékot. A pozícióbecslést egy dőlésmérő (inclinometer) adatainak felhasználásával a „dead reckoning” számítási technikával javították, hangsúlyt fektetve a csukló holtjáték és a szegmensek elhajlásai által okozott oldalirányú testmozgások becslésére.

A [66] tanulmányban vizsgált exoskeleton gyakorlati teljesítményét jelentős mértékben korlátozza a holtjáték. E jelenség vizsgálatához részletes kinematikai modellt készítettek a manipulátorhoz. Az ebben az esetben alkalmazott mechanikai erőátvitel olyan kompromisszumokkal jár, mint a nemlineáris dinamika és a holtjáték.

A [67] publikációban egy adaptív fuzzy backstepping dinamikus felületszabályozási (dynamic surface control - DSC) megközelítést dolgoztak ki ismeretlen hiszterézisű holtjátékkal rendelkező nemlineáris rendszerekhez. Egy megfelelő megfigyelőt (observer) használva egy adaptív fuzzy DSC-sémát terveztek a holtjáték-hiszterézis kompenzálására.

A [68] szakirodalom olyan többtestű (multibody) rendszerekre ad példát, amelyeknek csukló hézagok és dinamikus holtjátékuk van, és foglalkozik a visszacsatolásos szabályozásukkal. A cikk megállapítja: „Az irányítási irodalomban a hézagokkal rendelkező rendszereket holtjátékkal rendelkező rendszereknek nevezik”. A publikációban a leírt kinematikai lánc szerkezet csuklójának hézagját elemezték különböző szabályozási körökkel.

Az önzáró hatás sok esetben nem kívánatos és zavarja a mechanikai rendszer működését, de vannak esetek, amikor a hatásmechanizmusa kihasználható. Az önzárás a bolygóműves fogaskerék szerkezetekben is jelen van. A [69] cikk részletesen leírja az önzárás jelenségét, részletes matematikai modellt épít fel és megtalálja a szinguláris pontokat egy egyszerű 2 DOF mechanizmusra. Az önzáró mechanizmus a Szabad(ka)-II robot esetében részben hasznos, de a legtöbb esetben nehéz a megfelelő modellezése és paramétereinek validálása.

Szabad(ka)-II egy korábbi modelljének validálási szakaszában a mérési eredmények és a modell által létrehozott eredmények között megmaradt egy kisebb mértékű különbség [1]. A kutatás során megállapítottam, hogy ennek oka a súrlódás, a holtjáték és az önzáró jelenségek nem elég pontos leírása a modellben. Az eredeti céloom nem az volt, hogy megoldást találjak az elméleti alapokra, ehelyett a munka a meglévő hatlábú robot mechanikájának súrlódási, holtjáték és önzáró hatásainak vizsgálatára összpontosított, hogy a validálás során javítani lehessen a robot modelljét. Ennek érdekében új módszereket dolgoztam ki e jelenségek paramétereinek meghatározására.

A kidolgozott validálási eljárás során az optimalizáláshoz egy heurisztikus numerikus módszert alkalmaztam. Leírtam Szabad(ka)-II robot részletes szimulációs modelljét. A modell megalkotásakor a MATLAB Simscape Multibody által nyújtott lehetőségeket használtam ki, ami a [1] publikációban szereplő megközelítéshez képest jelentősen leegyszerűsítette és felgyorsította a modellépítés folyamatát.

A validálási folyamat részét képező optimalizáláshoz a részecske raj optimalizálás (Particle Swarm Optimization - PSO) algoritmust használtam. Az optimalizálás során a meghajtó motorok által felvett áram hullámformáit vizsgáltam ki. A kutatás ezen szakaszában a cél a robotláb mindhárom motorja esetében a szimulált és a mért áramhullámformák közötti különbségek minimalizálása volt. Az validálás elvégzése előtt értelmeztem, hogy az áramhullámforma-alakváltozások mely részei vonatkoznak a súrlódásra, a holtjátékra és az önzárásra. A kidolgozott eljárás során először a súrlódásra alkalmaztam a validálást, majd a súrlódási és önzáró hatásra együttesen végeztem el a validálást, végül pedig a súrlódási, önzáró és holtjáték hatásokat egyszerre validáltam. Az eljárás eredményeként meghatároztam a robotláb mechanikájában a súrlódási, holtjáték- és önzáró hatások paramétereit.

A validálás a fizikai roboton mért csukló pozíciók és motoráramok felhasználásával történt. A fejezet végén összefoglalom az elért eredményeket és levonom a következtetéseket. A validált modell pontossága jelentősen nőtt a modellnek a súrlódás, a reduktor önzárás és a fogaskerék holtjáték részletes leírásával történő kibővítésével.

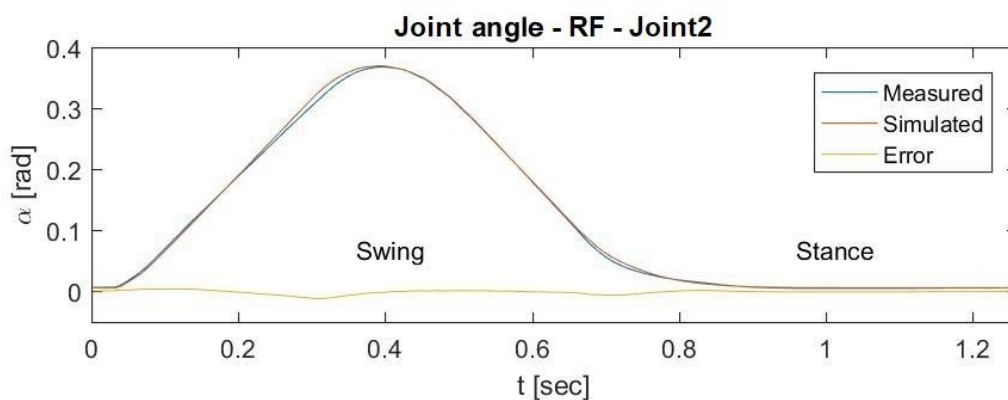
2.1 Szabad(ka)-II modell validálása

Ahhoz, hogy az szerkezeti optimalizálás reális legyen, szükség van egy validált modellre, amely valós, vagy ahhoz nagyon közeli eredményeket generál. A validálás során a modellt a valós (mért) és a szimulált eredmények összehasonlításával addig finomítják, amíg az eltérések el nem érnek egy elfogadhatóan alacsony hibaszintet.

A Szabad(ka)-II robot és annak dinamikus modellje esetében a csuklók szögeit és a motoráramokat hasonlítottam össze. A fizikai robot elektronikus rendszere mind a 18 motor áramát és a csuklók szögeit 500 Hz-es mintavételi frekvenciával méri. Ugyanezeket az értékeket a dinamikus modell is kiszámítja *iarmSM* és *qarmSM* néven (3. ábra). A továbbiakban ismertetésre kerülő összehasonlításokban a példamérések során a robot egyenes pályán mozgott, a lehető legnagyobb sebességgel, amellyel a valós robot még képes járni a talp pályájának jelentős deformációja nélkül. Ezt a sebességet úgy választottam, hogy az áramgörbéken a lehető legnagyobb tranziensek jelentkezzenek. Így a legszélsőségesebb jelenségek is vizsgálhatók.

2.2 Csukló szögek összehasonlítása

A validálás első lépésében a valós robot csuklóinak, enkóderekkel mért mozgását vettem össze a szimuláció által generált csuklószög értékekkel. A 9. ábrán a valós robot és a szimuláció által szolgáltatott adatok összehasonlítása látható a jobb első láb középső csuklójának (Joint2) esetén. A két eredmény közötti eltérés is feltüntetésre került. Az elülső láb Joint2 csuklójánál a valós forgás amplitúdója $20,61^\circ$, az átlagos hiba $0,30^\circ$, a maximális hiba pedig $0,58^\circ$. Az eredmények értelmezésekor meg kell jegyezni, hogy ez a hiba a legnagyobb terhelésnek kitett és a talajérintkezés által generált rezgések által leginkább érintett csuklónál jelentkezik. Ennek fényében a valós mérések és a szimuláció közötti fél fokos eltérés kielégítő eredmény.



9. ábra - A Joint2 csukló valós és szimulált szögpozíciói.

A valós mérések és a szimuláció által szolgáltatott értékek közötti eltérés (szöghiba) nem igényel további modell javítást, mivel maga a fogaskerék holtjáték nagyobb ennél a hibánál (az enkóder nem érzékeli a holtjátékot). A valós és szimulált csuklószög görbék összehasonlítása hasonló eredményeket hozott a többi láb és csukló esetében is. Ezek alapján a validálás elvégzéséhez a csuklószög hibát nem szükséges figyelembe venni.

2.3 Motoráramok összehasonlítása

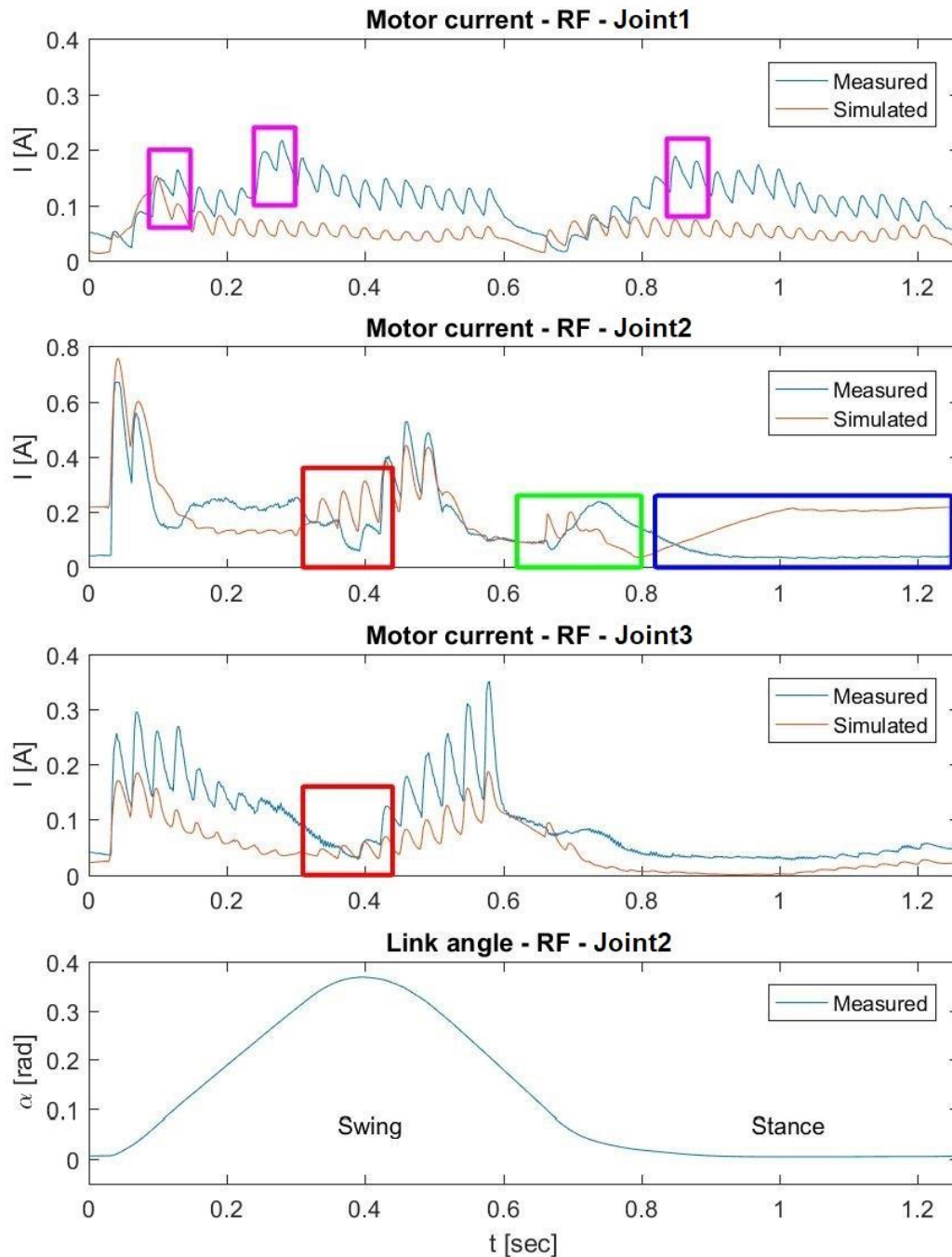
A motoráramok hitelesítése több okból is összetettebb feladat. A pályavezérlés jó eredményeket produkált módosítások nélkül is, mert a pontosan megtervezett modell mellett egy szabályozó gondoskodott a követendő lábpálya pontosságáról. A motorok teljesítményfelvételét teljesen más körülmények befolyásolják, mint például az összetett dinamika és az elektronikai egységek modellezése. A fentiekén kívül a következő tényezők miatt is várhatóak voltak hibák:

- a fogaskerekek és csapágyak súrlódása nem állandó, és jelen esetben nem mérhető,
- a talajjal való érintkezés paramétere (merevség, csillapítás és csúszás) nem adhatók

meg pontosan,

- nincs modell a kúpogaskerék holtjátékára,
- nincs modell a bolygóműves reduktor önzárására.

A továbbiakban megkísérlem azonosítani a fent említett és a még ismeretlen tényezők hatásait, és megpróbálok megoldást találni a modellezésükre.



10. ábra - Valós és szimulált áramgörbék a validálás előtt. Az első három görbe a jobb első láb három csuklóját hajtó motorok áramait mutatja, míg a negyedik görbe a második csukló szögpozícióját mutatja.

A 10. ábra a jobb első láb három csuklójának motoráramait mutatja a validálás előtt. A negyedik görbe a középső csukló szögpozícióját mutatja, amikor a láb a földön van (egyenes vonal - állás fázis - stance phase), és amikor a levegőben van (görbe vonal - lendítési fázis - swing phase). Amint a 10. ábra első három görbéjén (Joint1, Joint2 és Joint3) látható, a három csukló szimulált és valós áramai validálás nélkül is hasonlóságot mutatnak. Az eredmények további javításához azonban validációra van szükség. A mért eredmények előzetes elemzése után a valós robot és a szimulációs modell közötti viselkedésbeli különbségek alapján a következő következtetéseket lehet megállapítani:

1. A robot lábának három motorja a szimulációban lényegesen kevesebb energiát fogyaszt, mint a valós mérések során. Ez a jelenség a teljes lépésciklus alatt jelen van, és nem függ a láb aktuális helyzetétől, ezért a motorok és a fogaskerekek súrlódására vezethető vissza.
2. A szimulációban, a talp földet érése után, a Joint2 motorjának áramfelvétele sokkal nagyobb, mint a valós mérések esetében (a 10. ábrán kék téglalappal jelölve). A szimuláció eredményének magas áramfelvétele várható volt, mivel a láb súlyának fenntartásához nagy nyomatékra van szükség (a motoráram és a nyomaték közötti lineáris kapcsolat miatt). Vannak azonban olyan szakaszok, ahol a valós áramfelvétel jelentősen alacsonyabb, mint amit a szimuláció alapján várnánk. Ez akkor fordul elő, amikor a motor fordulatszáma nulla körül van, ilyenkor a reduktor önzáró mechanizmusa aktiválódik.
3. A valós mérések során a Joint2 és Joint3 csuklók áramfelvételében csökkenés tapasztalható, amikor a csuklók irányt váltanak (a 10. ábrán piros téglalapokkal jelölve). Ez a robotcsukló irányváltásakor fellépő fogaskerék holtjáték és az alacsony sebességnél fellépő Stribeck-súrlódásnak köszönhető.
4. A Joint2 motoráramában tüske keletkezik, amikor a láb a talajhoz ér. Ez a szimulációban kissé torzult a valós értékekhez viszonyítva (a 10. ábrán zöld téglalappal jelölve). Ez a jelenség akkor is előfordul, amikor a csukló irányt vált és alacsony a sebessége, tehát szintén a holtjáték és a Stribeck-súrlódás okozza.
5. A Joint1 görbéi hirtelen megemelkedett csúcsokat mutatnak (a 10. ábrán lila téglalapokkal jelölve). A robot járása közben megfigyelhető egy kismértékű, kontrollálatlan imbolygás a robot vízszintes síkjában. Ez a "parazita" mozgás a Joint1 fogaskerekeinek holtjátékából ered, így a görbéken megjelenő anomáliák is a holtjátékhoz kapcsolódnak.

A fent felsorolt megfigyelések szerint a súrlódás, az önzárás és a holtjáték között nincs jelentős kölcsönhatás. Amint a 10. ábrán látható, a különböző hatások miatti áramhullámforma alakváltozások időben elkülöníthetők és külön-külön vizsgálhatók. A súrlódási paraméterek megválasztása nem befolyásolja az önzárást, vagy a holtjátékot leíró modell paramétereit, és a súrlódás validálásának eredményét szintén nem befolyásolja az önzárás vagy a holtjáték validálása.

2.4 Alkalmazott optimalizálási eljárás

Ez az alfejezet az áram értékek közötti eltérések okaival foglalkozik, és megoldási javaslatokat tesz azok csökkentésére. A validálás elvégzéséhez az ideális modellt kibővítettem a korábban ismertetett új blokkokkal és paraméterekkel, majd pedig az újonnan bevezetett paraméterek értékeit meghatároztam egy megfelelő optimalizálási eljárással.

A legmegfelelőbb validálási eljárás kidolgozásának részeként különböző optimalizálási algoritmusok lettek elemezve és összevetve. Ezt részletesen leírják az [1] és [49] publikációk. A probléma jellege alapján az optimalizálás elvégzésére a Particle Swarm Optimization (PSO) algoritmust választottam. A szimulációs eredmények kiértékeléséhez a következő fitness függvényt vezettem be (MAE/M, (2.1) egyenlet):

$$\text{MAE/M} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_{real,i} - I_{sim,i}|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{real,i}}, \quad (2.1)$$

ahol $I_{real,i}$ a valós robot áramfelvételét, $I_{sim,i}$ a szimulációban mért áramfelvételt, N pedig a vizsgált időtartam alatt elvégzett mintavételezések számát jelöli.

A valós roboton mért áramok egy RC aluláteresztő szűrőn keresztül vannak megszűrve. A szűrő pontos határfrekvenciájának és a méréseket befolyásoló ADC beállításainak az identifikációja nem történt meg a beágyazott rendszer implementálásakor. Emiatt a szimulált áramot egy olyan elsőrendű szűrőn keresztül szűrtem, melynek határfrekvenciáját szintén a validálás során határoztam meg.

2.5 Súrlódás modellezése

A valós roboton végzett mérések során a motorok nagyobb fogyasztása valamilyen elektromos, vagy mechanikai veszteségekből adódhat. Mivel a modellezés során figyelembe vettem a

motorok és a reduktorok hatásfokát, feltételeztem, hogy az energiaveszteség elsősorban a fogaskerekek és a csuklók súrlódásából adódik. Ennek okán a modellt kibővítettem, hogy a forgás közben jelentkező súrlódások is figyelembe legyenek véve. A veszteség szimulálásához a modellhez hozzáadtam egy forgási súrlódás (Rotational Friction) blokkot. Ez a blokk az érintkező forgó testek közötti súrlódást reprezentálja. A súrlódási nyomaték a relatív szögsebesség függvényében van szimulálva, és feltételezhető, hogy ez a Stribeck, a Coulomb- és a viszkózus komponensek összege. A súrlódás a (2.2) egyenlet [70] segítségével közelíthető:

$$T_{friction} = \sqrt{2}e(T_{brk} - T_C) \cdot \exp\left(-\left(\frac{\omega}{\omega_{St}}\right)^2\right) \cdot \frac{\omega}{\omega_{St}} + T_C \cdot \tanh\left(\frac{\omega}{\omega_{Coul}}\right) + f\omega, \quad (2.2)$$

$$\omega_{St} = \omega_{brk}\sqrt{2},$$

$$\omega_{Coul} = \omega_{brk}/10,$$

ahol $T_{friction}$ a súrlódási nyomaték, T_C a Coulomb-súrlódási nyomaték, T_{brk} az elszakadási (breakaway) súrlódási nyomaték, ω_{brk} az elszakadási súrlódási szögsebesség, ω_{St} a Stribeck-szögsebesség küszöbérték, ω_{Coul} a Coulomb-szögsebesség küszöbérték, ω a relatív szögsebesség és f a viszkózus súrlódási együttható.

Az első validálás során az aluláteresztő szűrő határfrekvenciáját és a három súrlódási paramétert (Coulomb-súrlódási nyomaték, Stribeck-súrlódási nyomaték és viszkózus súrlódási együttható) határoztam meg. Az így kapott paramétereket a 4. táblázat Súrlódás című része tartalmazza, míg a súrlódás figyelembevételével kapott áramgörbéket a 12. ábra első oszlopa mutatja. A validálás előtti és utáni hibaértékek (MAE/M) összehasonlítása (11. ábra) azt mutatja, hogy a súrlódás figyelembevételével jelentős javulás érhető el a Joint1 és a Joint3 esetében, míg a Joint2 eredményei sokkal kisebb mértékben javultak. A Joint2 viselkedése további elemzést igényelt.

2.6 Reduktor önzárásának modellezése

A robot testtartása és járása miatt a femur közel párhuzamos a talajjal, miután a talp érintkezik a talajjal és állás (stance) helyzetbe kerül. Ennek eredményeként a Joint2 csuklónak nagy nyomatékot kell kifejtenie ahhoz, hogy a láb tartani tudja a test súlyát, ami a szimulációban megfigyelt magas áramfogyasztást eredményezi. Ezzel szemben a valós mérések minimális áramfelvételt mutatnak. Ennek a jelenségnek az oka nagy valószínűséggel a reduktor önzáró tulajdonsága.

Az önzárás leggyakrabban a csigahajtóműveknél jelentkezik; azonban bolygóműves reduktorok használata során is előfordulhat, különösen nagyobb áttételezésnél vagy több fogaskerék-fokozatú sebességváltóknál. A Szabad(ka)-II robotban használt mindkét bolygóműves reduktor nagy redukciós aránnyal (246, 256) és négy fogaskerék-fokozattal rendelkezik.

Az önzáró reduktor működése a csigakerék (Worm Gear) blokkal modellezhető, mivel az eddig használt egyszerű fogaskerék (Gear) blokk ezt nem tudja megvalósítani. A csigakerék egyik jellemzője, hogy az alaptengelyről a követőtengelyre történő (előre irányuló) nyomatékátvitel hatásfoka (hatásfok a csigától a fogaskerekre - η_{WG}) és a követőtengelyről az alaptengelyre történő (hátrafelé irányuló) nyomatékátvitel hatásfoka (hatásfok a fogaskeréktől a csigára - η_{GW}) külön állítható.

Csigakerék blokk használata esetén az önzárás akkor lép fel, ha az η_{GW} hatásfok értéke negatív. Ha ez a feltétel teljesül, akkor a blokkolt mechanizmus az alaptengely oldalán alkalmazott külső nyomatékkal oldható fel, azaz csak a motor oldhatja fel az önblokkolást. Minél negatívabb az η_{GW} értéke, annál nagyobb nyomaték szükséges a feloldáshoz. Az η_{WG} és az η_{GW} hatásfokok értékei csak akkor aktívak teljes mértékben, ha az átvitt teljesítmény nagyobb, mint a p_{th} teljesítményküszöb. Ha a teljesítmény alacsonyabb, mint ez a küszöbérték, akkor a tényleges hatásfok nulla sebességnél automatikusan egységre szabályozódik. A [71] cikk nagy részletességgel kutatta a bolygóműves fogaskerekek önzárásának feltételeit.

Az önzárást is tartalmazó modell validálásakor a meghatározandó paraméterek listája kibővült az előre irányuló hatásfok (η_{WG}), a hátrafelé irányuló hatásfok (η_{GW}) és a teljesítményküszöb (p_{th}) paramétereivel. A reduktorok 0,60 és 0,64-es rögzített hatékonysága helyett az η_{WG} határait a 0,32 és 1,00 közötti tartományban, az η_{GW} határait pedig -1,00 és -0,32 közötti tartományban határoztam meg.

Az így kapott paraméterek a 4. táblázat Súrlódás és önzárás című részében láthatók. Az önzárással ellátott áramgörbéken (12. ábra második oszlopa) jól látható, hogy az önzárás modellezése jelentősen javította a Joint2 hibáját, ahol a csukló nagy terhelés mellett fél lépésciklust mozgás nélkül töltött el. Kisebb, de nem elhanyagolható javulás látható a Joint3 esetében is, ahol a csukló szintén fél lépésciklust töltött mozgás nélkül, de sokkal kisebb terhelés mellett. A Joint1 hibája csak minimálisan javult, mivel ez a csukló a teljes lépésciklus alatt mozgásban volt, és ezért itt nem következhetett be önzárás. A három csukló hibaértékei közötti eltérés (MAE/M) (11. ábra) jelentősen lecsökkent.

2.7 Holtjáték modellezése

A súrlódással és önzárással bővített modell validált áramgörbéin még megfigyelhető volt néhány kisebb tüske. E tüskék jellege és elhelyezkedése alapján a jelenség oka a fogaskerekek holtjátéka lehet.

A fogaskerekek holtjátéka a Rotational Hard Stop blokk segítségével modellezhető. Ez a blokk egy kétoldali mechanikai forgási kemény ütközést reprezentál, amely megakadályozza a forgómozgás átvitelét a felhasználó által beállított felső és alsó szöghatár között. E határok felett és alatt a forgómozgást a szegmensek között egy csillapított rugós kapcsolat továbbítja. A kemény ütközés modelljét a (2.3) egyenlet írja le [72]:

$$T_{backlash} = \begin{cases} K_p \cdot (\varphi_{slider} - g_p) + D_p \cdot \omega_{slider}, & \text{ha } \varphi_{slider} \geq g_p \\ 0, & \text{ha } g_n < \varphi_{slider} < g_p, \\ K_n \cdot (\varphi_{slider} - g_n) + D_n \cdot \omega_{slider}, & \text{ha } \varphi_{slider} \leq g_n \end{cases} \quad (2.3)$$

ahol $T_{backlash}$ a csúszka és a tok (ezek a blokk részei) közötti kölcsönhatási nyomaték, g_p és g_n a csúszka és a felső, illetve alsó határok közötti kezdeti hézagok, φ_{slider} a csúszka szögpozíciója, K_p és K_n az érintkezési (rugó) merevség a felső, illetve az alsó határoknál, D_p és D_n a csillapítási együttható a felső, illetve az alsó határoknál, ω_{slider} pedig a csúszka szögsebessége.

Ha megfelelő nagy rugómerevséget alkalmazunk (a modellben 1.000.000 Nm/rad), a kapcsolat merevnek tekinthető. Megfelelően alacsony csillapítási együttható (0,01 Nm/(rad/s)) esetén az energiaveszteség elhanyagolható. Mivel a fogaskerekben még a holtjáték alatt is előfordul némi rugózás és csillapítás, a Rotational Hard Stop blokkjával párhuzamosan egy torziós rugó-csillapító (Torsional Spring-Damper) blokkot adtam hozzá, melynek paramétereiként megadható a visszaállító rugómerevség és a viszkozus súrlódási együttható. A torziós rugó-csillapítót a (2.4) egyenlet írja le [73]:

$$T_{gear} = K \cdot \varphi_{rel} + D \cdot \omega_{rel}, \quad (2.4)$$

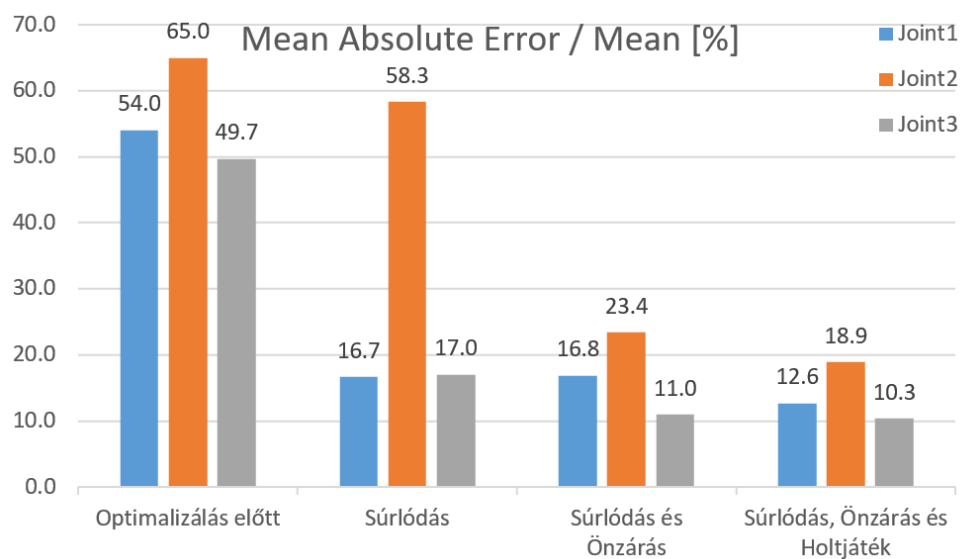
ahol T_{gear} a rugó-csillapítón keresztül átadott nyomaték, K a rugó merevsége, φ_{rel} a relatív elmozdulási szög (rugó deformációja), D a csillapítási együttható, ω_{rel} pedig a relatív szögsebesség.

A holtjátékkal kibővített modell validálásakor a beállítandó paraméterek listája kibővült a holtjáték felső és alsó szögével (szimmetria okokból ezeket egyetlen szögnek vesszük), a rugó-

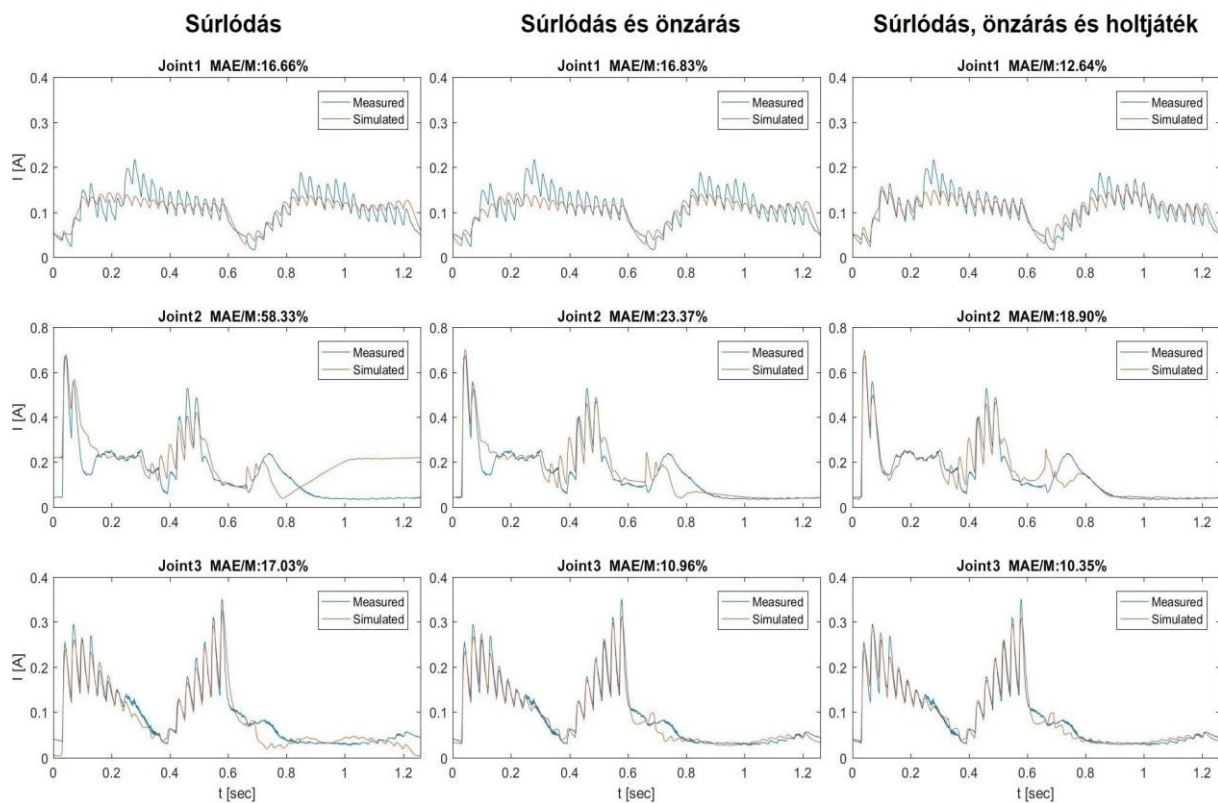
csillapító rugó merevségével és csillapítási együtthatójával.

Az így kapott paramétereket a 4. táblázat Súrlódás, önzárás és holtjáték című része tartalmazza. A holtjáték modellezésének köszönhetően a modell sikeresen reprodukálta a valós áramgörbe első néhány tüskéjét a Joint1 és Joint2 csuklók görbéin (12. ábra harmadik oszlopa). A görbén később megjelenő tüskék oka azonban még mindig nem egyértelmű.

Az validálás előtti és utáni hibaértékek (MAE/M) összehasonlítása (11. ábra) azt mutatta, hogy a holtjáték figyelembevételével további javulást sikerült elérni, különösen a Joint1 és Joint2 csuklók esetében. A Joint3 esetében a javulás kisebb mértékű, mivel a holtjáték hatása ennél a szegmensnél a valós roboton sem volt különösebben kiemelkedő.



11. ábra - Az áramhibák változása a validálás alatt (MAE/M): validálás előtt; a súrlódás hatásának validálása után; a súrlódás és az önzárás együttes validálása után; illetve a súrlódás, az önzárás és a holtjáték együttes validálása után.



12. ábra - A csuklók (Joint1, Joint2 és Joint3) áramgörbéi a validálás különböző fázisaiban: 1. oszlop: a súrlódási paraméterek validálása után, 2. oszlop: a súrlódási és önzárási paraméterek validálása után, 3. oszlop: a súrlódási, önzárási és holtjáték paraméterek validálása után.

Súrlódás				
		Joint1	Joint2	Joint3
Csukló				
Fitness érték (MAE/M)		-16,66	-58,33	-17,03
Aluláteresztő szűrő	Határfrekvencia [Hz]	26,41	39,74	77,83
Súrlódási paraméterek	Coulomb-súrlódás [Nm]	0,068	0,002	0,125
	Stribeck-súrlódás [Nm]	0,207	0,001	0,001
	Viszkóz súrlódás [Nm/(rad/s)]	0,248	0,332	0,230
Súrlódás és önzárás				
		Joint1	Joint2	Joint3
Csukló				
Fitness érték (MAE/M)		-16,83	-23,37	-10,96
Aluláteresztő szűrő	Határfrekvencia [Hz]	30,10	52,44	78,36

Súrlódási paraméterek	Coulomb-súrlódás [Nm]	0,360	0,675	0,642
	Stribeck-súrlódás [Nm]	0,029	0,009	0,580
	Viszkóz súrlódás [Nm/(rad/s)]	0,008	0,001	0,003
Önzárási paraméterek	Előre irányuló hatásfok [%]	0,683	0,882	0,960
	Hátra irányuló hatásfok [%]	-0,847	-0,929	-0,883
	Teljesítménykülöb [W]	1,373	1,374	1,751

Súrlódás, önzárás és holtjáték

Csukló		Joint1	Joint2	Joint3
Fitnesz érték (MAE/M)		-12,64	-18,90	-10,35
Aluláteresztő szűrő	Határfrekvencia [Hz]	45,62	53,48	77,05
Súrlódási paraméterek	Coulomb-súrlódás [Nm]	0,212	0,653	0,574
	Stribeck-súrlódás [Nm]	0,006	0,039	0,260
	Viszkóz súrlódás [Nm/(rad/s)]	0,103	0,006	0,055
Önzárási paraméterek	Előre irányuló hatásfok [%]	0,391	0,866	0,992
	Hátra irányuló hatásfok [%]	-0,747	-0,996	-0,725
	Teljesítménykülöb [W]	2,710	1,042	1,397
Holtjáték paraméterek	Holtjáték szög [deg]	5,482	3,616	2,231
	Rugómerevség [Nm/rad]	8,045	16,072	5,493
	Csillapítás [Nm/(rad/s)]	0,241	0,092	0,209

4. táblázat - A validálással meghatározott paraméterek három esetben: 1) csak a súrlódás hatásának figyelembevételével, 2) a súrlódás és az önzárás mechanizmusának figyelembevételével, 3) a súrlódás, az önzárás és a holtjáték hatásának figyelembevételével.

2.8 Eredmények

Létrehoztam egy új módszert a súrlódás, a reduktor önzárás és a holtjáték mechanizmusok azonosítására egy komplex, nemlineáris robotszerkezetben. A módszer realizálásához a Szabad(ka)-II robot teljesen dinamikus modelljét használtam a Simscape Multibody szoftverkörnyezet segítségével.

A modell építése során részletesen kidolgoztam az elektronikai és mechanikai elemeket. A modelltől kapott eredmények (csukló áramok) kezdetben nagyobb eltérést mutattak a valós rendszer mérési eredményeitől. A validálás folyamán azonosítottam az eltérések fő okait, és az ezekből eredő hibákat jelentősen csökkentettem. Megítélésem szerint a súrlódás, az önzárás és a holtjáték között nincs jelentős kölcsönhatás. Az e jelenségek által okozott áramhullámforma-eltérések időben elkülöníthetők és külön-külön vizsgálhatók. A validálás során, ahogy a modellt lépésről lépésre továbbfejlesztettem a súrlódás, az önzárás és a holtjáték szimulálása érdekében, az eredmények folyamatosan javultak.

A validálás előtt a három csukló teljesítménymutatói (a fitness függvény mutatójaként is használt MAE/M) rendre 54,0% (Joint1), 65,0% (Joint2) és 49,7% (Joint3) voltak. A validálás után ezek az értékek 12,6%-ra, 18,9%-ra, illetve 10,3%-ra csökkentek.

A végső áramgörbéken még mindig látható néhány kisebb eltérés. Az egyik tipikus jelenség a véletlenszerű tüskék a Joint1 csukló áramában (minden lépésben 2-3 csúcs fordul elő). Feltételezésem szerint ez a robot testének vízszintes billegéséből adódik, ami a valós roboton is megfigyelhető. Ez a billegés a robot mind a hat lábában a Joint1 csuklók egyidejű holtjátékának eredménye. Ennek a jelenségnek a szimulálása különösen nehéz feladat lenne, mivel a valós életben történő imbolygás túlságosan véletlenszerű ahhoz, hogy szimulálni lehessen. Ennek a problémának a megoldása nem különösebben fontos, mivel további robotszerkezeteink esetén a csuklókat olyan mechanikai megoldásokkal tervezzük kialakítani, amelyek a holtjátékot elhanyagolható szintre csökkentik.

Egy másik jelenség a Joint2 áramgömbjén a csúcs eltolódása, amikor a láb a talajhoz ér. Véleményem szerint ez a láb egyszerű kialakításának és pontatlanul megadott paramétereinek köszönhető. A következő robot modell fejlesztése során szeretném nagyobb pontossággal meghatározni a lábak és a talp rugóállandóinak és csillapítási együtthatóinak értékeit. Ennek érdekében már elkészítettem egy tripla rugózással és csillapítással ellátott láb prototípusát (3. fejezet), valamint egy teszt munkapadot a lábmodell validálására [74].

2.9 2. téziscsoport

2.1 tézis

Kidolgoztam egy eljárást járó robotszerkezetek dinamikus szimulációs modelljének validálására. A validált modell megfelelő pontosságot ad mérnöki fejlesztések elvégzésére. Az eljárás magában foglalja a robotokon alkalmazott hajtáselemek modellezését és a modellparaméterek identifikációját. A validálási folyamat lényegi részét a nem ideális mechanikai jelenségek feltárása, illetve azok paramétereinek meghatározása jelentette. A szimulációs eredmények kiértékeléséhez a következő fitness függvényt vezettem be:

$$\text{MAE}/M = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_{real,i} - I_{sim,i}|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{real,i}},$$

ahol $I_{real,i}$ a valós robot áramfelvételét, $I_{sim,i}$ a szimulációban mért áramfelvételt, N pedig a vizsgált időtartam alatt elvégzett mintavételezések számát jelöli.

A módszer helytállóságát a Szabad(ka)-II. robot dinamikus modelljének validálásán keresztül igazoltam.

Tézishez kapcsolódó saját publikáció: [53].

2.2 tézis

A validálási folyamat során azonosítottam a kezdeti nagyobb eltérések fő okait. Megmutattam, hogy a súrlódás, az önzárás és a holtjáték között nincs jelentős kölcsönhatás, a jelenségek által okozott áramhullámforma-eltérések időben elkülöníthetők és külön-külön vizsgálhatók. A validálás során, ahogy a modellt lépésről lépésre továbbfejlesztettem a súrlódás, az önzárás és a holtjáték szimulálása érdekében, az eredmények folyamatosan javultak.

Tézishez kapcsolódó saját publikáció: [53].

3 Szabad(ka)-III robot új lábszerkezetének kutatása és megvalósítása

Kutatásom végső célját, az optimalizált test- és lábszerkezettel rendelkező robot megalkotását a következő robot, Szabad(ka)-III megvalósítása során szeretném elérni. Ennek a feladatnak egy jelentős része a jelen fejezetben bemutatásra kerülő, új lábszerkezet kutatása és létrehozása, ami magában foglalja a kinematikai és mechanikai kihívások megoldását is.

A szerkezeti optimalizálás elvégzéséhez létrehoztam egy új modellt, melyben az optimalizálás során dinamikusan változtathatók a lábak, a test, illetve az ezek illesztésével kapcsolatos paraméterek. A modellezési folyamatokat két részre lehet bontani. A szerkezeti optimalizálás elvégzéséhez „matematikai” modellezésre; a részletes, megfelelően működő mechanikai szerkezet megvalósításához pedig CAD modellezésre volt szükség. A tervezés elején meghatároztam, hogy a szerkezet mely elemeit tervezem meg véglegesen a CAD szoftverben, és mely részeit fogom a matematikai modellben paraméterezni.

Az elvi felépítését tekintve, a robotot a következő elemek alkotják: a csuklók, a csuklókat összekötő lábszegmensek és a test. A csuklók felépítése felettebb komplex, és a méreteiket az optimalizálás során nem kell változtatni, ezért ezeket előre megterveztem és kidolgoztam egy CAD szoftverben. Ezzel szemben a lábszegmenseknek és a testnek viszonylag egyszerű a felépítésük, és szükséges a paramétereik változtatása, ezért ezeket a matematikai modellben hoztam létre.

3.1 Lábszerkezeti megvalósítások áttekintése hasonló járó robotok esetén

Az új lábkialakítás elektromechanikai felépítésének meghatározása előtt irodalomkutatást végeztem melynek során nagyszámú, különféle célokra épített hexapod robot megvalósítást találtam. Ezek közül a legrelevánsabb megoldásokat ismertetem ebben az alfejezetben.

A LAVA járó robot esetében a lábak testhez közelebb eső két csuklóját inverz differenciális meghajtó rendszerrel hajtják. Attól függően, hogy milyen sebességgel forog a két fogaskerék hajtómotorja, a lábak emelhetők, lendíthetők vagy egyszerre végezhetik mindkét mozgást. Ennek a megoldásnak az előnyei, hogy az emelésnek és a lendítésnek közös geometriai elfordulási pontja van (egyszerűbb a kinematikai modellezés), illetve, hogy a lábrendítés és a lábemelés során mindkét motor egyszerre mozog. Független lábmozgás esetén (a legnagyobb nyomaték alkalmazásakor) mindkét motor egyszerre emeli robotot. További érdekes

mechanikai megoldás, hogy LAVA kúpfogaskerekek helyett csiga hajtást használ. A csigahajtás előnye a kúpfogaskerékes hajtással szemben, hogy az előbbinek önzáró tulajdonságai vannak. Ez a funkció azért fontos, mert a robot álló helyzetben, energiafogyasztás nélkül képes megtartani a csukló helyzetét [8]. A Szabad(ka)-II robot esetén használt reduktorok önzáró képességeinek elemzését az [53] cikkben végeztem el. Korábbi kutatásom megmutatta, hogy a bolygóműves reduktor is jelentős energiafogyasztás nélkül képes a csuklók pozícióinak megtartására, ezért esetünkben a csigakerékes hajtás használata nem jár előnyökkel.

A LAVA-hoz hasonlóan a SILO6 robot is inverz differenciális meghajtó rendszert használ. Azonban SILO6-ban a fogaskerékrendszer a testtől távolabb eső két csuklót hajtja. Ez a megoldás lehetővé tette, hogy a három motor elhelyezése közelebb kerüljön a testhez. Esetünkben fontos a motorok védelme, mivel a SILO6 elsődleges célja aknák hatástalanítása [22].

A NASA által kifejlesztett LEMUR II végtagjainak elrendezése a korábbi példákhoz képest egyszerűbb, minden csuklót közvetlen hajtómű hajt. Ez az elrendezés lehetővé teszi az integrált csukló megvalósítást, ami moduláris végtag kialakítást eredményez. Az összes csuklót Maxon gyártmányú, 13 mm-es, 24 voltos egyenáramú motorok működtetik, kisebb hullámhajtóművekkel. A végtagok gömbszerű csuklókkal rendelkeznek, ami nagyobb munkaterületet eredményez [13].

A SpaceClimber robot egy hatlábú, biológiai ihletésű, energiatakarékos és adaptív, szabadon mászó robot, melyet meredek lejtőkön történő járásra terveztek. A lábszegmensek hosszát, valamint a test méretét és a rögzítési pontok helyzetét szimuláción alapuló optimalizálási és tervezési eljárással határozták meg, evolúciós számítás segítségével. Mindegyik lábnak négy szabadságfoka van, és RoboDrive gyártmányú BLDC motorokat, valamint Harmonic Drive gyártmányú hullámhajtóműveket használ. Ezek az egységek azonos módon vannak felépítve a későbbi ürminősítési eljárások leegyszerűsítésének érdekében. A lábakba több érzékelő is be van építve: egy lineáris enkóder a belső rugó összenyomódásának mérésére, négy nyomásérzékelő a talaj érintkezés és a támadási szög mérésére, három-tengelyes gyorsulásmérő a megcsúszás észlelésére és négy opcionális nyúlásmérő bélyeg a szimmetrikus láb karmaiban a karom hajlásának mérésére. A gömb formájú talp poliuretán bevonattal rendelkezik [27].

A HITCR-II hexapod robot egy bonyolult láberő érzékelő rendszert használ, amely mind a hat láb esetében azonos [29]. Az érzékelő rendszer elrendezését és konfigurációját a lábak szerkezetének és méretének megfelelően alakították ki. Megtervezték a csukló nyomaték

érzékelőket, a 3-DOF-os láb végi erő érzékelőt és az erőinformáció-feldolgozó modult. Az erő érzékelő paramétereit szimulációkkal és kísérletekkel tesztelték. Ezenkívül megvalósítottak egy erőérezékelő rendszert a robotvezérlő architektúrában belül. Végül foglalkoztak a hexapod robotláb erőérezékelő rendszerének kísérleti kiértékelésével, és verifikálták a láberő érzékelő rendszer teljesítmény eredményét [75].

3.2 A robotláb kinematikai kialakítása

Egy hexapod robot lábának kinematikai kialakítása az ipari robotkarok tervezéséhez hasonló probléma. A talp pózát, vagyis szabadságfokainak számát a csuklók száma határozza meg. A talp egy tetszőleges pozíciójának felvételéhez a három dimenziós térben három csukló szükséges. További csuklók alkalmazásával a talp (illetve a kinematikai kialakítástól függően az alsó lábszár vagy az egész láb) orientációját lehet megadni. Egy negyedik csukló, illetve szabadságfok bevezetésével elérhető, hogy a teljes láb elfordulhasson az Y tengely (21. ábra) mentén. Ennek demonstrációja a 13. ábrán látható. A negyedik szabadságfok bevezetésének fő célja, hogy a láb mozgása ferde talajon is az Y-Z síkban legyen. Ennek előnye, hogy a csuklók kevésbé vannak terhelve, illetve, hogy a robot gravitációs középpontja a talpakhoz mérve előrébb kerül. Egy ötödik csukló használatával lehet megoldani, hogy az utolsó lábszegmens (tibia vagy talp) hossztengelye egybeessen a gravitációs gyorsulás vektorával.

Szabad(ka)-III kialakításánál első lépésben a lábankénti három szabadságfokú verzió volt kiválasztva (13. ábra - bal). Ennek a megoldásnak a kivizsgálása után implementáltam a negyedik szabadságfokot a ferde talaj esetén jelentkező előnyök miatt (13. ábra - jobb). A láb modulban található motorok három szabadságfok mozgásáért felelnek, a negyedik szabadságfok mozgását a test modulban valósítottam meg. Az ötödik szabadságfok bevezetésére nem kerül sor, mivel ennek Szabad(ka)-III robot esetén nem lenne számottevő előnye a talpak gömbszerű kialakítása miatt.

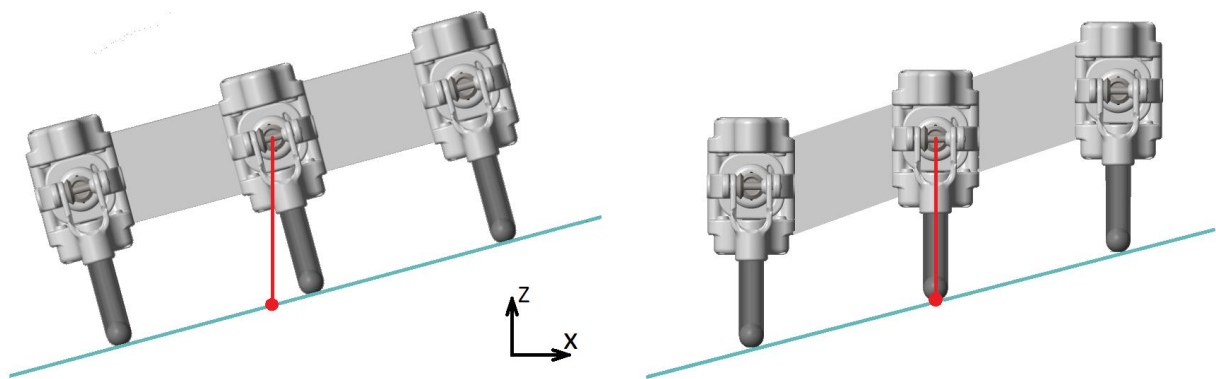
Fontos észrevenni, hogy a csuklók számának, illetve a kinematikai összetettség növelésével párhuzamosan a robot mechanikai pontatlansága is fokozódik, hiszen, ha minimálisan is, de minden csukló rendelkezik bizonyos mértékű holtjátékkal (backlash). Ez látható is a hexapod robotok többségében, az azokról készített videofelvételeken. A jelenség a Szabad(ka)-II robot esetében is jellemző volt és ki lett fejtve [53].

A biológiailag inspirált Szabad(ka)-III robot szerkezeti meghatározásának kiinduló pontját a hangya, illetve a botsáska anatómiai felépítése adta. Hasonló elvekből indultak ki a következő hexapod robotok esetében is:

A LAURON V 4 DOF-os bio-inspirált lába a botsáskáéhoz hasonló kinematikai szerkezettel rendelkezik, a lábak konfigurációját optimalizálási módszerekkel határozták meg [76].

A SpaceClimber lábanként 4 DOF-os konfigurációja lehetővé teszi a különböző lábpozíciók könnyű elérését a lábak energiatakarékos, rovarszerű M formájában [27].

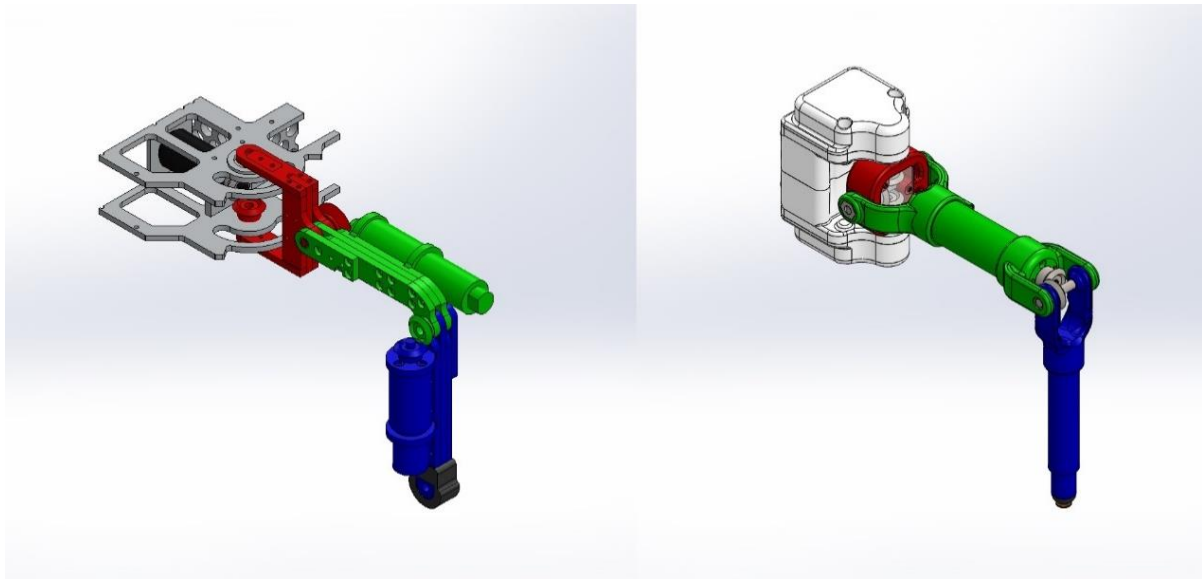
A lábanként 3 DOF-os HITCR-II roboton végzett optimalizáció eredményeképp létrejött kinematikai kialakítás a botsáska anatómiai felépítésére hasonlít, ezzel is megerősítve az optimalizáció helytállóságát [29].



13. ábra - (bal) 3 DOF-os robot, (jobb) 4 DOF-os robot.

3.3 Szabad(ka)-III lábszerkezete

Szabad(ka)-II-höz viszonyítva, Szabad(ka)-III csuklóinak, illetve teljes lábszerkezetének kialakítása lényegesen fejlettebb és összetettebb. A kettő közötti összehasonlítás a 14. ábrán látható.



14. ábra - (bal) Szabad(ka)-II régi láb kialakítása, (jobb) Szabad(ka)-III új láb kialakítása.

A régi és az új lábkialakítás is három szabadságfokkal és három szegmessel rendelkezik, melyeket három motor hajt meg. A három szegmens az ábrákon különböző színnel van jelölve (tibia - kék, femur - zöld és coxa - piros). A régi láb esetén minden motor egy csuklót hajtott meg és a csuklók mellett helyezkedett el. Az új láb esetén két motor a reduktor házban helyezkedik el, egy pedig a femur szegmensben.

A Szabad(ka)-II esetén a testben lévő csuklók (Joint1) és az alsó lábszegmenseket mozgató csuklók (Joint3) kisebb nyomatékkal rendelkeznek. Ezért kisebb nyomatékú motor-reduktor párok hajtják őket. A felső lábszegmenst mozgató csuklók (Joint2) nyomatékai magasabb értékekkel rendelkeznek, mivel lényegében ezek a csuklók felelősek a robot emeléséért. Ezért ezeket a csuklókat erősebb motorokkal és reduktorokkal láttam el. A több fajta motor-reduktor pár használata összetettebb és drágább robotot eredményezett. Emiatt kerestem egy praktikusabb megoldást, ami egy differenciális meghajtó rendszer alkalmazásában nyilvánult meg.

Ezzel a megoldással az eredetileg a Joint1-et és Joint2-t mozgató két motor nyomatéka együttesen használható fel a robot femurjának mozgatására. Attól függően, hogy a két motor milyen sebességgel forog, a lábak emelhetők, lendíthetők, vagy egyszerre képesek mindkét mozgást végezni. A lendítés és az emelés során mindkét motor együtt dolgozik a kívánt mozgás elérésében. Független lábmozgások esetén (a legnagyobb nyomaték alkalmazásakor) mindkét motor egyszerre emeli a robotot. Egy ilyen megoldás alacsonyabb súlyt és energiafelhasználást eredményez. A nyomatékok összeadásával elvileg az emeléshez szükséges nyomaték felének megfelelő motorok is használhatók, ami lehetővé teszi, hogy mindhárom motor azonos típusú

legyen. Ebből a kialakításból pár további előny is származik. A szóban forgó két motor közelebb került a test középpontjához, amivel növekedett a robot stabilitása, és tovább csökkent a lábak tömege. Mivel a differenciális meghajtó rendszerrel a motorok tengelyeinek közös geometriai forgáspontjuk van, ezért a coxa szegmens hossza nullára redukálódott. Ez egyszerűbb kinematikai felépítést és mechanikai megvalósítást jelent.

Szabad(ka)-III lábai további fejlesztéseken is áttestek. Szabad(ka)-II lábai alumínium lapokból lettek kialakítva, a motorok és a kábelek a szegmensek oldalán helyezkedtek el. A csapágyazás a motor tengelyétől eltolva, egyoldalasan volt elhelyezve, ami növelte a fogaskerekek közötti hézagot. A talpak egy egyszerű gumis bevonatot kaptak a vibrációk elnyelésére.

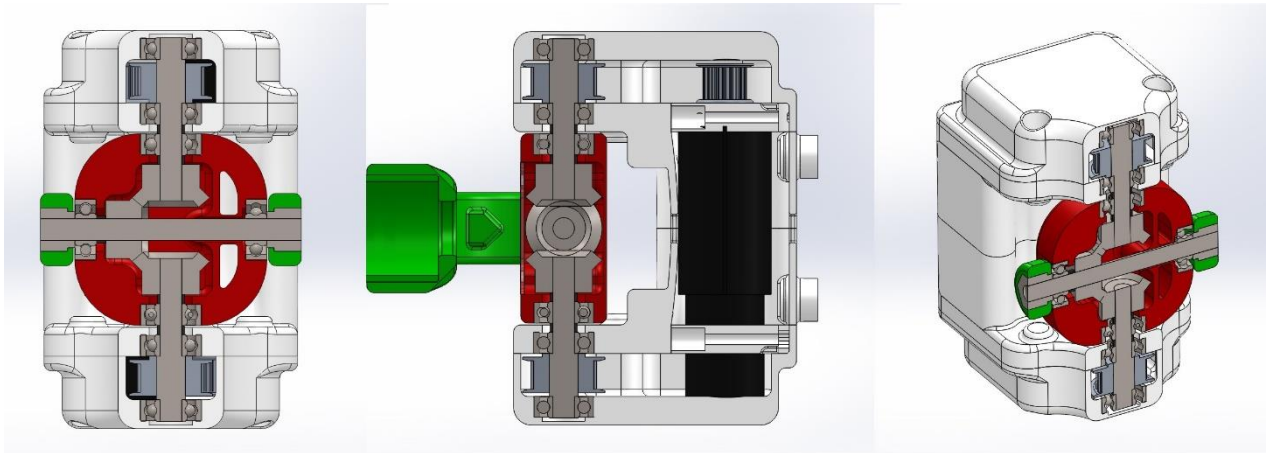
Szabad(ka)-III esetében az előre megtervezett csuklókat elsődlegesen PLA-ból gyártottam 3D nyomtatással, a szegmenseket pedig alumínium csövekből alakítottam ki. A 3D nyomtatásnak köszönve tetszőlegesen összetett elemeket is meg tudtam valósítani, az alumínium csövek pedig megfelelően egyszerűek voltak ahhoz, hogy hosszukat (tibia és femur) a matematikai modellezés során is állítani lehessen. A három motor bekerült a differenciális hajtás házába, illetve a femur szegmensbe, ezért fedett és védett helyen vannak. A csuklók csapágyazása golyóscsapágyakkal lett megvalósítva, csuklónként két csapággal, és a motor tengelye a csapágyak között helyezkedik el, amivel jelentősen lecsökkent a fogaskerekek közötti hézag. A talpakban egy hármas rugó-csillapító rendszert hoztam létre. A korábbi és az új lábszerkezet közötti eltérések az 5. táblázatban vannak összefoglalva:

Paraméter:	Szabad(ka)-II	Szabad(ka)-III
Fő jellemző:	Hagyományos hajtás	Differenciál hajtás
Motorok elhelyezése:	Szegmens mellett	Szegmensben, közel a testhez
Talp kialakítása:	Gumiszerű bevonat	Hármas rugózás
Tibia szegmens hossza:	120 mm	Változtatható
Femur szegmens hossza:	80 mm	Változtatható
Coxa szegmens hossza:	60 mm	0 mm
Motorok és reduktor:	4 fajta kombináció	1 fajta
Gyártástechnológia:	Alumínium lapok	3D nyomtatás, alu. csövek
Csapágyazás:	Csúszócsapágy, eltolva	Golyóscsapágy, igazítva

5. táblázat - A régi és az új láb mechanikai jellemzői.

3.4 A láb differenciális meghajtó rendszere

Az új láb differenciális meghajtó rendszere a 15. ábrán látható:



15. ábra - Az új láb differenciális meghajtó rendszere (a) metszet előlnézetben;
(b) metszet oldalnézetben; és (c) metszet szög alatti nézetben.

A differenciális meghajtót két darab motor-reduktor egység hajtja. Ezek mechanikai paraméterei a 6. táblázatban láthatók. (A tibiát is ez az egység hajtja meg.) A reduktorok nyomatékát további 3:2 redukciójú fogasszíj átvitel viszi át a differenciál hajtás kúpfogaskerekeire. A két motor együttes erejéből eredő nyomaték a (3.1) egyenlet alapján számítható:

$$M = N_{mot} \cdot M_{mot} \cdot N_{gear} \cdot N_{belt} \cdot \eta_{red} = 2 \cdot 0,01 \cdot 256 \cdot 1,5 \cdot 0,64 = 4,92 \text{ Nm}, \quad (3.1)$$

ahol N_{mot} a motorok száma, M_{mot} a motor maximális nyomatéka, N_{gear} a reduktor átvitelének redukciója, N_{belt} a fogasszíj átvitelének redukciója, és η_{red} a reduktor hatékonysága.

Motor	2232U 012SR	Reduktor	26 A
Maximális nyomaték	10 mNm	Időszakos nyomaték	1,5 Nm
Motor tömege	62 g	Reduktor tömege	25 g
Csuklók	Joint1 – Joint3	Reduktor áttétele	256
Motor hatásfoka	85 %	Reduktor hatásfoka	64 %

6. táblázat - A motorok és reduktorok mechanikai paraméterei.

A differenciális hajtás teljesen zárt háza PLA filamentből lett kinyomtatva. A fogastárcsák anyaga alumínium, a tengelyek, kúpfogaskerekek és csapágyak pedig acélból készültek. A végleges prototípus a 16. ábrán látható.



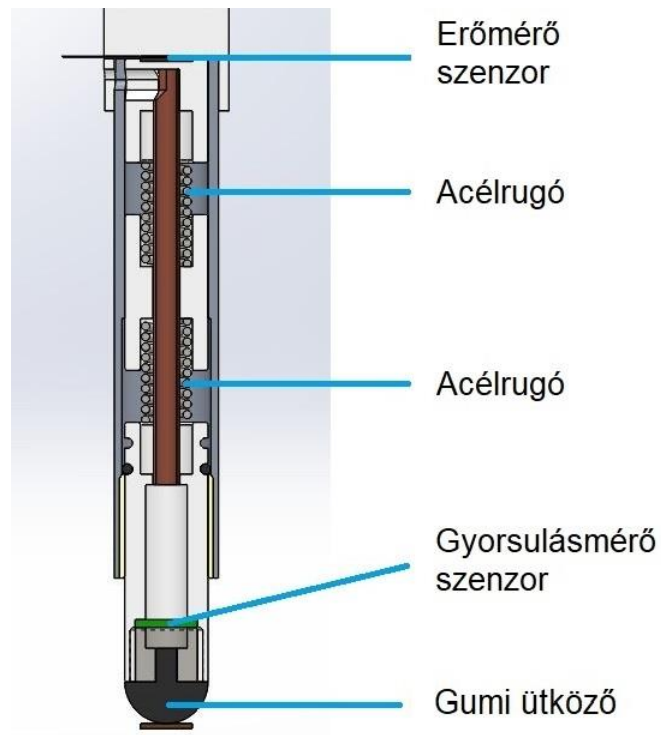
16. ábra - A differenciális meghajtó rendszer prototípusa.

3.5 A láb rugó-csillapító rendszere

A járó robotok talpának, illetve általában a talpban megvalósított rugózásnak különösen jelentős szerepe van, mivel a robotok ezen részükön keresztül lépnek kapcsolatba a környezettel. Amint azt a korábbi Szabad(ka)-II roboton elvégzett fizikai mérések is megmutatták, a talajérintkezés során keletkező erők közvetlenül befolyásolják a test imbolygását, a csuklók nyomatékait és az áramfogyasztást [74]. Az újonnan kifejlesztett láb prototípus hármass rugó-csillapító rendszerrel rendelkezik. Ennek az integrált érzékelőkkel ellátott lábnak a sematikus leírása a 17. ábrán látható. A rugók (beleértve a gumi ütközőt) célja:

- elnyelni azokat a nagyfrekvenciás rezgéseket, amelyek akkor keletkeznek, amikor a láb hozzáér a talajhoz,
- minimalizálni a járás során jelentkező alacsony frekvenciájú rezgéseket, és esetlegesen visszaadni az összegyűjtött energiát, és
- elnyelni az esés során jelentkező nagyobb erőket.

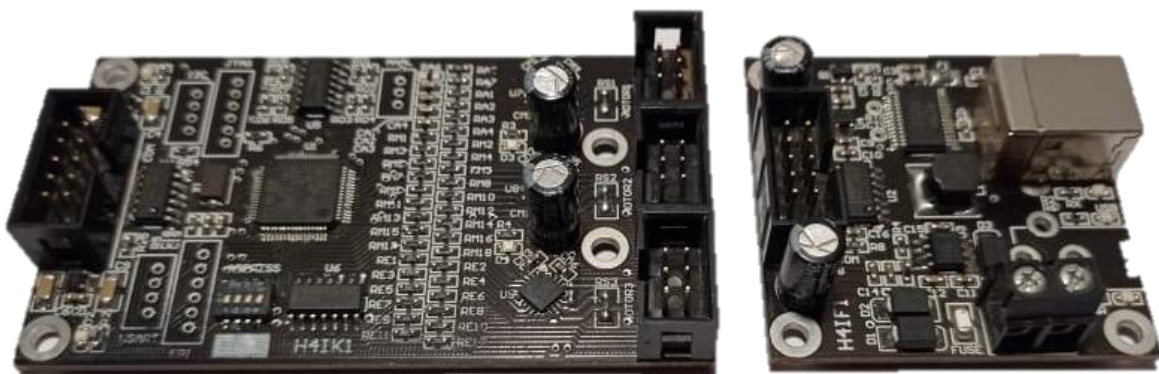
A rugóállandókat és a rugók csillapítási együtthatóit optimalizálási eljárással határozhatjuk meg. Egy gyorsulásmérő és egy erőmérő szenzor is a tibia szegmens része. A gyorsulásmérő feladata a láb lehetséges ütközésének érzékelése, az erőmérő funkciója pedig a láb által a talajra kifejtett erő mérése.



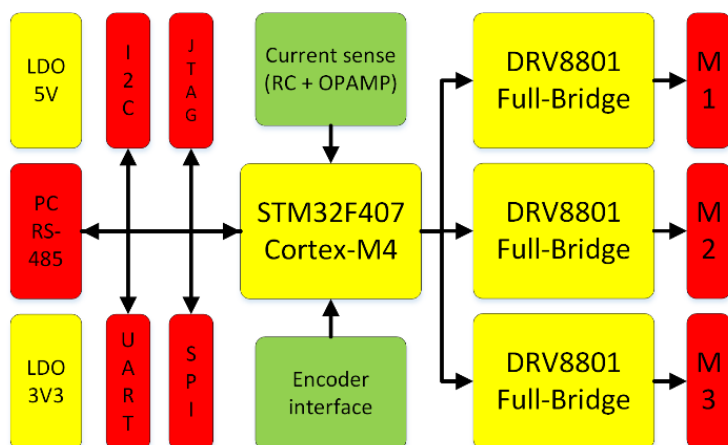
17. ábra - Az új lábszegmens (tibia) a hármás rugó-csillapító rendszerrel.

3.6 A motorok hajtása és szabályozása

A láb motorjainak hajtásához saját elektronikai egységet fejlesztettem ki. Ennek a nyomtatott áramköri lapja a 18. ábra bal oldalán a sematikus rajza pedig a 19. ábrán látható:



18. ábra - (bal) Motormeghajtó lap, (jobb) PC interfész.



19. ábra - Motormeghajtó sematikus rajza.

A lap feladata, hogy meghajtsa és szabályozza a láb három csuklóját, feldolgozza az enkóderek jeleit, mérje a motorok áramait, és kommunikáljon a talpban, illetve a tibia szegmensben elhelyezett szenzorokkal. A lap paramétereit és a releváns elektronikai alkatrészeit a 7. táblázatban láthatók.

Alkatrész	Paraméter
Mikrovezérlő	STM32F401
Motormeghajtó	DRV8801
Motor típusa	3 keféscs DC
Enkóder csatornái	A és B
Áram érzékelés	Sönt + OPAMP + ADC
Talp interfész	SPI, USART, I2C, analóg
PC interfész	RS485, full duplex

7. táblázat - A motormeghajtó lap paramétereit.

A lap központi egysége egy 84 MHz-es, Cortex-M4 alapú lebegőpontos egységgel ellátott STM32F401-es mikrovezérlő, melynek számítási kapacitása bőven megfelel a célul kitűzött feladatok elvégzéséhez. A központi számítógéppel, melytől a csuklók szögpozícióit kapja és melynek a szenzorok adatait továbbítja, full duplex RS485-ös interfészen keresztül kommunikál akár 3 Mbaud sebességgel. Szabad(ka)-II esetén egy sokkal gyengébb MSP430-as mikrovezérlő volt használva, mellyel csak korlátozott frekvenciával lehetett a motoráramokat mintavételezni. Az STM32F401-es mikrovezérlővel elvileg gond nélkül elérhető a célul kitűzött 1kHz-es mintavételezési és szabályozási frekvencia. A motorok

szabályozásáról egy, a mikrovezérlőben implementált PID szabályozó felel. A Szabad(ka)-II robot szimulációs modelljében implementált PI és Fuzzy-PI szabályozók optimalizálásával részletesen foglalkozik a [49] cikk.

3.7 Eredmények

A hexapod robotok szerkezeti megvalósításaival foglalkozó releváns irodalom áttekintését követően elemzést végeztem a lábszerkezetek szabadságfokainak számáról és kinematikai kialakításairól. Meghatároztam az ideális szerkezeti kialakítást, az aktuátorok számát és elhelyezkedését a robottal szemben támasztott elvárások függvényében. A láb modulban található aktuátorok három szabadságfok mozgatásáért kell, hogy feleljenek, a negyedik szabadságfok mozgatása pedig a testben lesz megvalósítva.

Az elméleti alapok lefektetése után létrehoztam egy működő láb prototípust, amit a Szabad(ka) robotok következő generációjánál, a Szabad(ka)-III robot megépítésénél fogok alkalmazni. A realizált prototípus jelentős javulást mutat az előző modellnél alkalmazott megoldáshoz képest.

A femur és coxa lábszegmensek mozgatását differenciális hajtás alkalmazásával valósítottam meg. Ennek következtében lendítés és emelés során a két motor együtt dolgozik a kívánt mozgás megvalósításáért, és függőleges lábmozgások esetén a nyomatékaik összeadódnak. Ez a megoldás alacsonyabb súlyt és energiafelhasználást eredményez, növeli a robot stabilitását (mivel a két motor közelebb került a testhez), valamint egyszerűbb kinematikai felépítést és mechanikai megvalósítást eredményez.

Ezen felül a mechanikai újítások, a 3D nyomtatás és az hármass rugó-csillapító rendszer kifejlesztése tovább javították a robotláb funkcionalitását. Az új rugó-csillapító rendszer három feladata elnyelni az ütközéskor keletkező nagyfrekvenciás rezgéseket, minimalizálni a járás során jelentkező alacsony frekvenciájú rezgéseket (esetlegesen visszaadni az összegyűjtött energiát) és elnyelni az esés során jelentkező nagyobb erőhatásokat.

Az új motor meghajtó elektronika biztosítja a szabályozás és a szenzorok elvárt frekvenciákon történő mintavételezését.

3.8 3. tézis

Az irodalomban fellelt megoldások elemzése és továbbfejlesztése, valamint a korábban elvégzett robotikai kutatás és fejlesztés során szerzett tapasztalat alapján meghatároztam egy újszerű robotláb megfelelő kinematikai és mechanikai kialakítását. A láb mozgásához kifejlesztettem egy differenciális meghajtót, ami csökkenti a tömeget és energiafelhasználást, növeli a stabilitást, valamint egyszerűbb kinematikai felépítést és mechanikai megvalósítást eredményez. A talajérintkezés megvalósítására egy hármas rugó-csillapító rendszert implementáltam a láb alsó szegmensébe.

Az eredményeket felhasználva megterveztem és megépítettem a Szabad(ka)-III robot működő láb prototípusát. Az új prototípus jelentős továbbfejlesztést jelent az előző robotlábhoz képest.

Tézisekhez kapcsolódó saját publikációk: [77], [78].

4 Szabad(ka)-III robot szerkezeti optimalizálásának kutatása

A jelen fejezetben a Szabad(ka)-III robot szerkezeti optimalizálásának kutatását fejtem ki, aminek célja egy optimalizált, vagyis jobb, előnyösebb test- és lábszerkezettel rendelkező hatlábú járó robot létrehozása. Először Szabad(ka)-III tervezett mechanikai felépítését és az optimalizálások elvégzéséhez szükséges szimulációs környezetet (paraméterezhető dinamikai modell) mutatom be. A szimuláció használatának előnye, hogy a szerkezeti optimalizálás elvégezhető a gyártás előtt, illetve, hogy a járásalgoritmusok tesztjei is párhuzamosítva és gyorsan futtathatók a valós robot használata nélkül. Ezután az optimalizálás céljait, az optimalizálandó paramétereiket, valamint az optimalizálási tesztkörnyezeteket definiálom. Az optimalizálási folyamat felgyorsításának érdekében kifejlesztettem egy újszerű optimalizálási eljárást, mely effektíven kezeli a nagy paraméterhalmazzal jellemzett optimalizációs feladatokat. Ennek a megoldásnak köszönhetően kevesebb iteráció mellett is megfelelő eredményt lehet kapni. A PSO (Particle Swarm Optimization) segítségével megvalósított optimalizálás céljai az energiafogyasztás, a test nem kívánt mozgásának és a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálására vonatkoznak. Az optimalizáció után jelentősen megnőtt a robot hatótávolsága és lecsökkent a szenzorok méréseit negatívan befolyásoló rázkódás, a motorok terhelése pedig a megfelelő határértékek közé került. A modell moduláris felépítésének köszönve az optimalizáció könnyen elvégezhető és applikálható más célok figyelembevételével is. A jövőben, az itt bemutatott eljárással elért legjobb megoldás lesz felhasználva a valós Szabad(ka)-III robot mechanikai megvalósításához.

4.1 Szerkezeti optimalizációs eljárások áttekintése hasonló járó robotok esetén

A korábbi [1] cikkünkben részletesen taglaltuk a korszerű mászó és járó robotokat, ezen belül főleg a hatlábú robotok mechanikai megvalósításai és optimalizációs eljárásai vannak összehasonlítva. A [4] publikációban a járó robotok szerkezeti és járás optimalizálására alkalmazott különböző módszerek szakirodalma van összefoglalva. Az itt bemutatott optimalizációs megoldások vagy a tervezés és építés folyamán, vagy a meglévő robotok alkalmazásával vannak elvégezve. Az optimalizáció tárgya leggyakrabban az energiahatékonyság, a stabilitás, vagy a sebesség.

A kerekes robotokhoz képest a járó robotok sokkal komplexebb akadályokat is leküzdhetnek, azonban a mozgásukhoz sokkal több elektromos energia szükséges. Éppen ezért az utóbbi évek folyamán több cikk is foglalkozott a járó robotok energiafogyasztásának kérdéseivel.

A [79] tanulmányban egy újszerű módszert mutatnak be, amellyel egy hexapod robot a lábait használja arra, hogy tárgyakkal manipuláljon. A cikkben elemzik a manipulációs korlátokat, a munkateret és a kinematikai modelleket, valamint javasolnak egy optimalizálási algoritmust az energiafogyasztás csökkentésére a stabilitás korlátainak megtartása mellett.

A [80] és [38] cikkekben különböző járóalgoritmusok és központi mintagenerátor (Central Pattern Generator - CPG) modellek energiafogyasztását elemzik. Az energiafogyasztást kísérleti úton is analizálták a megépített hexapod robot csuklóiban mért motoráramok alapján.

Több kutatás is foglalkozik a járó robotok energiafogyasztásának minimalizálásával és a lábokban jelentkező erők optimális elosztásával. A [81] cikkben a szerzők egy dinamikus modellt dolgoztak ki egy hexapod robot „rák jellegű” járásával kapcsolatban. Az optimális láberőket és csuklónyomatékokat, a csuklónyomatékok négyzetének összegének minimalizálása alapján, kvadratikusan programozás (quadratic programming - QP) módszerrel határozták meg. Az optimális láberőkhöz szükséges energia minimalizálása érdekében egy energiafogyasztási modellt is kidolgoztak. A [82] cikkben egy kvadratikusan programozáson alapuló erő elosztó vezérlőt fejlesztettek ki, hogy minimalizálják a hexapod robot energiafogyasztását. Ez a vezérlő csökkenti az energiafogyasztást azáltal, hogy optimalizálja a pillanatnyi teljesítményt minden egyes lépésben. A javasolt módszert egy valós hexapod roboton is tesztelték.

A [83] tanulmányban egy tengelyszimmetrikus hexapod robotot terveztek azzal a céllal, hogy a korlátozott robotméretekkel a lehető legnagyobb munkaterületet ériék el. A kívánt

kinematikai és szerkezeti paraméterek meghatározásához optimalizáló algoritmust alkalmaztak. Az eredmények igazolása érdekében az optimalizált paraméterek alapján egy prototípus robot készült.

A [84] cikkben egy négy lábú robot energiahatékonyságát vizsgálták és optimalizálták emelkedőn történő járás közben. Az optimalizálás a testtartást és a járás paramétereit érintette. Az energiahatékonyságot a szállítási költség (specific resistance, cost of transportation) határozta meg, amit a mozgáshoz szükséges energia és a megtett távolság alapján számítottak ki.

A [85] publikációban egy négy lábú robot kinematikai paramétereinek optimalizálását végezték el genetikai algoritmusok használatával. A folyamat során a test és a lábszegmensek méreteit határozták meg ugrás és ügetés esetén, felhasználva a robot teljes dinamikus modelljét. A fitness függvényt vertikális ugrás esetén az ugrás magassága, ügető járás esetén pedig az adott idő alatt megtett távolság határozta meg. Mindkét esetben, a fitness függvény büntetve lett, ha a robot nem landolt megfelelően, vagy elvesztette az egyensúlyát mozgás közben.

A folytatásban három elismerésre méltó hexapod robot (SpaceClimber, LAURON V és HITCR-II) kerül részletesebb bemutatásra szerkezeti optimalizáció tekintetében. Ezek a robotok mechanikailag komoly kialakítással rendelkeznek, szerkezeti felépítésük pedig beható optimalizálás eredményeként jött létre.

A SpaceClimber szerkezeti optimalizációja a [86] cikkben van részletesen bemutatva. A szimuláció (beleértve a fizikai számításokat) és a vizualizáció egy saját fejlesztésű szoftver a MARS Simulator segítségével lett megvalósítva. Az optimalizáció elvégzéséhez a kovariancia mátrix adaptáció - evolúciós stratégia (Covariance Matrix Adaptation - Evolution Strategy - CMAES) algoritmust használták fel. A robot láb elrendezése aszimmetrikusra van tervezve, a középső lábpár közelebb van a hátsó lábpárhoz. A robot morfológia 17 paraméterrel a járásminta pedig 13 paraméterrel lett meghatározva. A morfológia paraméterek a lábpárok elhelyezését a testen, a test tömegközéppontjának helyét, valamint a három lábpár első és második szegmensének hosszát határozták meg. A járásminta paraméterek a test magasságát, a lépés magasságát, idejét és hosszát, valamint a három lábpárra egyenként, a talp pályájának hosszanti és oldalirányú eltolását és a lábak támadási szögét határozták meg. A tesztkörnyezetek alapján a robot vízszintes talajon, valamint 30 fokos emelkedőn és 30 fokos lejtőn haladt. A fitness függvény négy tagot tartalmazott. Az első két tag az energiahatékonyságot és a csuklókon jelentkező nyomatékokat vette figyelembe, a harmadik tag egy erős negatív jutalmat generált, ha a robotnak a talpon kívül más része is érintkezett a

talajjal, a negyedik tag pedig azon idő arányon alapult, amelyben a tömegközéppont a stabilitási határon kívülre esett.

LAURON V egy hatlábú járó robot melynek tervezésénél egyszerre alkalmaztak technikai analízist, optimalizációs metódusokat és követték a biológiai alapok szerkezeti kialakítását. Az előző LAURON lábszerkezetéhez hozzáadtak egy további rotációs csuklót, tehát LAURON V lábai fejenként 4 szabadságfokkal rendelkeznek. A [76] publikációban három optimalizálás módszer kombinációja van bemutatva, melyet a lábkonfiguráció optimalizálására fejlesztettek ki. A kapott láb rögzítési szögeket összehasonlították a pálca rovarok biológiai lábkonfigurációjával is. Az új szerkezeti kialakításnak köszönve, LAURON V 25 foknál nagyobb mereedségű emelkedőkön is tud járni. Az új robot tömegközéppontja hátrább lett helyezve, aminek hála képes a 4 hátsó lábán állni miközben az első két lábát manipulációs feladatokra használja [31].

HITCR-II egy hexapod robot, melyet strukturálatlan terepen való járásra terveztek. Az erőmérő és a póz szenzoroktól származó információ felhasználásával egy erő eloszlási és kompenzációs stratégián alapuló testtartás vezérlő stratégiát javasoltak a járás javításának érdekében. A robot három szabadságfokú lába egységes moduláris szerkezetként van kialakítva a könnyű cserélhetőség érdekében. A tibiába integrált rugót egy negyedik, passzív szabadságfoknak tekintik. A szerkezet paramétereinek optimalizálásához az „ügyesség” javítására egy célfüggvény lett létrehozva. A dexterity ratio optimalizálásának célja, hogy megkapják a robot átfogó mozgásképeségét, melyet a térbeli transláció és a rotáció alkot. Az optimalizáció a coxa orientációját, valamint a tibia, femur és coxa lábszegmensek hosszát határozta meg [87]. Az ügyesség és az ügyes manipuláció (Dexterity and Dexterous Manipulation) részletesen ki van fejtve a [88] cikkben. Később, HITCR-II ki lett bővítve egy új szabályozási módszerrel annak érdekében, hogy megoldják a testtartás szabályozás megvalósítását durva terepen is. A robot képes megkülönböztetni az enyhén és az erősen egyenetlen terepeket. Enyhén egyenetlen terep esetén testtartás-megtartó stratégiát alkalmaznak, míg erősen egyenetlen terepen történő működés esetén testtartás-beállító stratégiát használnak [89].

Az áttekintett irodalom alapján megállapítható, hogy több tanulmány foglalkozik járó robotok szerkezetének és járásának optimalizálásával. A publikációk részletesebb elemzése azonban azt mutatja, hogy az optimalizálás során általában kevesebb célt határoznak meg, az alkalmazott modellek pedig kevésbé kidolgozottak. Az általam végzett kutatás célja, hogy mind az optimalizálási célokat, mind pedig a paramétereket sokkal mélyrehatóbban elemezzem egy sokkal részletesebben kialakított dinamikus modell segítségével.

4.2 Szabad(ka)-III mechanikai és elektronikai felépítése

4.2.1 Mechanikai rendszer

A Szabad(ka)-III robotot moduláris felépítésűre terveztem. Ennek lényege, hogy a lábak és a test egymástól függetlenül változtathatók, illetve bővíthetők. A láb modulban található motorok három szabadságfok mozgásáért felelnek. A később implementálandó, negyedik szabadságfok mozgása a test modulban lenne megvalósítva.

Ha a negyedik szabadságfok bevezetésének csak az lenne a célja, hogy a láb ferde talajon is függőlegesen álljon, akkor a hat láb elforgatása megoldható lenne egy darab, közös, a testbe épített aktuátorral. A negyedik szabadságfokot azonban arra is fel lehet használni, hogy a robot elülső (esetleg hátsó) lábpárja megfogóként működjön. Ennek érdekében a negyedik szabadságfok mozgását lábpáronként kell megvalósítani. Az elképzelés helytállósága későbbi szimulációkkal lesz alátámasztva.

Szabad(ka)-II-höz képest Szabad(ka)-III új csukló- és lábszerkezete sokkal fejlettebb és kifinomultabb. A robotláb a robot legösszetettebb mechanikai szerkezeti eleme. A láb szerves részét képezi a 3.4-es fejezetben bemutatott differenciális meghajtó rendszer (16. ábra). Ezzel a megoldással alacsonyabb súlyt és energiaszükségletet lehet elérni. A láb egy másik komplex eleme a 3.5-ös fejezetben bemutatott hármas rugós lengéscsillapító rendszer (17. ábra). Ennek feladata elnyelni az ütközéskor keletkező nagyfrekvenciás rezgéseket, minimalizálni a járás során jelentkező alacsony frekvenciájú rezgéseket és csökkenteni az esés során jelentkező nagyobb erőhatásokat. A robot lábának felépítése a harmadik fejezetben és a [78] cikkben van részletesen bemutatva.

A robot testének feladata, hogy tárolja az elektronikai elemeket és az akkumulátort, valamint, hogy egy megfelelő felületet biztosítson a később implementálandó szenzorok (IMU, LIDAR, RGB/RGBD kamera) rögzítéséhez. A test méreteire vonatkozóan, annak hossza, valamint az elülső és a hátsó lábak közötti távolság volt előre meghatározva. A robottal szemben támasztott további elvárás, hogy képes legyen 2 kg hasznos teher szállítására.

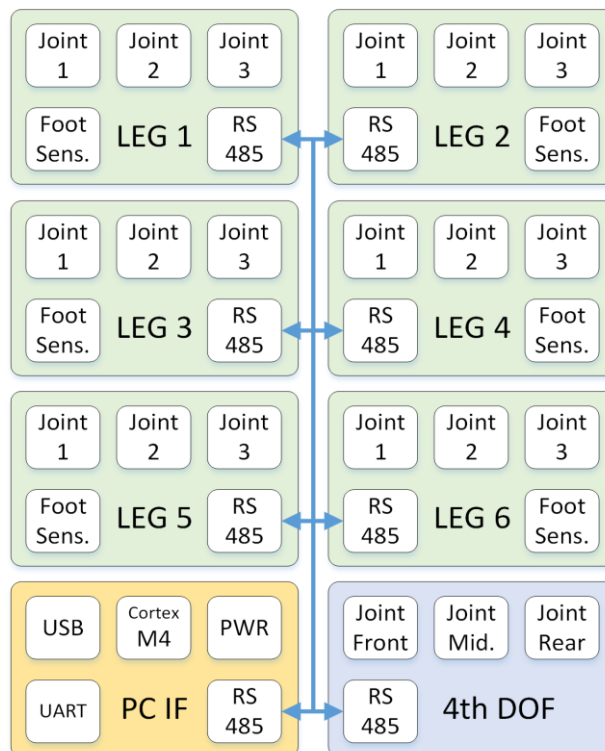
Szabad(ka)-III mechanikai jellegzetességei és jellemzői (elődjéhez viszonyítva) az 5. és a 8. táblázatban vannak felsorolva.

Jellemző:	Szabad(ka)-II	Szabad(ka)-III
Robot hossza:	440 mm	400 mm
Lábpárok közötti távolság:	320 mm	320 mm
Szabadságfokok száma:	3 DOF	4 DOF
Gyártástechnológia (test):	2.5D CNC marás	3D nyomtatott PLA
Motor típusa:	Több fajta	Faulhaber 2232U 012SR 10 mNm
Reduktor típusa:	Több fajta	Faulhaber 26 A, 1-1,5 Nm
Joint1, 2 folyamatos és időszakos nyomatéka:	Több fajta	1,5 Nm, 2,25 Nm
Joint3 folyamatos és időszakos nyomatéka:	Több fajta	1,0 Nm, 1,5 Nm

8. táblázat - Szabad(ka)-III mechanikai jellemzői.

4.2.2 Elektronikai rendszer

Szabad(ka)-III elektronikai rendszere a 20. ábrán van bemutatva.



20. ábra - Szabad(ka)-III elektronikai rendszere.

A lábokban található motorok meghajtását és szabályozását, valamint a szenzorok jeleinek feldolgozását hat darab (lábanként egy) saját tervezésű meghajtó lap végzi (18. ábra - bal). A lapok központi eleme egy STM32F401 „Dynamic Efficiency” mikrovezérlő. A Dynamic Efficiency eszközök a dinamikus energiafogyasztás és a feldolgozási teljesítmény legjobb egyensúlyát kínálják [90]. A meghajtásért laponként három darab DRV8801 H-híd motormeghajtó (áram visszajelzéssel) végzi. A lábban található érzékelőket a motormeghajtóval SPI, USART, I2C és analóg interfészekon lehet összekötni. A tibiába integrált erőmérő szenzor feladata a talajérintkezés érzékelése, a gyorsulásmérő pedig az ütközés érzékelését végzi. A mikrovezérlőben futó, PID és Fuzzy szabályozók tervezése részletesen be van mutatva a [91] cikkben. A motormeghajtó lapokat és a mozgásalgoritmusért, valamint az inverz kinematikáért felelős központi számítógépet egy interfész lap köti össze (18. ábra - jobb). Ez a lap a motormeghajtókkal egy RS485-ös interfészen, a központi számítógéppel pedig USB, illetve USART interfészen keresztül kommunikál.

Az akkumulátor kiválasztása a következő szempontokat alapján történt: a lehető legnagyobb energiasűrűség, 0,5 kg körüli tömeg, 12 voltnál nagyobb feszültség (a 12 voltos motorok meghajtásának érdekében). Ezek alapján a választás 14,8 voltos, 5000 mAh kapacitású, 4S1P konfigurációjú, 550 gramm tömegű LiPo akkumulátorra esett. Egy ilyen akkumulátor névleges értékekkel számolva 266,4 kJ energiát képes tárolni.

4.3 Szabad(ka)-III robot modell

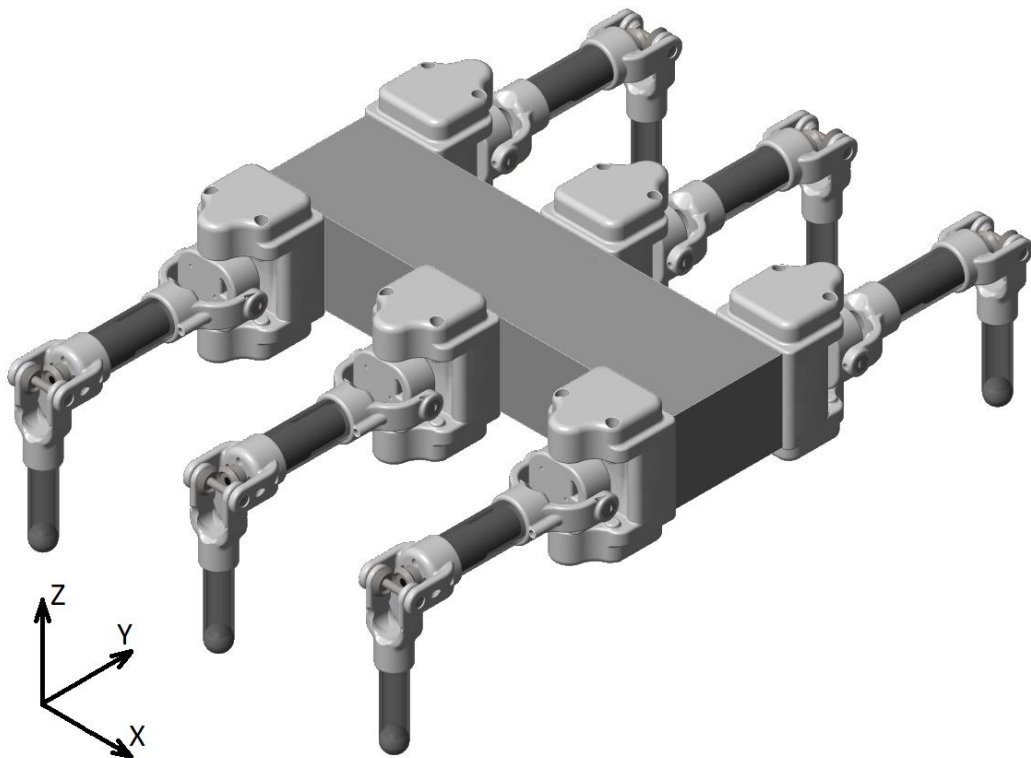
A Szabad(ka)-II robot szimulációs modelljének megépítése és működése részletesen le van írva az [53] cikkben, illetve az első fejezetben. Szabad(ka)-III szimulációs modellje a korábban leírt módszereket és megoldásokat alkalmazva lett megépítve, ezért a modellezési folyamat itt nincs részletesen kifejtve.

A modell mechanikai elemeit két csoportba lehet sorolni:

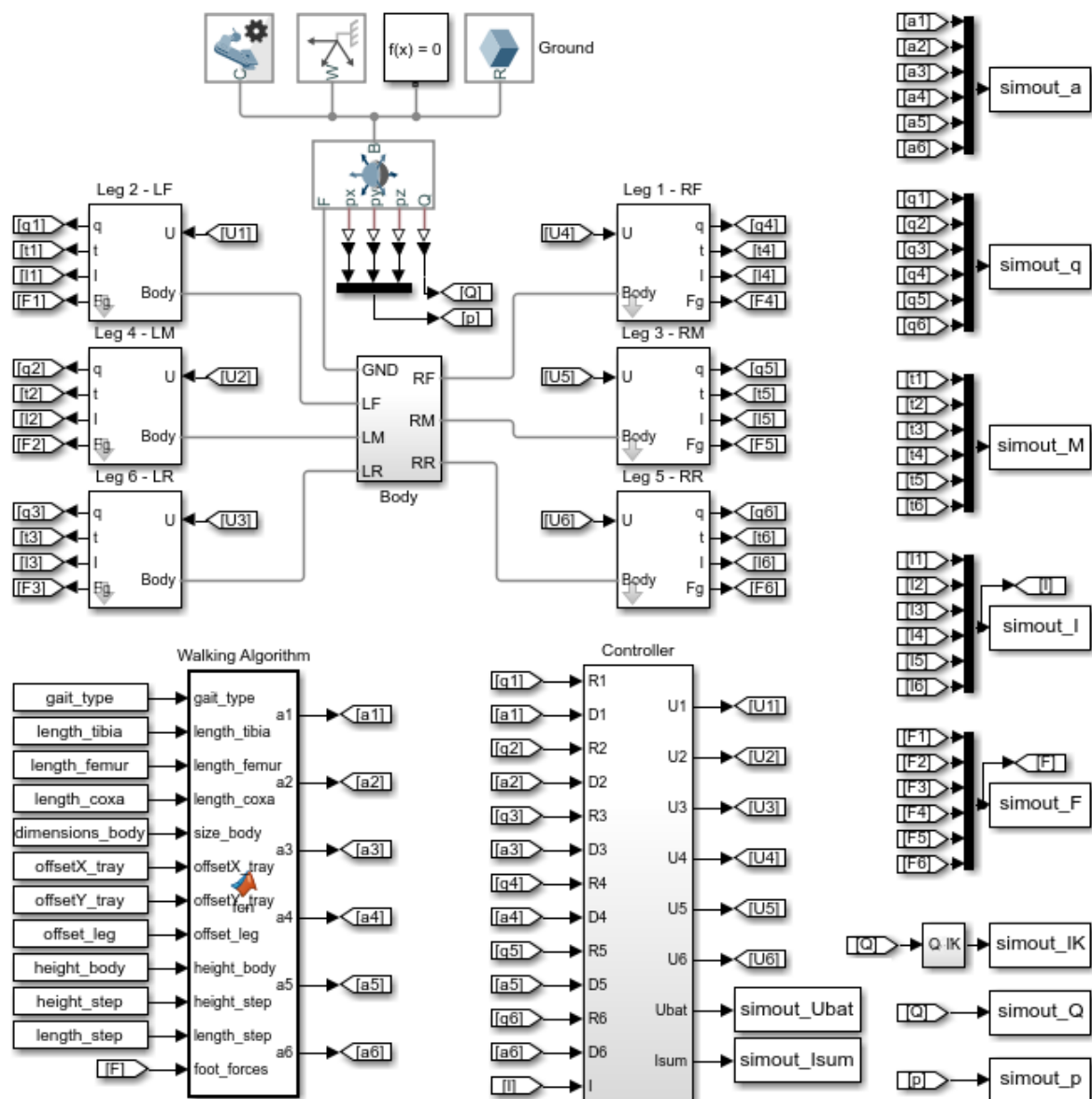
- az előre megtervezett elemek (a testet és a femurt összekötő kéttengelyes differenciális csukló, valamint a femur és a tibia közötti csukló), illetve
- a változtatható paraméterű elemek (a tibia és femur szegmensek, illetve maga a test).

Az első csoportba eső elemeket, összetettségük miatt egy külső CAD programban (SolidWorks) kellett előre megtervezni, majd a Simscape Multibody Link segítségével a modellbe importálni. A második csoport elemei, egyszerűségük miatt egyből a Multibody modellben lettek kialakítva, ennek következtében lehet a paramétereiket könnyen változtatni.

A Multibody által létrehozott animáció egy képe a 21. ábrán látható. A robot Multibody modellje pedig a 22. ábrán átható.



21. ábra - A robot mechanikai elemei. Az előre megtervezett elemek világos szürke színűek, a változtatható paraméterű elemek pedig sötét szürkék.



22. ábra - Szabad(ka)-III robot Multibody modellje.

A rendszer mechanikai leírása mellett, a modell tartalmazza a motorok és a reduktorok részletes mechatronikai definícióját is. Ezen felül, szoftveres oldalon a modell részét képezik a mozgásalgorithmus, illetve a motorszabályozó alrendszerek is.

A mozgásalgorithmus alrendszer (Walking Algorithm) egy MATLAB kódot futtat le 100 Hz-es frekvenciával, melynek feladata a talpak pozícióinak meghatározása és az inverz kinematikai számítások elvégzése. A rendszer három járásalgorithmust tud szimulálni (wave, ripple és tripod), valamint beállítható benne a lépés hossza, magassága és a talpak pályájának eltolása. A kimenetet a motorok szögpozíciói képezik.

A motorszabályozó alrendszer (Controller) egy PID szabályozót és az akkumulátor modelljét

tartalmazza. A PID szabályozó rész a motorok feszültségeit számítja az elvárt és a valós csuklópozíciók alapján. Az akkumulátor modell rész a tápfeszültséget határozza meg a motorok által felvett áram és az akkumulátor belső ellenállása függvényében.

A modell legtöbb releváns paramétere változtatható. Ezek teljes listája a 9. táblázatban látható.

Szerkezeti paraméterek	Kiindulási értékek	Az optimalizálás során beállított határok
Test hossza (külső lábpárok közti X táv.)	320 mm	rögzített
Külső lábpár lábai közti Y távolság	100 mm	+/- 40 mm
Belső lábpár lábai közti Y távolság	100 mm	+/- 40 mm
Belső coxa X pozíciója (eltolása)	0 mm (középen)	+/- 40 mm
Belső coxa Z pozíciója (eltolása)	0 mm (középen)	+/- 20 mm
Külső femur hossza:	160 mm	140 - 180 mm
Belső femur hossza	160 mm	140 - 180 mm
Külső tibia hossza:	120 mm	120 - 160 mm
Belső tibia hossza:	120 mm	120 - 160 mm
Test tömegével kapcsolatos paraméterek		
Test elektronikájának tömege	2 kg	rögzített
Test elektronikájának méretei	100x50x50 mm	rögzített
Elektronika súlypont X pozíciója (eltolása)	0 mm (középen)	+/- 50 mm
Elektronika súlypont Z pozíciója (eltolása)	0 mm (középen)	+/- 50 mm
Rugózási paraméterek		
Talp rugózása	10,000 N/m	10,000-100,000 N/m
Talp csillapítása	100 Ns/m	50-500 Ns/m
Járásalgorithmus paraméterek		
Járásalgorithmus	ripple	rögzített
Test magassága (Z)	120 mm	+/- 20 mm
Lábpálya magassága (Z)	50 mm	10-100 mm
Lábpálya hossza (X)	40 mm	30-50 mm

Külső láb pályájának eltolása X irányban	0 mm	+/- 40 mm
Belső láb pályájának eltolása X irányban	0 mm	+/- 40 mm
Külső láb pályájának eltolása Y irányban	160 mm	+/- 40 mm
Belső láb pályájának eltolása Y irányban	160 mm	+/- 40 mm
Súrlódási paraméterek		
Talp súrlódása X és Y irányban	1	rögzített
Stribeck-súrlódás	0,0 Nm	rögzített
Coulomb-súrlódás	0,5 Nm	rögzített
Viszkózus súrlódás	0,25 Nm/(rad/s)	rögzített
Akkumulátor paraméterek		
Akkumulátor feszültsége	12 V	rögzített
Akkumulátor belső ellenállása	0,2 Ohm	rögzített

9. táblázat - A modell változtatható és rögzített paraméterei.

Az optimalizálás által változtatható paraméterek kiindulási értékeit az előző robot méretei alapján határoztam meg, az optimalizálás által megengedett határokat pedig úgy állapítottam meg, hogy a robot járásalgorithmusa és inverz kinematikája minden előrelátott lábmozgást meg tudjon valósítani.

Egyes paraméterek értéke rögzített, vagyis nem változtatható az optimalizálás által. A robot testének hossza (a két szélső coxa-coxa csatlakozási pontok közötti távolság) előre megadott feltétel volt. A test elektronikájának (hozzávetőleges) méreteit és tömegét, valamint az akkumulátor paramétereit szintén előre meg kellett határozni. A talp és a talaj közötti kapcsolat csúszásmentes, ezért a talp súrlódási paramétere is állandó. A csuklóban jelentkező súrlódás meghatározása a korábban elvégzett validálás során történt meg [53]. Szabad(ka)-II robot validálása során foglalkoztam a fogaskerék holtjáték és a reduktor önzárás jelenségek kivizsgálásával is. Szabad(ka)-III robot modellezése esetén azonban nem vettem figyelembe ezeket a jelenségeket, mivel a továbbfejlesztett mechanika (újratervezett csapágyazás és fogaskerekes átvitel a csuklóban) megszünteti a holtjátékot, a folyamatos mozgás (eltérő járásalgorithmus) pedig nem engedi meg a reduktorok önzárását.

A szimulációk által generált kimeneti változók listája, (melyek egy része képezi a később tárgyalt objektív függvények változóit) a 10. táblázatban látható.

Kimeneti változó:	Kapcsolódó objektív függvény:	Multibody elnevezés:
$U_{bat}, I_{sum}, \Delta x$	Energiafogyasztás (lásd: (4.1) egyenlet)	simout_Ubat, simout_Isum, simout_p
IK	Mozgékonyosság (lásd: (4.4) egyenlet)	simout_IK
e_x, e_y, e_z	Transzlációs mozgás (lásd: (4.5) egyenlet)	simout_p
$e_\alpha, e_\beta, e_\gamma$	Rotációs mozgás (lásd: (4.6) egyenlet)	simout_Q
M_1, \dots, M_{18}	Nyomaték különbség (lásd: (4.9) egyenlet)	simout_M
Elvárt csuklópozíciók	-	simout_a
Valós csuklópozíciók	-	simout_q
Motoráramok	-	simout_I
Talpban jelentkező erők	-	simout_F

10. táblázat - A szimuláció által generált kimeneti változók.

Szabad(ka)-II robot korábban elvégzett validálása során a mechanikai szerkezet extrém igénybevételnek volt kitéve, minek következtében a megfigyelt áramgörbéken nagyfrekvenciás tranziensek is jelentkeztek. Emiatt, a validáláskor a kimeneti változók kinyerése magasabb mintavételezéssel (500 Hz) történt [53]. Ezzel szemben, a Szabad(ka)-III robot szerkezeti optimalizációhoz tartozó szimulációk során nem jelentkeztek nagyfrekvenciás események. A kiindulási jelgörbék elemzése, illetve a korábban végzett vizsgálatok alapján [1] a szimuláció kimeneti változóinak mintavételezése 100 Hz-es frekvenciával történt.

4.4 Az optimalizálási probléma megfogalmazása

Az optimalizálás elvégzéséhez egyrészt szükséges egy megfelelően működő, lehetőleg validált modell, másrészt pedig meg kell határozni, az optimalizálási célokat, az optimalizálandó paramétereket, valamint az optimalizálási tesztkörnyezetet.

A Szabad(ka)-III robot modellje, elődjének, a Szabad(ka)-II robotnak a validált modelljén alapul [53]. A 2. fejezetben és az [53] publikációban bemutatott eredmények lehetővé tették a

validált modellrészek (azaz motorok, reduktorok és átvitelek) beépítését a Szabad(ka)-III robotmodellbe. Ennek eredményeként, a kialakított Szabad(ka)-III szimulációs környezet alkalmasabb, mint egy hagyományos, mozgásegyenlet alapú elméleti modell, mivel a szimuláció és a valóság közötti kritikus különbségek limitáltak. A Szabad(ka)-III robot modell-alapú optimalizálása egy valóság-hű keretrendszert alkot, amely lehetővé teszi egy valós hatlábú mechatronikai szerkezet tervezését, gyártását és összeszerelését.

A következő alfejezetek bemutatják az optimalizálás céljait, paramétereinek és tesztkörnyezetének meghatározását, valamint a paraméterek számának racionalizálását.

4.4.1 Optimalizálási célok (fitness függvény)

A Szabad(ka)-III robot modellen végzett optimalizálás feladata az adott céloknak leginkább megfelelő elektromechanikai elemek és mechanikai szerkezet meghatározása. Mivel a robottal szemben támasztott követelmények alapján több elvárásnak is eleget kell tenni, ezért egy többcélú optimalizációs probléma jelentkezik, azaz az optimalizálás folyamán egy több kritériumos döntést kell meghozni. Az irodalomban az ilyen problémák, mint Multi Criteria Decision Making (MCDM) módszerek vannak kutatva [92].

A több kritériumos optimalizálási probléma megoldására két megközelítés közül választhattam:

- a. Többcélú keresés alkalmazása – Ennél a megoldásnál többcélú (multi-objective) kereső algoritmusokkal lehet a sok-dimenziós Pareto halmazt feltérképezni, majd a keresés után ezekből a potenciális megoldásokból lehet egy konkrét megoldást kiválasztani. Erre alkalmazhatók a már kifejlesztett MCDM módszerek, mint például, a Weighted aggregation [93], TOPSIS [94], ELECTRE [95].
- b. Egycélú keresés alkalmazása – Felhasználhatunk egy MCDM módszeren alapuló összevonó (aggregáló) fitness függvényt, amely még a keresés előtt vonja össze a célokat egy egydimenziós folytonos értéké. Így az optimalizációs kereső algoritmus, mint egycélú optimalizáció (single-objective) fut.

A kutatás folyamán a második, egyszerűbb megoldást választottam, mivel így a kereső algoritmus kevesebb számítással tudott megfelelő eredményre jutni. A fitness függvény (más néven hasznossági függvény - utility function, költségfüggvény - cost function vagy veszteségfüggvény - loss function) feladata a különböző célok megfelelő összevonása. Jelen esetben az összevonás súlyozott átlaggal történik, vagyis a fitness függvény a megfelelő súlyok alkalmazásával összeadja a célokat, illetve az objektív függvényeket annak érdekében, hogy az

optimalizáció egy skaláris fitness értékelés alapján megtalálja a lehetséges globális minimumot. Példa a súlyozott átlag alkalmazására robot szerkezeti optimalizálás esetén a [96] és [46] cikkekben látható. Kereső algoritmusként a PSO megfelelő volt erre az egydimenziós keresési célra. Ezt a megoldást a Szabad(ka) robotokat kutató szakértői csapatban határoztuk, és hagytuk jóvá.

Az optimalizálási célok és a hozzájuk tartozó objektív függvények meghatározása egy összetett robotszerkezet esetében nem egyértelmű feladat, mivel az optimalizálásnak sok nehezen definiálható célja és sok egymással összefüggő paramétere lehet. Az objektívek részletesebben kifejtve a következő tételekre bonthatók, (részben korábbi kutatásokra hagyatkozva [1], [45]):

- energiafogyasztás minimalizálása,
- tömeg minimalizálása,
- sebesség és mozgékonyág maximalizálása,
- test nem kívánt mozgásának minimalizálása,
- szerkezetet érő káros behatások minimalizálása,
- csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálása.

Az **energiafogyasztás minimalizálása** általánosan fontos feltétel az adott akkumulátorhoz tartozó üzemidő, illetve a megtett táv növelésének érdekében. Az energiafogyasztás könnyen meghatározható a robot által az adott út megtételéhez szükséges energiamennyiség mérésével. Az energiafogyasztás objektív függvénye a következő képlettel írható le:

$$f_E = \frac{E}{\Delta x} = \frac{U_{bat} I_{sum} \Delta t}{\Delta x}, \quad (4.1)$$

ahol f_E az energiafogyasztás objektív függvénye, E az út megtételéhez elhasznált energia, Δx a robot által megtett út, U_{bat} az akkumulátor feszültsége, I_{sum} a motorok összárama, Δt pedig az út megtételéhez szükséges idő.

A járó robotok energiahatékonyságának összehasonlításához használt általános teljesítménymutató a szállítási költség (cost of transport - CoT, (4.2) egyenlet):

$$CoT = \frac{E}{mg\Delta x} = \frac{U_{bat} I_{sum} \Delta t}{mg\Delta x}, \quad (4.2)$$

ahol m a robot tömege, g pedig a gravitációs gyorsulás.

Mivel az optimalizálás során a robot tömege nem változik, ezért az mg szorzat konstans és az energiafogyasztás összehasonlításában nem játszik szerepet. Tehát az f_E objektív függvény megfelel az energiafogyasztás minimalizálásához.

A [97] cikkben a CoT-ot a Weaver hexapod robot különböző vezérlő algoritmusainak összehasonlítására használják, a [98] tanulmányban pedig a CoT-ot használják a MIT Cheetah négylábú robot, más robotok és biológiai futók összehasonlítására.

A **tömeg minimalizálásának** célja szintén az üzemidő, illetve a megtett táv növelése és ez is könnyen meghatározható. A szimuláció szempontjából a robotot állandó és változtatható tömegű elemek alkotják. A konstans tömegű elemeket a robot elektronikája (meghajtók, akkumulátor) és az előre megtervezett csuklók (csuklólház, motor-reduktor egységek) képezik. A változtatható tömegű elemeket pedig a tibia és femur szegmensek, illetve maga a test képezik. A tömeg objektív függvénye a következő képlettel írható le:

$$f_m = (m_{electronics} + m_{body}) + 6(m_{joints} + m_{tibia} + m_{femur}), \quad (4.3)$$

ahol f_m az energiafogyasztás objektív függvénye, $m_{electronics}$, m_{body} , m_{joints} , m_{tibia} , m_{femur} pedig a robot alkatrészeinek a tömege.

A robot **sebessége és a mozgékonyága** attól függ, hogy a talp pályája mekkora területet tud lefedni, vagyis, hogy a robot „milyen nagyot” tud lépni. Jellemzően - és a fennálló esetben is - a sebesség és a mozgékonyág nem egy maximalizálandó optimalizálási célpont, hanem egy előre meghatározott paraméter. Az optimalizálás során azt kell figyelembe venni, hogy a robot modell inverz kinematikája az adott paraméterekkel képes-e teljesíteni az elvárásokat. Ha az elvárt talp pozíciót nem lehet felvenni, az objektív függvénynek egy büntetés (penalty) értéket kell visszaadnia. A mozgékonyág (dexterity) objektív függvénye a következő képlettel írható le:

$$f_d = \begin{cases} \text{penalty}, & \text{ha } IK = \text{sikertelen} \\ 0, & \text{ha } IK = \text{siker} \end{cases} \quad (4.4)$$

ahol f_d a mozgékonyág objektív függvénye, $penalty$ a büntetés érték, IK pedig a modell kimeneti változója, ami megmondja, hogy sikeres volt-e a végrehajtott lépéssorozat.

A **test nem kívánt mozgása**, vagyis a test az elvárt haladási iránytól eltérő bármely translációs vagy rotációs mozgása, más szavakkal, a robot imbolygása, rázkódása egyértelműen zavarja az érzékelők (kamera, LIDAR, IMU) működését, valamint a parazita mozgások növelik az

energiafogyasztást is. Ebből kifolyólag ennek a jelenségnek a minimalizálása szintén alapvető feladat. Mivel a szenzor mérések szempontjából elsősorban a szélsőséges események megszüntetése a fontos, ezért a hiba számszerűsítéséhez a legnagyobb tengely mentén jelentkező nem kívánt mozgás RMS-e van figyelembe véve. A translációs mozgás ((4.5) egyenlet) és rotációs mozgás ((4.6) egyenlet) objektív függvényei a következő képletekkel írhatók le:

$$f_t = \max\{\max(e_x), \max(e_y), \max(e_z)\}, \quad (4.5)$$

$$f_r = \max\{\max(e_\alpha), \max(e_\beta), \max(e_\gamma)\}, \quad (4.6)$$

ahol $e_x = (e_{x1}, \dots, e_{xn})$, $e_{x,k}$ jelöli a translációs hibát x irányban, $e_y = (e_{y1}, \dots, e_{yn})$, $e_{y,k}$ jelöli a translációs hibát y irányban, $e_z = (e_{z1}, \dots, e_{zn})$, $e_{z,k}$ jelöli a translációs hibát z irányban, $e_\alpha = (e_{\alpha1}, \dots, e_{\alpha n})$, $e_{\alpha,k}$ jelöli a rotációs hibát x tengely mentén, $e_\beta = (e_{\beta1}, \dots, e_{\beta n})$, $e_{\beta,k}$ jelöli a rotációs hibát y tengely mentén, $e_\gamma = (e_{\gamma1}, \dots, e_{\gamma n})$, $e_{\gamma,k}$ jelöli a rotációs hibát z tengely mentén, $k = 1, \dots, n$, n jelöli a szimuláció hosszát, $n = t_{sim}f_s$, t_{sim} jelöli a szimuláció időtartamát és f_s jelöli a mintavételezési frekvenciát.

A **szerkezetet érő káros behatások alatt** elsősorban a robot mechanikai és elektronikai szempontból érzékeny részeiben jelentkező vibrációkat és parazita nyomatékokat kell érteni. Eme káros jelenségek minimalizálásának jelentősége a robot tervezett élettartalmával és megbízhatóságával szemben támasztott elvárásoktól függ. Ezen felül az energiafelvételt is növelik, főleg egy agresszív szabályozó alkalmazása esetén.

A vibrációk alkatrészekre gyakorolt hatása, összetettségénél fogva külön kutatás témáját képezné. Jelen esetben csak a jelenség általános kivizsgálásával és minimalizálásával foglalkozom.

Az ipari robotok állapotának kivizsgálására látható egy példa a [99] cikkben. Az ipari robotok esetén jelentkező rezgéseket a gép mozgó alkatrészei generálják, és a nagy amplitúdójú rezgések gyakran a jövőben kialakulandó hibák előjelének tekinthetők. Vibráció analízist azonban a mobil robotok esetén is érdemes végezni, a robotok kialakításának vagy működésének optimalizálásához. Erre látható egy példa a [100] publikációban, ahol egy hernyótalpas kivizsgáló robot vibrációs analízisét valósították meg a haladási sebesség optimalizálásának érdekében.

A Szabad(ka)-III robot felépítése alapján a vibrációkat három helyen érdemes vizsgálni: a tibia-

femur csuklóban a femur-coxa csuklóban, illetve a testen. A csuklóban jelentkező vibrációk a reduktorokat, fogaskerekeket és csapágyazást, a testben jelentkező vibrációk pedig az abban elhelyezett elektronikai részeket károsíthatják. Az alsó és felső csuklók megkülönböztetése azért is hasznos, mert a felső csuklóban található differenciális mechanika, kialakításából adódóan érzékenyebb az alsó csukló mechanikájától.

A vibrációk kvantitatív értékeléséhez a translációs és rotációs mozgások sebesség vagy gyorsulás spektrumának csúcs és RMS értékeit lehet alkalmazni. Járó robotok esetében érdemes a legnagyobb tengely mentén jelentkező vibrációkat figyelembe venni (részletes levezetés [101]-ben látható). Ezek alapján a robot egyes részeiben jelentkező vibrációk objektív függvénye a következő két képlettel írható le:

$$f_v = f_{v,peak} = \max\{\max(v_{xb}(f)), \max(v_{yb}(f)), \max(v_{zb}(f))\}, \quad (4.7)$$

$$f_v = f_{v,RMS} = \max\{rms(v_{xb}(f)), rms(v_{yb}(f)), rms(v_{zb}(f))\}, \quad (4.8)$$

ahol $v_{xb}(f)$, $v_{yb}(f)$ és $v_{zb}(f)$ a robottest translációs vagy rotációs sebességének (vagy gyorsulásának) spektruma az x , y és z irányban a frekvencia (f) függvényében.

A robot elektromechanikai jellemzőinek optimalizálása mellett a gyártási költségek és az összetettség csökkentése is cél. Erre egy lehetőség egyes szerkezeti elemek, alkatrészek egységesítése (pl. egyforma motorok és reduktorok használata). Az egyforma motor-reduktor egységek használatát, a **csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálásával** érhetjük el.

Alapértelmezetten, egy robot különböző csuklóiban jelentősen eltérő nyomatékok jelentkeznek. Erre jó példa a korábbi robot, Szabad(ka)-II, melynél a tripod járásalgoritmus, és az oldalanként egyvonalban elhelyezett lábak miatt, nagyok voltak a nyomaték különbségek és három különböző motor-reduktor egységet kellett alkalmazni. Ez jelentősen megnehezítette a tervezést és növelte a robot előállítási árát. Szabad(ka)-III esetében azonban érdemes mérlegelni a csuklóban jelentkező nyomatékok normalizálását, az egyforma motor-reduktor egységek használatának érdekében.

Az optimalizálás során, ezt kétféleképpen lehet kivitelezni. Az egyik megoldás a csuklóban jelentkező maximális elfogadható nyomatékok meghatározása, és az ennél nagyobb értékek objektív függvényben történő büntetése. A másik megoldás, a nyomatékok közötti eltérés (hiba) mérése, illetve ennek a minimalizálása. A különbséget a csuklónyomatékokra (M) számolt

RMS értékek $rms(M)$ közötti standard deviációval fejezzük ki, hiszen a kisebb deviáció egymáshoz közelebbi értékeket jelent, függetlenül az átlag értéktől. Az RMS függvény pedig a nyomaték nagyságát reprezentálja négyzetes átlagolással, ami azt jelenti, hogy a nagyobb értékeket jobban figyelembe veszi, mint a kisebb értékeket, a sima átlag számításhoz viszonyítva. Ezek alapján, a nyomatékkülönbség objektív függvénye a következő képlettel írható le:

$$f_{\tau} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (rms(M_k) - \overline{rms(M_k)})^2}, \quad (4.9)$$

$$\overline{rms(M_k)} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K rms(M_k),$$

ahol K a csuklók száma, M_k a k csuklóban mért nyomaték, $rms(M_k)$ pedig a k csuklóban mért nyomatékra számolt RMS érték.

A csuklókat hajtó elemek egységesítésére a SpaceClimber hexapod robot esetében is láthatunk egy példát. Itt a költségek csökkentése nem volt cél, viszont az ürminősítési eljárások további lépésekben történő egyszerűsítése érdekében a lábakat mozgató 24 meghajtó azonos felépítésű volt [27].

A robot szerkezetének optimalizálásánál alkalmazható objektív függvényeket a 11. táblázat foglalja össze:

Optimalizálási cél:	Jellemzők:	Meghatározás:	Képlet:
Energiafogyasztás minimalizálása	Fontos	Egyszerű	f_E
Tömeg minimalizálása	Minimálisan befolyásolható	Egyszerű	f_m
Sebesség és mozgékonyság (dexterity) maximalizálása	Előre meghatározott	Egyszerű	f_d
Test nem kívánt mozgásának (transz. + rot.) minimalizálása	Fontos	Közepes	f_t, f_r
Szerkezetet érő káros behatások minimalizálása	Viszonylag Fontos	Összetett (FFT)	$f_{v,peak}, f_{v,RMS}$
Csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálása	Fontos	Egyszerű	f_{τ}

11. táblázat - Az optimalizálás céljai.

A súlyozott átlag fitness függvény a korábbi objektív függvények összeadásával és megfelelő súlyozásával írható le. Az összes objektív figyelembe vétele esetén a következő képletet kapjuk:

$$f_{fitness} = k_E f_E + k_m f_m + k_d f_d + (k_t f_t + k_r f_r) + k_v f_v + k_\tau f_\tau, \quad (4.10)$$

ahol f_E az energiafogyasztás objektív függvénye, f_m a tömeg objektív függvénye, f_d a mozgékonyág objektív függvénye, f_t a translációs mozgás objektív függvénye, f_r a rotációs mozgás objektív függvénye, f_v a vibrációk objektív függvénye, f_τ a nyomatékkülönbség objektív függvénye, k_E , k_m , k_d , k_t , k_r , k_v , és k_τ pedig az objektív függvényekhez tartozó súlyzó paraméterek.

4.4.2 Optimalizálendő paraméterek

A korábbi kutatások során meghatároztuk, hogy a robotnak hatlábú szerkezetnek kell lennie, mivel így ideális arányt lehet elérni a stabilitás, a redundancia és a haladási sebesség terén [1]. Ezen felül a hatlábú robotok rendelkeznek bizonyos szintű mechanikai hibatűréssel is, azaz képesek meghibásodott lábbal is járni megfelelő hibatűrő járásalgoritmus és adaptív járástervezés alkalmazásával [102], [103].

A lábak elrendezése alapján három szerkezeti koncepció különböztethető meg:

- tengelyszimmetrikus (axisymmetric),
- csak a hosszanti tengely mentén szimmetrikus, illetve
- a hosszanti és az oldalirányú tengely mentén szimmetrikus felépítés.

Tengelyszimmetrikus elrendezést omnidirekcionális járású robotok esetén érdemes alkalmazni. Ez a járásmód Szabad(ka)-III esetén nem volt fontos szempont, ezért ezt a megoldást elvettem. A robot vízszintes irányú járásra lesz optimalizálva természetesen az elfordulás lehetősége mellett. Megmaradt a kérdés, miszerint van-e előnye a rovarvilágban is elterjedt csak hosszanti szimmetriának? Hogy szükséges-e, illetve, hogy milyen mértékű előnyt eredményez a robot eleje és a hátulja közötti aszimmetria az szintén az optimalizálással dönthető el. A kétszeres aszimmetria egyik célja lehet az előre dőlés (rearing) jelenségének [1] vagy a ferde talajon, lépcsőn történő mászásnak a kezelése.

Az optimalizálendő paramétereket három nagyobb csoportra oszthatjuk. Ezek a szerkezeti, a rugózási és a járásalgoritmus paraméterek.

A robot geometriai **szerkezetének** paramétereit a következő alcsoportok képezik:

- **Lábszegmensek hossza:** Ide a tibia és a femur hossza tartozik. Szabad(ka)-III esetén a differenciál csukló miatt a coxa nulla hosszúságú, külön tarsus szegmens pedig a talp kialakítása miatt nincs jelen (23. ábra - b). A tibia és a femur hosszai a csuklók forgástengelyei között értelmezendők.
- **Lábak elhelyezése a testen:** A lábak csatlakozási pontjait (coxa) a testen az X és Z tengelyek mentén lehet elmozgatni. (23. ábra - a), illetve a lábpárok egymástól mért távolságát is lehet változtatni (23. ábra - c).
- **Súlypont elhelyezése a testben:** Az elektronika és az akkumulátor súlypontját testen belül a robot középpontjához képest X és Z tengelyek mentén lehet elmozgatni (23. ábra - d).
- **Motorok és reduktorok kiválasztása:** A korábbiakkal ellentétben ez a két paraméter nem folytonos, hanem diszkrét értékeket vehet fel, vagyis ki lehet választani, hogy egy adott gyártó (esetünkben Faulhaber) termékei közül melyek tudnak megfelelő nyomatékot leadni.

A robot felépítését úgy választottuk meg, hogy a hosszanti tengelye mentén szimmetrikus legyen, ezért a lábszegmensek hosszát és a lábak elhelyezését lábpáronként (elülső, középső és hátsó lábpár) kell meghatározni.

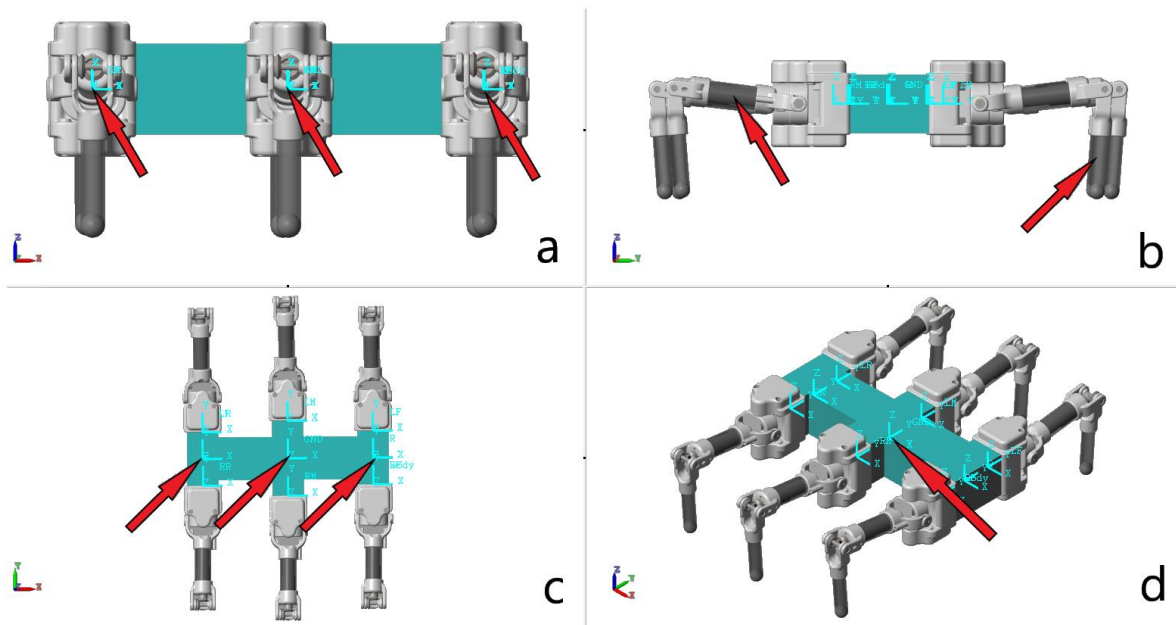
A robot **rugózásához** a következő paraméterek tartoznak:

- **A rugók rugózása és csillapítása:** A tibia szegmensben található háromszoros rugócsillapító rendszer, feladata a járás közben jelentkező vibrációk elnyelése. Ennek a rendszernek a működése a [78] cikkben van részletesen leírva. Az optimalizálás során tehát három rugózási és három csillapítási paramétert kell meghatározni.

A robot **járásalgoritmusának** paramétereit a következő alcsoportok képezik:

- **Testtartás:** Ide sorolható a test talajtól mért magassága. A testtartás egyéb paramétereit a mozgásalgoritmus optimalizálásánál érdemes figyelembe venni.
- **Talp pálya:** Ide sorolható a talp pályájának magassága swing fázisban és a talp pályájának hossza (mely minden lábra azonos), illetve a talp pályájának eltolása a haladási irányban és a testtől mért távolsága stance fázisban (mely lábpáronként értendő).

Az optimalizálandó paraméterek a 12. táblázatban vannak összefoglalva.



23. ábra - a) A lámpárok elhelyezése a testen az X és Z tengelyek mentén. b) A tibia és a femur szegmens hossza. c) A lámpárok közötti távolság egy lámpáron belül. d) A súlypont elhelyezése az X és Z tengelyek mentén.

Szerkezeti paraméterek	Paraméterszám
Tibia hossza:	3
Femur hossza	3
Coxa X pozíciója	3
Coxa Z pozíciója	3
Lámpárok közti Y távolság	3
Súlypont XZ pozíciója	2
Rugózási paraméterek	Paraméterszám
Rugózás	3
Csillapítás	3
Járásalgoritmus paraméterek	Paraméterszám
Test magassága (Z)	1
Lábpálya magassága (Z)	1
Lábpálya hossza (X)	1
Lábpálya eltolása X irányban	3
Lábpálya eltolása Y irányban	3

12. táblázat - Az optimalizálendő paraméterek.

4.4.3 A paraméterek számának csökkentése

A feladat nehézségét növeli az optimalizálandó paraméterek nagy száma, és ezek egymásra hatása. Egyrészt sok paraméter meghosszabbítja az optimalizálás idejét, másrészt a paraméterek többsége összefügg, és azok külön-külön változtatása hasonló eredményeket generálhat.

Például:

- Ha adott sebesség (lépéshossz) elérése a cél, akkor ugyanazt az eredményt el lehet érni a lábak pozíciójának, a szegmensek hosszának, illetve a lábpálya hosszának a módosításával is.
- Ha a cél, hogy adott tömeg mellett megfelelően alacsony csukló nyomatékok legyenek elérve, akkor erre a motorok nyomatéka, a lábak elhelyezése, a szegmensek hossza és a testtartás is kihat.

A fentiek eredményeképpen az optimalizálás során sok helyi minimum keletkezhet. Azt, hogy különböző paraméterek változtatása valóban hasonló hatást eredményez, a lokális minimumok számának vizsgálatával lehet nagyobb valószínűséggel megállapítani.

A felsorolt indokok miatt érdemes elgondolkodni a következő lehetőségeken:

- Csökkenthető a paraméterek száma, ha eleve valószínűsíthető, hogy nem szükséges mindegyiket optimalizálni.
- Ha több, különböző paraméter módosításával is ugyanaz az eredmény érhető el, akkor kivehetők az optimalizálásból azok, melyeket célszerűbb a gyártási feltételek alapján meghatározni.
- Az optimalizálás több részoptimalizálásra bontható, ha kategorizálhatók a megfelelő célok és a hozzájuk tartozó, azokat leginkább befolyásoló paraméterek.

Az előző alfejezetben meghatározottak alapján (a 12. táblázat szerint) 17 szerkezeti, 6 rugózási és 9 járásalgorithmus paramétert, összesen tehát 32 paramétert szükséges definiálni. Ez nagyon nagy szám, amit célszerű csökkenteni az optimalizálás megkezdése előtt.

Szerkezeti paraméterek számának csökkentése

A tibia és a femur hosszát, a coxa X és Z pozícióját, illetve a lábak közti Y távolságot lábpáronként kell meghatározni. A három lábpár esetén (front, middle és rear), ez 3 x 5 paramétert jelent. Azonban, ha a robot az oldalirányú tengelye mentén is szimmetrikus, akkor csak két lábpárral (külső és belső) kell számolni, ami 2 x 5 paramétert eredményez. A mostani optimalizálást így végeztem. Hogy hoz-e valamilyen előnyt az elülső és a hátulsó rész közötti

aszimmetria azt egy későbbi lépésben vizsgálom ki.

Ezen felül, nem szükséges külön meghatározni a belső és külső coxa szegmensek csatlakozási pozícióit. Elegendő csupán a belső pozícióját változtatni a külsők középpontjához képest. A lábpárok együttes magassága a test súlypontjára hatna ki, de az külön is állítható.

Rugózási paraméterek számának csökkentése

A robot lábában három rugó található. A talp felől haladva, az első a talp gumis bevonata, mely a magas frekvenciájú rezgéseket nyeli el, melyek akkor keletkeznek, amikor a láb nekiütözik a földnek. A második egy puhább acélrugó, mely csökkenti a járás közben jelentkező alacsony frekvenciájú rezgéseket, és visszatáplálhatja az eltárolt energiát. A harmadik pedig egy keményebb acélrugó, mely az esés következtében keletkező nagyobb erőbehatásokat nyeli el.

A most elvégzett optimalizálás nem foglalkozik a robot esésével, illetve elhanyagolható a talp vékony gumi bevonatának hatása, ezért egy rugóállandó és egy csillapítási együttható paraméterrel kell foglalkozni.

Járásalgoritmus paraméterek számának csökkentése

Mivel három helyett két lábpár csoport van definiálva, ezért a lábpálya eltolása X és Y irányban, ebben az esetben is kevesebb, 3x2 helyett 2x2 paramétert fog eredményezni.

A paraméterek számának racionális csökkentése után megmaradt paraméterek a 13. táblázatban vannak összefoglalva.

Szerkezeti paraméterek	Paraméterszám
Tibia hossza:	2
Femur hossza	2
Belső coxa X pozíciója	1
Belső coxa Z pozíciója	1
Lábpárok közti Y távolság	2
Súlypont X és Z pozíciója	2
Rugózási paraméterek	Paraméterszám
Rugózás	1
Csillapítás	1
Járásalgoritmus paraméterek	Paraméterszám
Test magassága (Z)	1

Lábpálya magassága (Z)	1
Lábpálya hossza (X)	1
Lábpálya eltolása X irányban	2
Lábpálya eltolása Y irányban	2

13. táblázat - A csökkentett számú optimalizálandó paraméterek.

Az optimalizálandó paraméterek száma a fenti elgondolások alapján 32-ről 19-re csökkent.

4.4.4 Tesztkörnyezet

Az optimalizálás elvégzéséhez a megfelelő tesztkörnyezetet (scenárió) is meg kell határozni. Szabad(ka)-III esetében elsősorban a következő tényezőket kellett definiálni:

- a robot haladási sebessége,
- a terep jellemzői, illetve
- a kiválasztott járásalgoritmus.

A szimulációt olyan haladási sebesség mellett érdemes futtatni, mely sebesség egyrészt a valós igénybevételek alkalmával is gyakran lesz használva, másrészt pedig megfelelően magas, hogy megnyilvánuljanak az extrém igénybevételre jellemző fizikai jelenségek. Ezért azt a legmagasabb sebességet választottam ki, melynél a robot még hiba (deformáció) nélkül tudja követni a talp pályáját.

A terep jellemzői közé a következők tartoznak:

- a talaj csúszása, vagyis a talaj és a talp közötti súrlódás,
- a talaj meredeksége, mely a vízszintes és a talaj síkja által bezárt szög, illetve
- a talajon található akadályok jellege és mérete.

A talaj és a talp között jelentkező Coulomb-súrlódás elemzése részletesen ki van fejtve az [53] publikációban, ahol a talaj és a láb közötti súrlódási együtthatót kísérletileg határoztuk meg. A Szabad(ka)-II robot talpa egy gumis bevonattal volt bevonva, és a gyakorlati mérések során, egyenes talajon történő járás közben nem jelentkezett csúszás. Szabad(ka)-III robot esetén is hasonló gumis talpbevonatot tervezek használni, ezért csúszás jelenségével nem foglalkoztam. A Coulomb-súrlódási tényezőnek $\mu = 1$ értéket határoztam meg, ami megfelel a száraz gumi és beton között jelentkező súrlódás értékének. Különleges, csúszós talajon történő járás esetén a súrlódási tényező változtatásával bővíthető a szimuláció.

A talaj meredekségének kompenzálása, illetve kezelése a lábak negyedig csuklójának feladata. A negyedik csukló által lehet elérni, hogy (oldalnézetből) a lábak ne a talajra legyenek merőlegesek, hanem tengelyük egybeessen a gravitációs gyorsulás vektorával. Ezáltal, emelkedőn történő haladás közben a robot súlypontja is előrébb kerül, ami jelentősen csökkenti a felborulás (hátraesés) esélyét. Szabad(ka)-III is ferde talajon történő járásra lett előrelátva, mivel 4 szabadságfokú lábakkal rendelkezik. Az optimalizálást ennek megfelelően, vízszintes és ferde talajon is el kell végezni. Ennek függvényében, három optimalizálási környezetet határoztam meg: vízszintes talaj, 30 fokos lejtő és 30 fokos emelkedő.

A szerkezeti optimalizálást sima talajon végeztem, melyen nincsenek akadályok. Ennek oka, hogy a szegmens méretek változtatása miatt, a lábak véletlenszerűen ütköznének az akadályokkal és ez sztochasztikus eredményekhez vezetne. Akadályokkal rendelkező tesztkörnyezetet a mozgásalgoritmus optimalizálásánál tervezünk alkalmazni egy soron következő kutatás folyamán.

A járásalgoritmus megválasztásánál a leggyakrabban használt járásmódok a wave, a ripple és a tripod. A három járásalgoritmust a következők jellemzik:

- A wave járás kínálja a leglassabb haladási sebességet, ebben az esetben egyszerre öt láb van a talajon és egy a levegőben.
- A ripple járás a közepes sebességű megoldás, melynél egyszerre négy láb van a talajon és kettő a levegőben,
- A tripod járás a leggyorsabb mód, melynél egyszerre három láb van a talajon és három a levegőben [104].

A tripod járás közben, a robot egyik oldalán a két külső, míg a másik oldalon a belső láb van egyszerre a földön. Ennek következtében a középső lábon közel dupla akkora terhelés jelentkezik, mint a külsőkön. Szabad(ka)-II validálásánál ezt a járásmódot használtam, mivel a szerkezet extrém igénybevétele volt a cél. Eredményképpen a középső lábakra erősebb motor-reduktor egységeket kellett építeni.

Szabad(ka)-III optimalizálásánál viszont a köztes lehetőséget választottam, vagyis a ripple járást alkalmaztam, melynél mindkét oldalon két láb van egyszerre a földön és egyenletesebb a lábakra érő terhelés. Az így kapott szerkezet alapértelmezetten nem ideális a tripod járásmódhoz, viszont ezt a problémát orvosolni lehet a járási paraméterek későbbi, külön optimalizálásával, azon belül is a lábpálya Y irányú eltolásával.

4.5 Optimalizálás

A folytatásban először az optimalizálások során használt fitness függvény definiálása lesz bemutatva. Ezután egy hagyományos optimalizálási folyamat kerül kifejtésre, mely egyszerre foglalkozik az összes, vagyis mind a 19 paraméter meghatározásával. Ezt az eljárást használva, az eredményként kapott fitness értékek ugyan hasonlóan alacsonyak voltak, de a paramétereik szórtak. Ebből kifolyólag ismertetésre kerül a probléma megoldására kidolgozott, újszerű, több-lépéses optimalizációs folyamat. Végül pedig be lesz mutatva az optimalizáció helytállóságának verifikálása független tesztkörnyezetek segítségével.

4.5.1 Fitness függvény meghatározása

A szerkezeti paraméterek meghatározása először egy hagyományos (egy-lépéses) optimalizációval történt. Az ehhez használt fitness függvénynek az energiafogyasztás minimalizálása, a sebesség és a mozgékonyág megtartása, és a test nem kívánt mozgásának minimalizálása voltak az objektívjei. A később kifejlesztett, két-lépéses optimalizáció fitness függvénye ki lett bővítve a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálása objektívvel is.

A test nem kívánt mozgásának minimalizálásánál, a robot testére szerelhető szenzorok jellege alapján a rotációs mozgásokat minimalizáltam (ennek oka, hogy például egy kameránál pár fokos elforgatás sokkal nagyobb hibát eredményez, mint pár milliméter elmozdulás). A csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálását azokon a csuklókon érdemes végezni, melyeknél nagyobb terhelések jelentkeznek. Szabad(ka)-III esetében a differenciális csukló két motorjában jelentkezett nagyobb terhelés, ezért ezek nyomatékait minimalizáltam. A tibiát mozgató csukló sokkal kisebb terhelésnek volt kitéve ezért ennek nyomatékain nem kellett változtatni.

A fitness függvény súlyzó paramétereivel lehet beállítani, hogy mely cél milyen mértékben legyen figyelembe véve. Mivel jelen esetben nem volt konkrét felhasználási eset meghatározva, ezért a súlyzókat úgy állítottam be, hogy az objektívek egyforma mértékben legyenek számításba véve. Ezt az objektívek normalizálásával tudtam elérni. A súlyzókat tehát úgy választottam meg, hogy a kiindulási szerkezeti paraméterekkel kapott eredeti objektív értékeknek normalizálás után 1 legyen az eredménye. Ez alól kivételt képez a mozgékonyág büntető függvénye, mely hibamentes járásnál nulla, hiba esetén pedig egy nagyobb büntető értéket ad vissza.

Az egy-lépéses optimalizáció fitness függvénye a (4.11) képlettel, míg a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálásával kibővített, két-lépéses optimalizáció fitness függvénye a (4.12) képlettel írható le:

$$f_{fitness} = k_E f_E + k_d f_d + k_r f_r, \quad (4.11)$$

$$f_{fitness} = k_E f_E + k_d f_d + k_r f_r + k_\tau f_\tau. \quad (4.12)$$

Az egy-lépéses optimalizációs eljárások során három egy-szenáriós és egy multi-szenáriós (három tesztkörnyezetes) optimalizációt végeztem el. A multi-szenárió fitness függvény a három szenárió során kapott fitness függvények súlyozott összege.

A két-lépéses optimalizáció multi-szenárió fitness függvénye szintén a három szenárió során kapott fitness függvények súlyozott összege. Ebben az esetben azonban a tesztkörnyezet valós alkalmazás esetén jellemző gyakorisága is figyelembe lett véve. Mivel a vízszintes talajon történő járás gyakorisága nagyobb, ezért ennek a szenáriónak a súlyzója 2-es, a többi szenárió súlyzója pedig 1-es értéket kapott. Ezek alapján, a két-lépéses optimalizáció multi-szenárió fitness függvénye a következő képlettel írható le:

$$f_{fitness-multi-scenario} = 2f_{egyenes} + f_{emelkedő} + f_{lejtő}. \quad (4.13)$$

A két-lépéses optimalizációra vonatkozóan, a kiindulási, mérnöki megfontolások alapján meghatározott szerkezeti paraméterekkel végzett szimuláció fitness értéke: $f_{fitness-initial} = 0 + 1 + 1 + 1 = 3$, a multi-szenárió fitness értéke pedig $f_{fitness-multi-scenario-initial} = 4f_{fitness-initial} = 12$. Az eredmények javulását ehhez az értékhez lehet viszonyítani.

4.5.2 Egy-lépéses optimalizálás eredményei

Az optimalizálási eljárások egy Particle Swarm Optimization (PSO) heurisztikus kereső algoritmus segítségével történtek. A folyamat kidolgozása az előző kutatások során megszerzett és publikált tapasztalatra épült ([47], [53]). Egy korábbi, egyszerűbb felépítésű hexapod robot, PSO alapú szerkezeti és járás optimalizálása a [105] és [106] cikkekben van bemutatva.

Az egy-lépéses optimalizálás során a generációk száma és a populáció mérete is 100-100 volt. Az optimalizálás elvégzéséhez egy 6 magos Intel Core i7-8700 számítógépet használtam. Egy iteráció futtatási ideje kb. 55 perc. Az említett generáció és populáció paraméterek mellett egy optimalizálási folyamat során nagyságrendileg 3000 iteráció lett végrehajtva, aminek futási

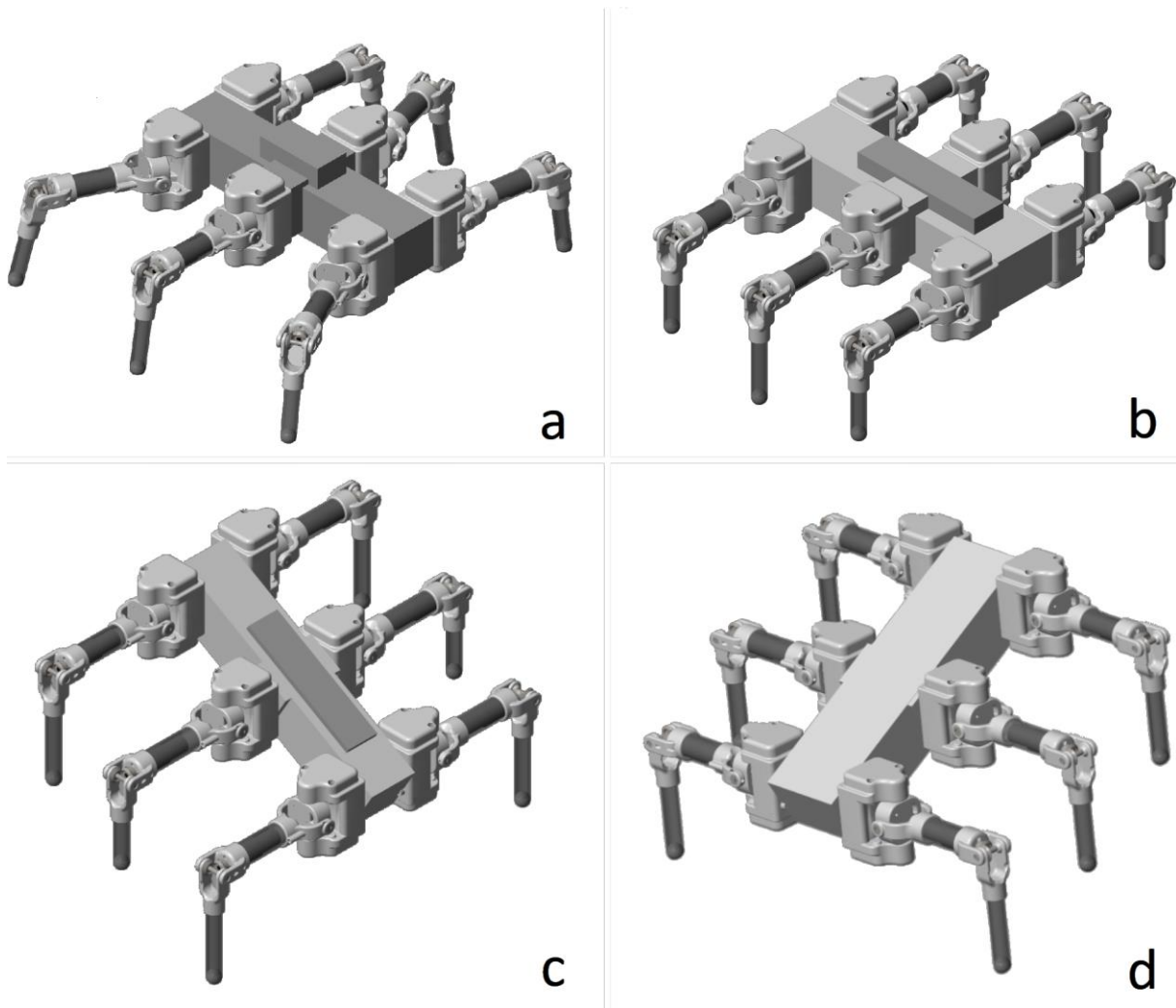
ideje nagyságrendileg 30 nap. Ez hosszú időnek számít, de a kutatás eme szakaszában elfogadhatónak tűnt. Ettől függetlenül már ekkor felmerült az igény egy kevesebb iteráció számmal működő megoldás kidolgozására.

A tesztkörnyezettel szemben támasztott elvárások alapján, négy optimalizálást végeztem el. Az első három esetben vízszintes talajon, 30 fokos lejtőn és 30 fokos emelkedőn futott a szimuláció. A negyedik esetben, egy iteráció során, mindhárom talajon járt a robot és a kiértékelésnél a három normalizált fitness függvény átlagát vettem figyelembe. Az eredmények (összehasonlítva az alapértelmezett értékekkel) a 14. táblázatban láthatók:

Fitness függvény	Eredeti szerkezet	Optimalizált szerkezet	Eredeti szerkezet (normalizált)	Optimalizált szerkezet (normalizált)	Százalékos változás
Vízszintes talaj					
Energiafogyasztás	2881 J/m	2090 J/m	1	0,7254	-27,46%
Rotációs mozgás	0,3845°	0,0401°	1	0,1043	-89,57%
Mozgékonyosság	sikeres	sikeres	0	0	0
30 fokos lejtő					
Energiafogyasztás	2396 J/m	1631 J/m	1	0,6807	-31,93%
Rotációs mozgás	1,6330°	0,1094°	1	0,0670	-93,30%
Mozgékonyosság	sikeres	sikeres	0	0	0
30 fokos emelkedő					
Energiafogyasztás	4304 J/m	3048 J/m	1	0,7082	-29,18%
Rotációs mozgás	1,6579°	0,0767°	1	0,0463	-95,37%
Mozgékonyosság	sikeres	sikeres	0	0	0
3 szcenárió (kombinált)					
Energiafogyasztás	3219 J/m	2770 J/m	1	0,8605	-13,95%
Rotációs mozgás	1,2625°	0,2343°	1	0,1856	-81,44%
Mozgékonyosság	sikeres	sikeres	0	0	0

14. táblázat - A fitness eredmények az optimalizálás előtt és után.

A robot optimalizálás utáni szerkezeti felépítései a 24. ábrán láthatók. Az optimalizálás eredményeképpen kapott paraméterek pedig a 15. táblázatban vannak összefoglalva.



24. ábra - A robot szerkezeti felépítése a) a kombinált tesztkörnyezetre optimalizált paraméterekkel; b) a vízszintes talajra optimalizált paraméterekkel; c) a 30 fokos lejtőre optimalizált paraméterekkel; d) a 30 fokos emelkedőre optimalizált paraméterekkel.

Szerkezeti paraméterek	Kezdő- érték	Optima- lizálás - egyenes	Optima- lizálás - lejtő	Optima- lizálás - emelkedő	Optima- lizálás – kombin.
Külső lábpár lábai közti Y táv.	100 mm	93,4279	74,458	106,5707	70,2246
Belső lábpár lábai közti Y táv.	100 mm	120,3522	95,0274	121,3001	112,2924
Belső coxa X pozíciója (eltolása)	0 mm	19,7000	-0,49426	-6,4293	2,9641
Belső coxa Z pozíciója (eltolása)	0 mm	18,5645	0,2313	-0,40316	8,0285
Külső femur hossza:	160 mm	143,4533	164,2839	153,1806	151,3342
Belső femur hossza	160 mm	159,9135	174,7399	161,9413	149,7583
Külső tibia hossza:	120 mm	127,0185	158,8918	146,8714	124,845
Belső tibia hossza:	120 mm	146,4776	125,9656	139,7472	132,0744
Test tömeg paraméterek					
Elektronika súlypont X pozíciója	0 mm	27,4925	23,9375	20,0605	-2,0042
Elektronika súlypont Z pozíciója	0 mm	30,7935	14,2286	34,039	43,126
Rugózási paraméterek					
Talp rugózása	10000 N/m	93939,14	41470,47	56021,39	94006,61
Talp csillapítása	100 Ns/m	147,4761	415,6104	281,8203	76,434
Járásalgoritmus paraméterek					
Test magassága (Z)	120 mm	104,9738	111,6282	126,281	121,3654
Lábpálya magassága (Z)	50 mm	35,7453	34,545	62,2936	84,8284
Lábpálya hossza (X)	40 mm	49,9779	46,8977	49,7712	49,0773
Külső láb pályájának eltolása (X)	0 mm	25,1801	0,23226	13,4626	27,2075
Belső láb pályájának eltolása (X)	0 mm	6,8731	12,7356	14,9235	-0,20042
Külső láb pályájának eltolása (Y)	160 mm	121,5036	123,1612	182,9267	163,4076
Belső láb pályájának eltolása (Y)	160 mm	129,8539	128,1389	182,9444	170,3446

15. táblázat - Az optimalizálás eredményei (paraméterek).

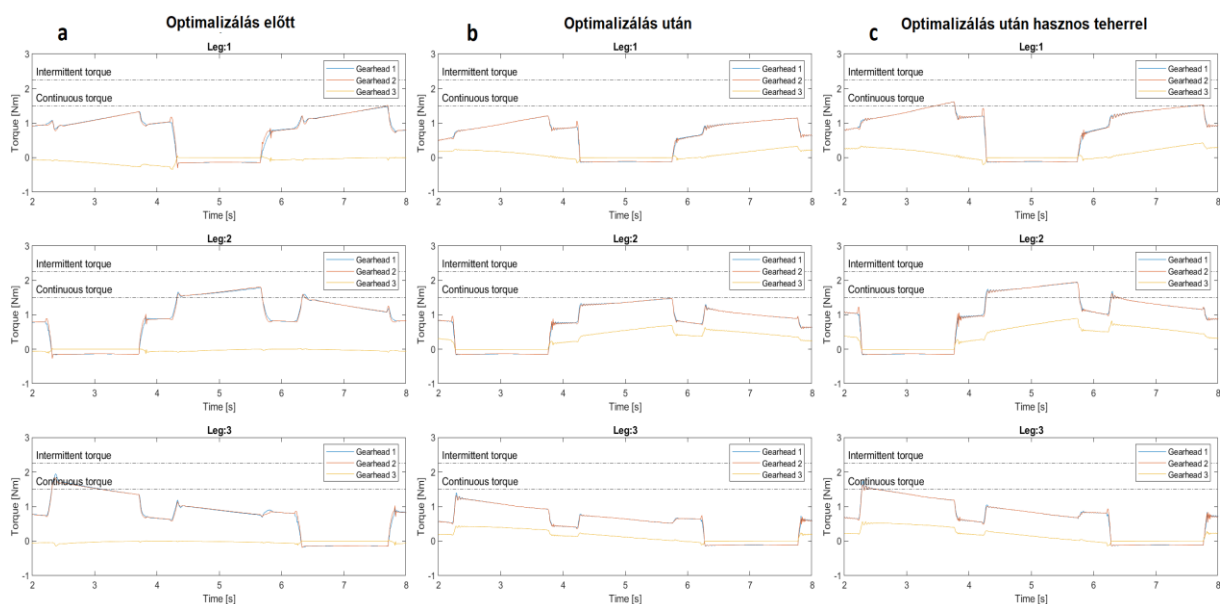
Mint ahogy az a 14. táblázatban is látható, a négy optimalizáció eredményeképp, az Energiafogyasztás objektív függvény értéke rendre 27,46%, 31,93%, 29,18% és 13,95% a Rotációs mozgás objektív függvény értéke pedig rendre 89,57%, 93,30%, 95,37% és 81,44% százalékkal csökkent.

A folyamat során elért változások jelentős javulást hoztak a robot működésében. Fontos gyakorlati szempont, hogy a leggyakrabban használt, vízszintes talajon történő járás esetén mennyit változott a robot hatótávja. A 266,4 kJ energiát tároló akkumulátorral az optimalizálás előtti 2881 J/m energiafogyasztással 92 métert, az optimalizálás utáni 2090 J/m értékkel pedig 127 méter távolságot tud a robot egy töltéssel megtenni. A szignifikánsan lecsökkent rotációs mozgás (rázkódás) pedig nagy jelentőséggel bír a roboton elhelyezett szenzorok által szolgáltatott adatok mérésében.

A kombinált, egyszerre három talajra elvégzett optimalizáció energiaspórolás területén kisebb, a rázkódás területén pedig kicsit kisebb javulást eredményezett, de ez várható is volt a feltételek komplexitása miatt. Ha fontosabb az energiafogyasztás növelése a rázkódás csökkentésénél, akkor az eredményeket a megfelelő súlyzó paraméterek állításával lehet tovább javítani.

4.5.3 Csuklónyomatékok kivizsgálása

Annak érdekében, hogy el lehessen dönteni, szükséges-e az elvégzett optimalizálás mellett a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálása is (vagy rosszabb esetben a csuklók áttervezése nagyobb nyomatékú motorokkal és reduktorokkal), ki kellett vizsgálni a csuklókban jelentkező, optimalizálás utáni nyomatékokat. A 25. ábrán a robot bal oldali lábaihoz tartozó nyomatékok láthatók, az optimalizálás előtt, a vízszintes talajon történt optimalizálás után, illetve az optimalizálás után, hasznos teherrel (payload) terhelve.



25. ábra - A nyomatók a) az optimalizálás előtt; b) az optimalizálás után; illetve c) hasznos teherrel.

A lábak és a csuklók felépítése részletesen ki van fejtve a harmadik fejezetben és a [78] cikkben. A differenciális csuklóban található 1-es és 2-es átvitel (reduktor és szíjhajtás) 1,5 Nm folyamatos, illetve 2,25 Nm időszakos (intermittent) nyomaték, a tibiát és a femurt összekötő 3-as átvitel pedig 1 Nm folyamatos, illetve 1,5 Nm időszakos nyomaték leadására képes.

Az optimalizálás előtti (25. ábra - a) és utáni (25. ábra - b) áramgörbéket összehasonlítva, az látható, hogy optimalizálás után egyik áramgörbe sem haladja meg a megengedett értékeket. Ezen felül, a robotot 2 kg hasznos teherrel terhelve is az időszakos nyomaték értékeken belül maradnak a motoráramok (25. ábra - c). Ezek alapján, a kiválasztott csuklók megfelelnek. Nem szükséges külön optimalizálást végezni a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálására, vagy új csuklókat tervezni.

Annak ellenére, hogy az egy-lépéses optimalizáció eredményei alapján megfelelőnek bizonyultak a kiválasztott motor-reduktor egységek, a következőkben bemutatott két-lépéses optimalizáció fitness függvényét mégis kibővítettem a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálásával. Ennek oka, hogy a csuklónyomatékok közötti eltérések minimalizálása a kiválasztott motor-reduktor egységek megfelelőségének biztosítása mellett, az egységekre ható extrém igénybevételeket is visszafogja.

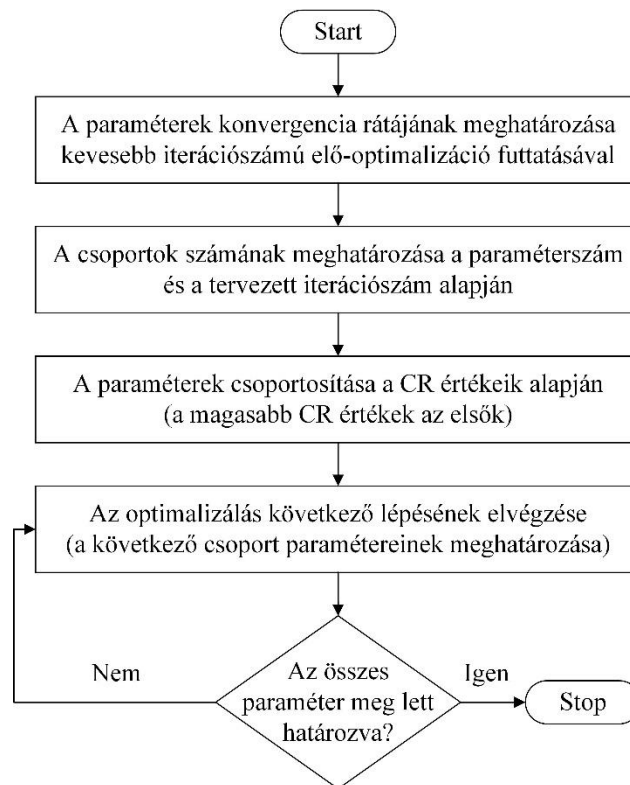
4.5.4 Több-lépéses optimalizáció

Az előző alfejezetben bemutatott szerkezeti optimalizálási folyamatok során egy lépésben, egyszerre optimalizáltam mind a 19 paraméter. Az optimalizáció többszöri futtatása folyamán (négy különböző scenárió esetén) azonban feltűnt, hogy az eredményként kapott fitness értékek, ugyan hasonlóan alacsony értékűek, de a paraméterek szórnak (15. táblázat). Ez a jelenség jól látható a később, ellenőrzésként elvégzett, alacsonyabb populáció és generáció számú próbaoptimalizálások eredményein is (16. táblázat „Össz-paraméter” oszlop). Ez arra utal, hogy az optimalizációs algoritmus lokális minimumokba futott. Ennek oka pedig a paraméterek magas száma, illetve a paraméterek korábban említett redundáns jellegű egymásra hatása lehet.

Ezt a jelenséget mérsékelheti a paraméterek számának további csökkentése, vagy a fitness függvény újabb objektívekkel történő bővítése. Ezek azonban mesterséges változtatások lennének, melyek ütköznek az eredetileg meghatározott célokkal. Szintén javított volna az eredményeken egy nagyobb populáció számú keresés, azonban a dinamikai modell szimulációjának futtatása a magas részletesség miatt különösen időigényes. Az optimalizálás során használt 6 magos Intel Core i7-8700 számítógépen egy iteráció futtatási ideje kb. 55 perc. Egy 500 iterációs optimalizálás 4-5 napig tart. Ezért egy olyan megoldás kidolgozása volt a cél, mely kevés iteráció számmal is a lehető legjobb eredményeket produkálja.

A fentebb felsoroltak alapján egy újszerű eljárást, az optimalizációs paraméterek csoportosítását és az optimalizáció több lépésben történő megvalósítását választottam. Ehhez azonban el kellett dönteni, hogy mi alapján történjen a csoportosítás. Logikusan hangzik a „fontosabb” paramétereket optimalizálni először, de kérdés, mely paraméterek tekinthetők fontosnak. Ennek meghatározására használható a [47]-ben bevezetett konvergencia ráta (convergence rate - CR). A CR azt mutatja, hogy az optimalizálás alatt az adott paraméter mennyire konvergált az optimum felé a fitness érték függvényében. Más szóval, utal arra, hogy mennyire fontos szerepet játszik a paraméter a becsült optimum elérése esetén [47]. A paraméterek CR értékeit a korábban elvégzett, össz-paraméteres (egy-lépéses) optimalizálások határozták meg. Az adatok vizsgálatakor kiderült az is, hogy az optimalizálás eredményeül kapott paraméterek szórása összefügg CR értékekkel. A nagyobb szórást mutató paramétereknek jellemzően alacsonyabb volt a CR értéke. Ez is a CR használatának alkalmasságára utal.

A paraméterek fontosságán és csoportosításán alapuló, több-lépéses optimalizáció folyamatábrája a 26. ábrán látható.



26. ábra - A több-lépéses optimalizáció folyamatábrája.

4.5.5 Két-lépéses optimalizálás eredményei

A fentebb leírtakra alapozva, a robot szerkezeti optimalizálását két lépésre bontottam. Az első lépésben a 10 legmagasabb CR értékkel rendelkező paraméter optimalizálása történt meg. A többi paraméter a kiindulási értékeken maradt. Az eredmények szórásának és a keresés megfelelő mélységének ellenőrzése érdekében két különböző populáció és generáció számmal is elvégeztem az optimalizációt (azaz 80x30-as és 120x40-es keresések kerültek végrehajtásra). Az eredmények a 16. táblázat „Első lépés” oszlopában láthatók. Az eredményként kapott paraméterek a kisebb és a nagyobb mélységű optimalizációban is nagyon hasonló értékeket mutattak. Kivételt képez a test magassága, de ennek a CR értéke is alacsonyabb volt, ezért feltételezhető, hogy valóban kevésbé hat ki a fitness függvényre. A fitness eredmények már most hasonló értékeket mutatnak, mint a 19 paraméteres optimalizációk esetében.

Az első lépés által meghatározott paramétereket felhasználó második lépés a maradék 9 paramétert, valamint az első lépésből áthozott két paramétert (test magassága és belső láb pályájának eltolása Y irányban) optimalizálta.

A test magasságának értéke az első lépésben mutatott szórás miatt, illetve egyébként fontos funkciója miatt került be a második lépés paramétereire közé is. A belső láb pályájának eltolása Y irányban pedig azért lett még egyszer optimalizálva, mert ez a paraméter kapta a legmagasabb CR értéket, illetve ez a paraméter hat ki a robot talpak jellegzetes ellipszis menti elrendeződésére. Érdekesnek tűnt leellenőrizni, hogy vajon a második lépés után is megmaradnak-e a korábbi értékek.

A második lépés optimalizációját is két különböző populáció és generáció számmal végeztem el (azaz ez esetben is 80x30-as és 120x40-es keresések kerültek végrehajtásra). Az eredmények a 16. táblázat „Második lépés” oszlopában láthatók. Az eredményként kapott paraméterek szórása most is nagyon alacsony volt, ebben az esetben a test magasságát is beleértve. A fitness eredmények jelentősen jobb számot mutatnak, a 19 paraméteres optimalizációhoz képest.

A két-lépéses optimalizáció eredményeit összegezve a következő következtetéseket lehet levonni: A paraméterek szétválasztásával az eredmények szórása sokkal alacsonyabb lett, mint a 19 paraméteres optimalizálás esetében. Ebből az feltételezhető, hogy az optimalizáció elkerülte a lokális minimumokat és a kiválasztott populáció és generáció szám is megfelelő volt. A fitness eredmények már az első lépésben hasonló összegeket mutattak, mint a 19 paraméteres optimalizáció esetén, a második lépésben pedig még tovább javultak.

Optimalizáció	Össz-paraméter		Két-lépéses - Első lépés		Két-lépéses - Második lépés	
	80x30	120x40	80x30	120x40	80x30	120x40
Populáció és generáció szám	80x30	120x40	80x30	120x40	80x30	120x40
Végrehajtott iterációk száma	202	475	481	695	445	757
Külső lábpár lábai közti Y táv.	93,68	82,18	-	-	60,14	64,41
Belső lábpár lábai közti Y táv.	112,73	101,34	-	-	135,10	139,37
Belső coxa X pozíciója	-38,98	2,78	1,97	0,56	-	-
Belső coxa Z pozíciója	0,17	0,48	0,48	0,67	-	-
Külső femur hossza	140,28	143,24	141,84	141,55	-	-
Belső femur hossza	168,38	173,78	160,64	166,79	-	-
Külső tibia hossza	124,37	121,00	-	-	126,02	139,55
Belső tibia hossza	149,51	139,45	-	-	144,43	142,41
Elektronika súlypont X poz.	-25,10	33,61	-	-	23,69	19,52

Elektronika súlypont Z poz.	-44,81	11,41	-	-	14,98	0,32
Talp rugózása	19191	19516	19589	19592	-	-
Talp csillapítása	302,94	294,08	-	-	419,05	319,16
Test magassága (Z)	109,72	108,10	100,30	86,72	118,90	119,51
Lábpálya magassága (Z)	49,44	13,30	-	-	11,98	11,37
Lábpálya hossza (X)	48,98	49,37	48,97	47,97	-	-
Külső láb pályájának eltolása (X)	36,46	36,40	37,41	39,24	-	-
Belső láb pályájának eltolása (X)	-4,41	22,08	-	-	21,29	17,94
Külső láb pályájának eltolása (Y)	122,50	128,36	122,82	120,23	-	-
Belső láb pályájának eltolása (Y)	126,42	122,83	120,87	120,33	123,16	124,59
Fitness érték:	7,34	7,04	7,18	7,23	6,65	6,68

16. táblázat - Fitness eredmények és optimalizálási paraméterek az össz-paraméteres optimalizálás esetén; a két-lépéses optimalizálás első lépésében; és a két-lépéses optimalizálás második lépésében.

A két-lépéses optimalizálás által kapott objektív eredmények (összehasonlítva az alapértelmezett értékekkel) a 17. táblázatban láthatók:

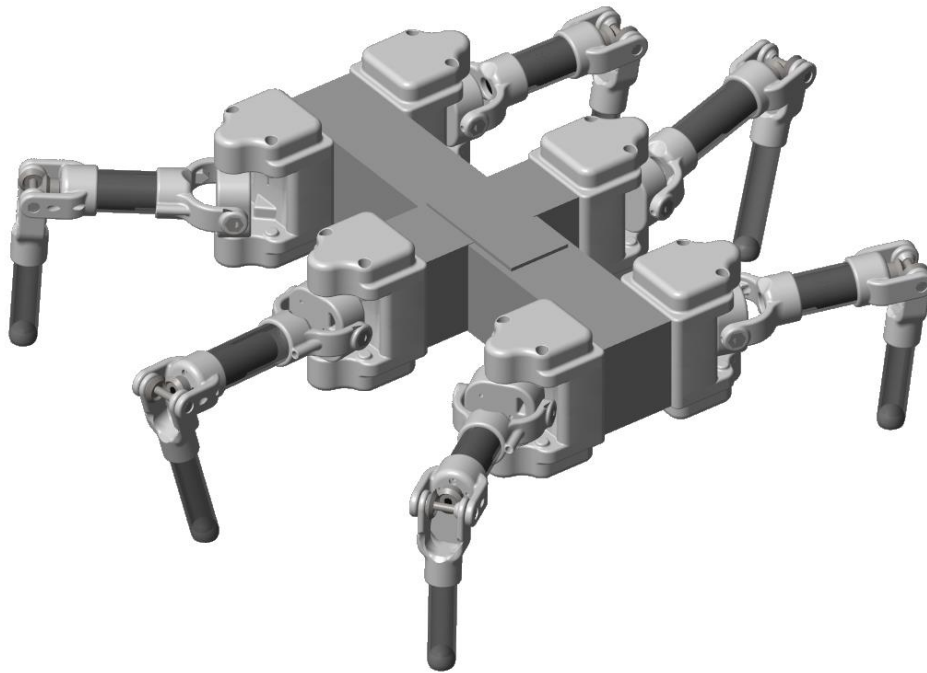
Objektív függvény: (három scenárió átlaga)	Eredeti szerkezet (normalizált)	Optimalizált szerkezet (normalizált)	Százalékos változás
Energiafogyasztás	1,0000	0,7785	-22,16%
Rotációs mozgás	1,0000	0,3817	-61,83%
Nyomatékkülönbség	1,0000	0,5087	-49,13%
Mozgékonyosság	0,0000	0,0000	0,00%

17. táblázat - Az objektív eredmények az optimalizálás előtt és után.

A két-lépéses optimalizálási folyamat során elért változások ez esetben is jelentős javulást hoztak a robot működésében. A leggyakrabban használt, vízszintes talajon történő járás esetén a 266,4 kJ-os energiát tároló akkumulátorral az optimalizálás előtti 2881 J/m energiafogyasztással 92 méter, az optimalizálás utáni 2258 J/m értékkel pedig 118 méter távolságot tud a robot egy töltéssel megtenni. A nagymértékben lecsökkent rotációs mozgás jelentős javulást eredményez a roboton elhelyezett szenzorok mérésében. A nyomatékok közötti különbség minimalizálásával a motorok egyenletesebb terhelésnek vannak kitéve.

A későbbiekben, ha a robot felhasználása szempontjából valamely objektív nagyobb prioritást kap a többihez képest, akkor a kiválasztott objektív eredményeit a hozzá tartozó súlyzó paraméter állításával lehet tovább javítani.

A robot új szerkezeti felépítése a 27. ábrán látható.



27. ábra - A robot szerkezeti felépítése a két-lépéses optimalizálás után.

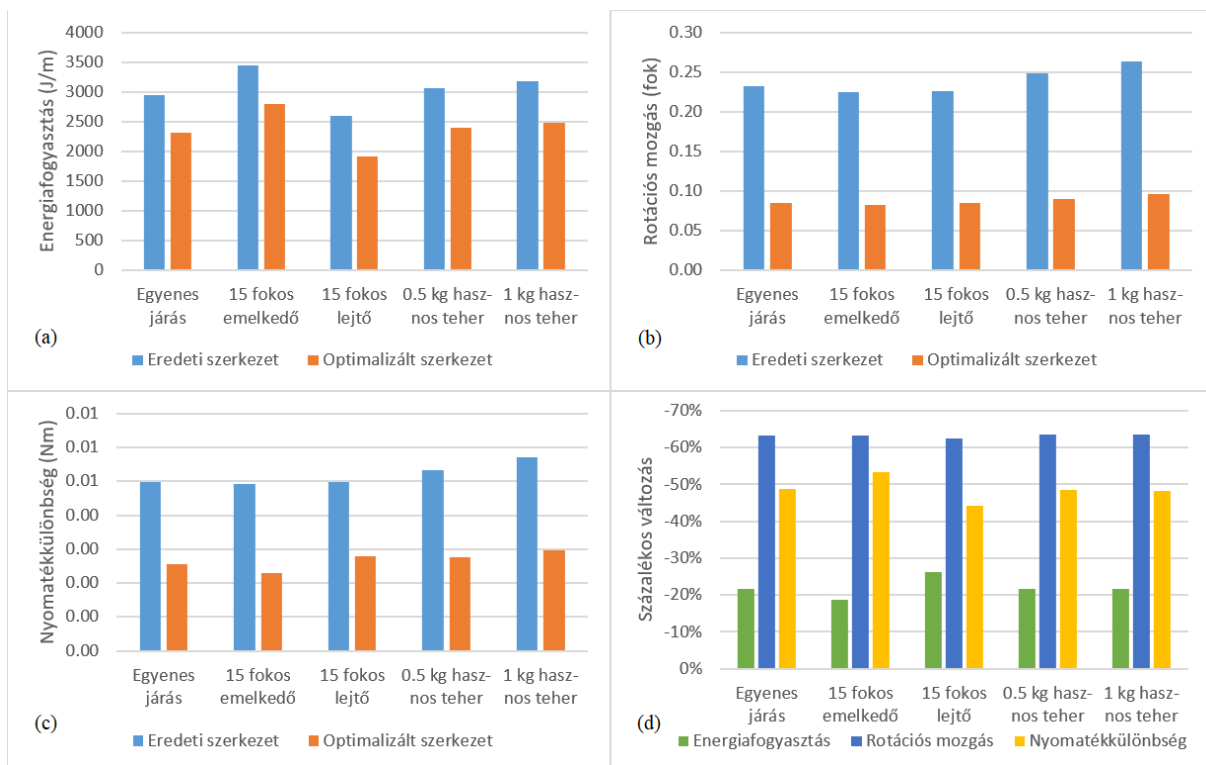
A számadatokban és az ábrán jól láthatók a következő logikus következmények:

- A belső lábak Y tengely menti csatlakozási pontjai távolabb kerültek a testtől a külső lábaké pedig közelebb. Ez az egységesebb eloszlás a robot súlypontja körül növeli a stabilitást.
- A külső talpak pályái eltávolodtak a test középpontjától az X haladási irány mentén, míg a belső talpak pályája minimálisan változott. Ezáltal a robot nagyobbat tud lépni, valamint a földdel érintkező talpak nagyobb felületet tudnak lefedni, ami szintén javítja a stabilitást.
- A lábpálya hossza is a maximálisan megengedett értékhez közeli értéket vett fel, mely a lépés nagyságát határozza meg. A nagyobb lépések pedig csökkentik az energiaigényt.
- A talp rugózása is a maximális értékhez közelít. Ez ugyan eredményezhet nagyfrekvenciás vibrációkat, de jelentősen csökkentheti az alacsonyabb frekvenciájú, de nagyobb amplitúdójú imbolygást.
- Az elektronika súlypontjának változása az eredeti, középső helyzethez képest elenyésző. Ez a test geometriai középpontja körüli (ebben a pontban történik a test rotációs mozgásának mérése) egyenletes tömegeloszlást segíti.

4.5.6 Az optimalizáció verifikálása független tesztkörnyezetekkel

Az optimalizálási eljárás általánosságának és robusztusságának igazolására a két-lépéses optimalizálással kapott szerkezeti paramétereket négy független szimulációs tesztkörnyezetben is kiértékeltem. A választás a következő tesztkörnyezetekre esett: 15 fokos emelkedő, 15 fokos lejtő, 0,5 kg-os hasznos teher és 1,0 kg-os hasznos teher.

Az új tesztkörnyezetekkel produkált teljesítmény eredmények a 28. ábrán, illetve konkrét számadatok formájában a 18. táblázatban láthatók (az egyértelmű összehasonlítás érdekében az objektív függvények nincsenek normalizálva).



28. ábra - A független tesztkörnyezetek teljesítmény eredményei.

a) Energiafogyasztás. b) Rotációs mozgás. c) Nyomatékkülönbség. (d) Százalékos változás.

Az objektív függvények értékei minden új scenárió esetén jelentősen javultak; a százalékos változások a multi-szenárió optimalizáláshoz hasonló értékeket mutatnak (17. táblázat). Ezek az eredmények igazolják a két-lépéses optimalizációval meghatározott szerkezeti paraméterek általánosságát.

	Objektív függvény	15 fokos emelkedő	15 fokos lejtő	0.5 kg hasznos teher	1 kg hasznos teher
Eredeti szerkezet	Energiafogyasztás	3453	2606	3065	3176
	Rotációs mozgás	0,2255	0,2267	0,2485	0,2641
	Nyomatékkülönbség	0,4930	0,4974	0,5342	0,5714
Optimalizált szerkezet	Energiafogyasztás	2806	1921	2399	2484
	Rotációs mozgás	0,0825	0,0854	0,0909	0,0962
	Nyomatékkülönbség	0,2300	0,2782	0,2755	0,2961
Százalékos változás	Energiafogyasztás	-18,76%	-26,29%	-21,72%	-21,78%
	Rotációs mozgás	-63,39%	-62,32%	-63,44%	-63,58%
	Nyomatékkülönbség	-53,36%	-44,07%	-48,42%	-48,18%

18. táblázat – A független tesztkörnyezetek teljesítmény eredményei.

Az energiafogyasztásra vonatkozó eredmények valamivel nagyobb javulást mutattak lejtőn, ahol kevesebb energiát igényel a robot járása, a nyomatékkülönbségre vonatkozó eredmények pedig valamivel jobb eredményt mutattak emelkedőn, ahol nagyobb terhelések jelentkeznek. A rotációs mozgás minősége minden esetben hasonló.

Ezekből az eredményekből azt a következtetést lehet levonni, hogy az optimalizálási folyamat során kapott paraméterekkel egy általánosan jobb robotszerkezet jött létre.

4.6 Eredmények

Kidolgoztam egy új optimalizálási módszert, melynek eredményeit a Szabad(ka) robotok következő generációjába tartozó Szabad(ka)-III robot megépítésénél fogom alkalmazni. A módszer kifejlesztéséhez létrehozott dinamikus robot modell a Szabad(ka)-II robot validált modelljén alapul.

Részletesen elemeztem a szerkezeti optimalizálás céljait, paramétereit és tesztkörnyezeteit. Szabad(ka)-III optimalizálásának céljai az energiafogyasztás, a test nem kívánt mozgásának és a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálása, valamint a sebesség és mozgékonyág megtartása voltak. A folyamat a robot geometriai szerkezetének, rugózásának és járásalgorithmusának a paramétereit határozta meg. Tesztkörnyezetnek három scenáriót választottam ki: egyeneses talaj, 30 fokos lejtő, illetve 30 fokos emelkedő. Mindegyik scenárió esetén csúszásmentes lábkontaktus, akadálymentes talaj és ripple járásmód lett használva.

Az optimalizálást először egy lépésben valósítottam meg, melynek során a robot összes paraméterét egyszerre optimalizáltam. A folyamat során feltűnt, hogy az eredményként kapott fitness értékek, ugyan hasonlóan alacsony értékűek, de a paraméterek szórnak. A probléma megoldásának és az optimalizálás felgyorsításának érdekében kidolgoztam egy új, több-lépéses optimalizációs eljárást. Ennek az optimalizációs eljárásnak a célja, hogy nagyobb paraméterszámú problémák esetén, kevés iteráció számmal is megfelelő eredményeket produkáljon. Az eljárás alapja az optimalizációs paraméterek csoportosítása és az optimalizáció több lépésben történő megvalósítása, ahol a paraméterek csoportosítása a paraméterek hozzájáruló faktora alapján történik. A hozzájáruló faktor becslése a [47]-ben bevezetett konvergencia ráta alapján történik.

A Szabad(ka)-III robot szerkezeti paramétereinek meghatározásához használt, két-lépéses optimalizáció eredményeképp, az energiafogyasztás objektív függvény, a rotációs mozgás objektív függvény és a nyomatékkülönbség objektív függvény értékei rendre 22,16, 61,83 és 49,13 százalékkal csökkentek. Ezek következtében jelentősen megnőtt a robot hatótávolsága, és lecsökkent a szenzorok méréseit negatívan befolyásoló rázkódás, a motorok pedig egyenletesebb terhelésnek vannak kitéve.

Az optimalizálással kapott paramétereket független szimulációs tesztkörnyezetekben is kiértékeltem. A teljesítmény eredmények minden új tesztkörnyezetben a multi-szenárió optimalizáció objektív értékeihez hasonló, jó értékeket mutattak, ami a két-lépéses optimalizációval meghatározott szerkezeti paraméterek általánosságát és robusztusságát igazolja.

A kidolgozott eljárások segítségével az optimalizációt könnyen meg lehet ismételni, ha megváltoznak az elvárt paraméterek (pl. az akkumulátor mérete, a hasznos teher vagy a robot befoglaló méretei) vagy scenáriók (pl. a járásalgoritmus vagy a talaj csúszása). A moduláris láb és test felépítésnek köszönve pedig a fizikai robotot is viszonylag könnyen lehet modifikálni az új eredmények függvényében.

A sikeresen elvégzett optimalizáció után, a fejlesztés következő lépése a robot fizikai megépítése és a kiválasztott morfológia igazolása. A kutatás további lépései pedig a szerkezetet érő káros behatások minimalizálásával, valamint a robot leesése esetén jelentkező erőbehatásokkal fognak foglalkozni.

4.7 4. téziscsoport

4.1 tézis

Kidolgoztam egy új optimalizálási eljárást járó robotok szerkezeti paramétereinek meghatározására. Definiáltam az optimalizálás lehetséges céljait, paramétereit és tesztkörnyezeteit. A módszer helytállóságának igazolásaképpen meghatároztam a Szabad(ka)-III robot geometriai szerkezetének, rugózásának és járásalgorithmusának paramétereit. Az optimalizálás céljai az energiafogyasztás, a test nem kívánt mozgásának és a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálása, valamint a sebesség és mozgékonyág megtartása voltak.

Tézisekhez kapcsolódó saját publikációk: [77], [105], [106].

4.2 tézis

Kifejlesztettem egy több-lépéses optimalizációs eljárást, mely nagyobb paraméterszámú problémák esetén, kevés iteráció számmal is megfelelő eredményeket produkál. Ennek elsődleges célja az optimalizálási folyamat felgyorsítása és az eredményként kapott paraméterek szórásának csökkentése. A paraméterek csoportosítása a paramétereket jellemző konvergencia ráta alapján történik. Az új, két-lépéses eljárással végzett optimalizáció használatával, az objektív függvény értékek jelentősen lecsökkentek.

A két-lépéses eljárással kapott paramétereket független szimulációs tesztkörnyezetekben is kiértékeltem. A teljesítmény eredmények minden új tesztkörnyezetben a multi-szenárió optimalizáció objektív értékeihez hasonló, jó értékeket mutattak. Ezek az eredmények igazolják a két-lépéses optimalizációval meghatározott szerkezeti paraméterek általánosságát és robusztusságát.

Tézisekhez kapcsolódó saját publikáció: [77].

Összegzés (tézisek)

Kutatásom célja egy olyan hatlábú járó robot megalkotása volt, mely egy optimalizált, vagyis jobb, előnyösebb test- és lábszerkezettel rendelkezik. Ehhez első lépésben szükséges volt a meglévő fizikai robot részletes modellezése, validálása és az ismeretlen elektromechanikai események elemzése és megértése. Miután kifejlesztettem a validált modell létrehozásához és a további modellek megépítéséhez szükséges modellezési eszközöket és eljárásokat, sor került a szerkezeti és geometriai optimalizálására, ami magában foglalta a lábak és a test elemeinek (motor, reduktor, szegmensek) kiválasztását és méretezését. A megszerzett tudás alapján megterveztem egy új, optimalizált szerkezettel rendelkező hexapod járó robotot.

Modellezés

A kutatás folyamán elkészült Szabad(ka)-II és Szabad(ka)-III részletes dinamikus modellje. Az első modell a validálási eljárások kidolgozását szolgálta, míg a második, paramétereizhető modell célja a szerkezeti optimalizálás elvégzése volt. Mindkét modell részletesen leírja a robot mechanikai, elektronikai és vezérlő/szabályozó elemeit. A modell a Simscape Multibody szoftver segítségével készült, ami jelentős előnyöket biztosított a modell megépítése folyamán. A szerkezet átláthatóbbá vált a klasszikus leírásokhoz képest és tapasztalataim alapján a Simscape Multibody gyorsabban futott, mint a klasszikus modellek.

Validálás

A Szabad(ka)-II robot modellből kapott eredmények (csukló motoráramok) kezdetben jelentősen eltértek a valós rendszer mérési eredményeitől. A validálás során azonosítottam az eltérések fő okait, és az ezekből eredő hibák jelentősen lecsökkentek. Kifejlesztettem egy új módszert a csukló súrlódás, reduktor önzárás és fogaskerék holtjáték modellezésére egy komplex nemlineáris robotstruktúrában. Az elektromechanikai jelenségek paramétereinek meghatározását egy optimalizációs eljárással végeztem. Az optimalizálás során, ahogy a modellt lépésről lépésre bővíttem az említett jelenségeket modellező elemekkel, az eredmények folyamatosan javultak. A validálást megelőzően a három csukló teljesítménymutatói (MAE/M) 54,0% (1. csukló), 65,0% (2. csukló) és 49,7% (3. csukló) voltak. A validálás után ezek az értékek rendre 12,6%, 18,9% és 10,3%-ra csökkentek.

Szerkezeti optimalizáció

A Szerkezeti optimalizáció a lábszegmensek méreteit és elhelyezkedéseit, a test méreteit, és a talpak pozícióit határozta meg. Az optimalizálás céljai az energiafogyasztás, a test nem kívánt

mozgásának és a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálása, valamint a sebesség és mozgékonyág megtartása voltak. A kutatás során elemeztem a paraméterek és a célok nagyobb halmazát is, és ezekből emeltem ki a számomra releváns elemeket. A tesztkörnyezetek (szcenárió) közül vízszintes talajon, illetve 30 fokos lejtőn és 30 fokos emelkedőn végeztem el az optimalizálást. A paraméterek optimalizálását először egy lépésben valósítottam meg. A folyamat során feltűnt, hogy az eredményként kapott fitness értékek, ugyan hasonlóan alacsony értékűek, de a paraméterek szórnak. A probléma megoldásának és az optimalizálás felgyorsításának érdekében kidolgoztam egy új, több-lépéses optimalizációs eljárást melynek a célja, hogy nagyobb paraméterszámú problémák esetén, kevés iteráció számmal is megfelelő eredményeket produkáljon. A Szabad(ka)-III robot szerkezeti paramétereinek meghatározásához használt, két-lépéses optimalizáció eredményeképp, az energiafogyasztás objektív függvény, a rotációs mozgás objektív függvény és a nyomatékkülönbség objektív függvény értékei rendre 22,16, 61,83 és 49,13 százalékkal csökkentek. Ezek következtében jelentősen megnőtt a robot hatótávolsága, és lecsökkent a szenzorok méréseit negatívan befolyásoló rázkódás, a motorok pedig egyenletesebb terhelésnek vannak kitéve. Az optimalizálással kapott paramétereket független szimulációs tesztkörnyezetekben is kiértékeltem. A teljesítmény eredmények minden új tesztkörnyezetben a multi-szenárió optimalizáció objektív értékeihez hasonló, jó értékeket mutattak, ami a két-lépéses optimalizációval meghatározott szerkezeti paraméterek általánosságát és robusztusságát igazolja.

A Szabad(ka)-I, Szabad(ka)-II és Szabad(ka)-III, robotok fejlesztése során, fokozatosan fejlődött a szerkezetek elektronikai, mechanikai és szoftveres rendszere is és Szabad(ka)-III robottal létrejött egy validált modellel megalapozott, optimalizált szerkezettel rendelkező, korszerű mechatronikai elemekkel felépített hatlábú járó robot.

A kutatás eredményei négy tétiscsoportban foglalhatók össze:

1. tézis

Létrehoztam egy hatlábú járó robot dinamikus modelljét, mely az irodalomban fellelt megoldásokhoz képest részletesebb kidolgozottsággal rendelkezik. A modell az elektronikai, mechanikai és vezérlési elemeken felül képes kezelni a későbbi validálás során felfedezett, nem ideális mechanikai jelenségeket is, valamint megfelelő szimulált mérési adatokat szolgáltat a validálás elvégzéséhez.

A modell alapját az általam tervezett és megépített, elektromechanikailag továbbfejlesztett Szabad(ka)-II robot képezte. A fejlesztés során megvalósított, vezérléshez tartozó algoritmusokat (mozgásalgoritmus, inverz kinematika és szabályozó) a dinamikus modell mellett a valós robot beágyazott rendszerében is implementáltam.

Tézishez kapcsolódó saját publikációk: [18], [53], [43].

2. téziscsoport

2.1 tézis:

Kidolgoztam egy eljárást járó robotszerkezetek dinamikus szimulációs modelljének validálására. A validált modell megfelelő pontosságot ad mérnöki fejlesztések elvégzésére. Az eljárás magában foglalja a robotokon alkalmazott hajtáselemek modellezését és a modellparaméterek identifikációját. A validálási folyamat lényegi részét a nem ideális mechanikai jelenségek feltárása, illetve azok paramétereinek meghatározása jelentette. A szimulációs eredmények kiértékeléséhez a következő fitnessz függvényt vezettem be:

$$\text{MAE}/M = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_{real,i} - I_{sim,i}|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{real,i}},$$

ahol $I_{real,i}$ a valós robot áramfelvételét, $I_{sim,i}$ a szimulációban mért áramfelvételt, N pedig a vizsgált időtartam alatt elvégzett mintavételezések számát jelöli.

A módszer helytállóságát a Szabad(ka)-II. robot dinamikus modelljének validálásán keresztül igazoltam.

Tézishez kapcsolódó saját publikáció: [53].

2.2 tézis:

A validálási folyamat során azonosítottam a kezdeti nagyobb eltérések fő okait. Megmutattam, hogy a súrlódás, az önzárás és a holtjáték között nincs jelentős kölcsönhatás, a jelenségek által okozott áramhullámforma-eltérések időben elkülöníthetők és külön-külön vizsgálhatók. A validálás során, ahogy a modellt lépésről lépésre továbbfejlesztettem a súrlódás, az önzárás és a holtjáték szimulálása érdekében, az eredmények folyamatosan javultak.

Tézishez kapcsolódó saját publikáció: [53].

3. tézis

Az irodalomban fellelt megoldások elemzése és továbbfejlesztése, valamint a korábban elvégzett robotikai kutatás és fejlesztés során szerzett tapasztalat alapján meghatároztam egy újszerű robotláb megfelelő kinematikai és mechanikai kialakítását. A láb mozgatásához kifejlesztettem egy differenciális meghajtót, ami csökkenti a tömeget és energiafelhasználást, növeli a stabilitást, valamint egyszerűbb kinematikai felépítést és mechanikai megvalósítást eredményez. A talajérintkezés megvalósítására egy hármas rugó-csillapító rendszert implementáltam a láb alsó szegmensébe.

Az eredményeket felhasználva megterveztem és megépítettem a Szabad(ka)-III robot működő láb prototípusát. Az új prototípus jelentős továbbfejlesztést jelent az előző robotlábhoz képest.

Tézisekhez kapcsolódó saját publikációk: [77], [78].

4. téziscsoport

4.1 tézis:

Kidolgoztam egy új optimalizálási eljárást járó robotok szerkezeti paramétereinek meghatározására. Definiáltam az optimalizálás lehetséges céljait, paramétereit és tesztkörnyezeteit. A módszer helyállóságának igazolásaképpen meghatároztam a Szabad(ka)-III robot geometriai szerkezetének, rugózásának és járásalgorithmusának paramétereit. Az optimalizálás céljai az energiafogyasztás, a test nem kívánt mozgásának és a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálása, valamint a sebesség és mozgékonyág megtartása voltak.

Tézisekhez kapcsolódó saját publikációk: [77], [105], [106].

4.2 tézis:

Kifejlesztettem egy több-lépéses optimalizációs eljárást, mely nagyobb paraméterszámú problémák esetén, kevés iteráció számmal is megfelelő eredményeket produkál. Ennek elsődleges célja az optimalizálási folyamat felgyorsítása és az eredményként kapott paraméterek szórásának csökkentése. A paraméterek csoportosítása a paramétereket jellemző konvergencia ráta alapján történik. Az új, két-lépéses eljárással végzett optimalizáció használatával, az objektív függvény értékek jelentősen lecsökkentek.

A két-lépéses eljárással kapott paramétereket független szimulációs tesztkörnyezetekben is kiértékeltem. A teljesítmény eredmények minden új tesztkörnyezetben a multi-szenárió optimalizáció objektív értékeihez hasonló, jó értékeket mutattak. Ezek az eredmények igazolják a két-lépéses optimalizációval meghatározott szerkezeti paraméterek általánosságát és robusztusságát.

Tézisekhez kapcsolódó saját publikáció: [77].

Irodalmi hivatkozások listája

- [1] I. Kecskés, E. Burkus, F. Bazsó and P. Odry, "Model validation of a hexapod walker robot," *Robotica*, vol. 35, no. 2, pp. 419-462, 2017.
- [2] D. C. Kar, "Design of Statically Stable Walking Robot: A Review," *Journal of Robotic Systems*, vol. 20, no. 11, pp. 671-686, 2003.
- [3] M. F. Silva and J. A. T. Machado, "A Historical Perspective of Legged Robots," *Journal of Vibration and Control*, vol. 13, no. 9-10, pp. 1447-1486, 2007.
- [4] M. F. Silva and J. A. T. Machado, "A literature review on the optimization of legged robots," *Journal of Vibration and Control*, vol. 18, no. 12, pp. 1753-1767, 2011.
- [5] J. J. Collins and I. N. Stewart, "Coupled nonlinear oscillators and the symmetries of animal gaits," *Journal of Nonlinear Science*, vol. 3, no. 1, pp. 349-392, 1993.
- [6] R. D. C. Campos, Hexapod Locomotion: A Nonlinear Dynamical Systems Approach, University of Minho, School of Engineering, 2010.
- [7] E. Celaya and J. L. Albarral, "Implementation of a hierarchical walk controller for the LAURON III hexapod robot," in *CLAWAR 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*, 2003.
- [8] T. Zielinska and J. Heng, "Development of a walking machine: Mechanical design and control problems," *Mechatronics*, vol. 12, no. 5, pp. 737-754, 2002.
- [9] F. Delcomyn and M. E. Nelson, "Architectures for a biomimetic hexapod robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 5-15, 2000.
- [10] M. R. Fielding, R. Dunlop and C. J. Damaren, "Hamlet: force/position controlled hexapod walker - design and systems," in *IEEE International Conference on Control Applications*, Mexico, 2001.
- [11] U. Saranlı, M. Buehler and D. E. Koditschek, "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 7, pp. 616-631, 2001.
- [12] J. G. Cham, S. A. Bailey, J. E. Clark, R. J. Full and M. Cutkosky, "Fast and Robust: Hexapedal Robots via Shape Deposition Manufacturing," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 10, pp. 869-882, 2002.
- [13] B. Kennedy, H. Aghazarian, Y. Cheng, M. Garrett, T. Hutsberger, L. Magnone, A. Okon and M. Robinson, "Limbed Excursion Mechanical Utility Rover: LEMUR II," in *53rd International Astronautical Congress*, Houston, 2002.

- [14] R. D. Quinn, G. M. Nelson, R. J. Bachmann, D. A. Kingsley, J. T. Offi, T. J. Allen and R. E. Ritzmann, "Parallel Complementary Strategies for Implementing Biological Principles into Mobile Robots," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 22, no. 3-4, pp. 169-186, 2003.
- [15] A. Roennau, T. Kerscher and R. Dillmann, "Design and kinematics of a biologically-inspired leg for a six-legged walking machine," in *3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, Tokyo, 2010.
- [16] J. M. Porta and E. Celaya, "Reactive free-gait generation to follow arbitrary trajectories with a hexapod robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 47, no. 4, pp. 187-201, 2004.
- [17] W. A. Lewinger, M. S. Branicky and R. D. Quinn, "Insect-Inspired, Actively Compliant Hexapod Capable of Object Manipulation," in *CLAWAR 2005 8th International Conference on Climbing and Walking*, 2005.
- [18] E. Burkus and P. Odry, "Autonomous Hexapod Walker Robot "Szabad(ka)"", *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 5, no. 1, pp. 69-85, 2008.
- [19] P. Arena, L. Fortuna, M. Frasca, L. Patanè and M. Pavone, "Implementation and experimental validation of an autonomous hexapod robot," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Greece, 2006.
- [20] K. K. Hauser, T. Bretl, J.-C. Latombe and B. Wilcox, "Motion Planning for a Six-Legged Lunar Robot," in *7th International Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, New York, 2006.
- [21] S. Dzhantimirov, F. Palis, U. Schmucker, A. Telesh and Y. Zavgorodniy, "HIL/SIL by Development of Six-legged Robot SLAIR2," in *10th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR)*, Singapore, 2007.
- [22] P. Gonzalez-de-Santos, J. A. Cobano, E. Garcia, J. Estremera and M. A. Armada, "A six-legged robot-based system for humanitarian demining missions," *Mechatronics*, vol. 17, no. 8, pp. 417-430, 2007.
- [23] M. Konyev, F. Palls, Y. Zavgorodniy, A. Melnikov, A. Rudskiy, A. Telesh, U. Schmucker and V. Rusin, "Walking Robot "ANTON": Design, Simulation, Experiments," in *11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Coimbra, 2008.
- [24] O. Janrathitikarn and L. N. Long, "Gait Control of a Six-Legged Robot on Unlevel Terrain Using a Cognitive Architecture," in *IEEE Aerospace Conference*, Montana, 2008 .
- [25] G. Carbone and M. Ceccarelli, "A Low-Cost Easy-Operation Hexapod Walking Machine," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 161-166, 2008.

- [26] H. Ohroku and K. Nonami, "Omnidirectional Vision and 3D Animation Based Teleoperation of Hydraulically Actuated Hexapod Robot COMET-IV," *Transaction of the Japan Fluid Power System Society*, vol. 40, no. 6, pp. 117-124, 2009.
- [27] S. Bartsch, T. Birnschein, M. Rommermann, J. Hilljegerdes and D. Kuhn, "Development of the Six-Legged Walking and Climbing Robot SpaceClimber," *Journal of Field Robotics*, vol. 29, no. 3, pp. 506-532, 2012.
- [28] A. Schneider, J. Paskarbeit, M. Schäffersmann and J. Schmitz, "Biomechanics for Embodied Intelligence of an Insectoid Robot," in *ICIRA 4th International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Aachen, 2011.
- [29] J. Zhao, H. Zhang, Y. Liu, J. Yan, X. Zang and Z. Zhou, "Development of the Hexapod Robot HITCR-II for Walking on Unstructured Terrain," in *International Conference on Mechatronics and Automation*, Chengdu, 2012.
- [30] R. Hodoshima, S. Watanabe, Y. Nishiyama, A. Sakaki, Y. Ohura and S. Kotosaka, "Development of ASURA I: Harvestman-like hexapod walking robot — Approach for long-legged robot and leg mechanism design," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, 2013.
- [31] A. Roennau, G. Heppner, M. Nowicki and R. Dillmann, "LAURON V: A Versatile Six-Legged Walking Robot with Advanced Maneuverability," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Besançon, 2014.
- [32] J. Dupeyroux, J. Serres and S. Viollet, "A Hexapod Walking Robot Mimicking Navigation Strategies of Desert Ants *Cataglyphis*," in *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems. Living Machines*, Paris, 2018.
- [33] P. Čížek, M. Zoula and J. Faigl, "Design, Construction, and Rough-Terrain Locomotion Control of Novel Hexapod Walking Robot With Four Degrees of Freedom Per Leg," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 17866-17881, 2021.
- [34] S. A. Bailey, Biomimetic Control with a Feedback coupled Nonlinear Oscillator: Insect Experiments, Design Tools, and Hexapedal Robot Adaptation Results - Ph.D. Thesis, Stanford University, 2004.
- [35] T. Bräunl, "Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems," in *Embedded Robotics*, Berlin, Springer, 2008.
- [36] A. Shkolnik, M. Levashov, I. R. Manchester and R. Tedrake, "Bounding on rough terrain with the LittleDog robot," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 30, no. 2, pp. 192-215, 2011.
- [37] U. Asif and I. Javaid, "An approach to stable walking over uneven terrain using a reflex-based adaptive gait," *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2011, no. 4, pp. 1-13, 2011.

- [38] D. Grzelczyk, B. Stanczyk and J. Awrejcewicz, "Kinematics, Dynamics and Power Consumption Analysis of the Hexapod Robot During Walking with Tripod Gait," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 17, no. 5, p. 1740010, 2017.
- [39] V. L. Popov, *Contact Mechanics and Friction - Physical Principles and Applications*, DOI 10.1007/978-3-642-10803-7: Springer, 2010.
- [40] H. Olsson, K. J. Åström, C. Canudas de Wit, M. Gäfvert and P. Lischinsky, "Friction Models and Friction Compensation," *European Journal of Control*, vol. 4, no. 3, pp. 176-195, 1998.
- [41] N. Mostaghel and T. Davis, "Representations of Coulomb Friction for Dynamic Analysis," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 26, pp. 541-548, 1997.
- [42] M. H. P. Dekker, *Mechanical design of a humanoid robot's lower body, Improved walking and posture dynamics - Master's thesis*, Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2010.
- [43] E. Burkus and P. Odry, "Implementation of 3D Ground Contact Model for Uneven Ground Using SimMechanics," in *IEEE 12th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, Subotica, 2014.
- [44] MathWorks, "Simscape Multibody Contact Forces Library," The MathWorks, Inc., 2019. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47417-simscape-multibody-contact-forces-library>. [Accessed 2022].
- [45] I. Kecskés and P. Odry, "Full kinematic and dynamic modeling of "Szabad(ka)-Duna" Hexapod," in *IEEE 7th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, Subotica, 2009.
- [46] I. Kecskés and P. Odry, "Multi-Scenario Multi-Objective Optimization of a Fuzzy Motor Controller for the Szabad(ka)-II Hexapod Robot," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 15, no. 7, pp. 157-178, 2019.
- [47] I. Kecskés, L. Székács, J. C. Fodor and P. Odry, "PSO and GA optimization methods comparison on simulation model of a real hexapod robot," in *IEEE 9th International Conference on Computational Cybernetics (ICCC)*, Tihany, 2013.
- [48] I. Kecskés, Á. Odry, E. Burkus and P. Odry, "Embedding optimized trajectory and motor controller into the Szabad (ka)-II hexapod robot," in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Budapest, 2016.
- [49] I. Kecskés and P. Odry, "Optimization of PI and Fuzzy-PI Controllers on Simulation Model of Szabad(ka)-II Walking Robot," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 11, no. 11, pp. 1-13, 2014.

- [50] I. Kecskés, E. Burkus and P. Odry, "Gear efficiency modeling in a simulation model of a DC gearmotor," in *IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*, Budapest, 2018.
- [51] I. Kecskés, Á. Odry, V. Tadić and P. Odry, "Simultaneous calibration of a hexapod robot and an IMU sensor model based on raw measurements," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 13, pp. 14887-14898, 2021.
- [52] I. Kecskés and P. Odry, "Robust optimization of multi-scenario many-objective problems with auto-tuned utility function," *Engineering Optimization*, vol. 53, no. 7, pp. 1135-1155, 2021.
- [53] E. Burkus, J. Awrejcewicz and P. Odry, "A validation procedure to identify joint friction, reductor self-locking and gear backlash parameters," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 90, pp. 1625-1641, 2020.
- [54] L. Jianxun, F. Steven and M. Ou, "An extended bristle friction force model with experimental validation," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 56, pp. 123-137, 2012.
- [55] T. Piatkowski and M. Wolski, "Analysis of selected friction properties with the Froude pendulum as an example," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 119, pp. 37-50, 2018.
- [56] A. Diez-Ibarbia, A. Fernandez-del-Rincon, A. de-Juan, M. Iglesias, P. Garcia and F. Viadero, "Frictional power losses on spur gears with tip reliefs. The friction coefficient role," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 121, pp. 15-27, 2018.
- [57] C. Siyu, T. Jinyuan, L. Caiwang and W. Qibo, "Nonlinear dynamic characteristics of geared rotor bearing systems with dynamic backlash and friction," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 466-478, 2011.
- [58] E. Selçuk, "Trajectory optimization of a walking mechanism having revolute joints with clearance using ANFIS approach," *Nonlinear Dyn*, vol. 71, pp. 75-91, DOI 10.1007/s11071-012-0642-5, 2013.
- [59] O. Altuzarra, J. Aginaga and A. Hernánd, "Workspace analysis of positioning discontinuities due to clearances in parallel manipulators," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 46, pp. 577-592, 2011.
- [60] F. Mazzini and S. Dubowsky, "Experimental Validation of the Tactile Exploration by a Manipulator With Joint Backlash," *ASME. Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 4, no. 1, p. 011009, 2012.
- [61] M. Ruderman, F. Hoffmann and T. Bertram, "Modeling and Identification of Elastic Robot Joints With Hysteresis and Backlash," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 3840-3847, 2009.
- [62] N. Aphiratsakun and M. Parnichkun, "Balancing Control of AIT Leg Exoskeleton Using ZMP based FLC," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 6, no. 4, pp.

319-328, ISSN 1729-8806, 2009.

- [63] M. Slamani and I. Bonev, "Characterization and experimental evaluation of gear transmission errors in an industrial robot," *Industrial Robot*, vol. 40, no. 5, pp. 441-449, DOI 10.1108/IR-07-2012-387, 2013.
- [64] S. He, Q. Jia, G. Chen and H. Sun, "Modeling and Dynamic Analysis of Planetary Gear Transmission Joints with Backlash," *International Journal of Control and Automation*, vol. 8, no. 2, pp. 153-162, DOI 10.14257, 2015.
- [65] J. A. Cobano, J. Estremera and P. Gonzalez de Santos, "Accurate tracking of legged robots on natural terrain," *Autonomous Robots*, vol. 28, no. 2, pp. 231-244, DOI 10.1007/s10514-009-9165-4, 2010.
- [66] A. Gupta and M. K. O'Malley, "Design of a Haptic Arm Exoskeleton for Training and Rehabilitation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 11, no. 3, pp. 280-289, 2006.
- [67] H. Yue, Z. Wei, Q. Chen and X. Zhang, "Adaptive fuzzy dynamic surface tracking control for a class of nonlinear systems with unknown distributed time delays and backlash-like hysteresis," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, p. DOI: 10.1177/1729881417733886, 2017.
- [68] B. Brogliato, "Feedback control of multibody systems with joint clearance and dynamic backlash: a tutorial," *Multibody System Dynamics*, vol. 42, no. 1, pp. 283-315, DOI 10.1007/s11044-017-9585-4, 2018.
- [69] L. Marco and Giacomo Bianchi, "Self-locking analysis in closed kinematic chains," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 44, pp. 2038-2052, 2009.
- [70] MathWorks, "Rotational Friction," The MathWorks, Inc., [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/rotationalfriction.html>. [Accessed 2014].
- [71] R. S. David and J. M. D. Castillo, "Conditions for Self-Locking in Planetary Gear Trains," *Journal of Mechanical Design*, vol. 129, pp. 960-968, 2007.
- [72] MathWorks, "Rotational Hard Stop," The MathWorks, Inc., [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/rotationallhardstop.html>. [Accessed 2020].
- [73] MathWorks, "Torsional Spring-Damper," The MathWorks, Inc., [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sdl/ref/torsionalspringdamper.html>. [Accessed 2020].
- [74] E. Burkus, S. Bessenyei, Á. Odry, I. Kecskés and P. Odry, "Test Bench Built for the Identification of the Szabad(ka)-II Hexapod Robot Leg Prototypes," in *IEEE 14th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, Subotica, 2016.

- [75] H. Zhang, R. Wu, C. Li, X. Zang, X. Zhang, H. Jin and J. Zhao, "A Force-Sensing System on Legs for Biomimetic Hexapod Robots Interacting with Unstructured Terrain," *Sensors*, vol. 17, no. 7, pp. 1-29, 2017.
- [76] A. Roennau, G. Heppner, L. Pfotzer and R. Dillmann, "LAURON V: Optimized Leg Configuration for the Design of a Bio-Inspired Walking Robot," in *16th International Conference on Climbing and Walking Robots*, Sydney, 2013.
- [77] E. Burkus, Á. Odry, J. Awrejcewicz, I. Kecskés and P. Odry, "Mechanical Design and a Novel Structural Optimization Approach for Hexapod Walking Robots," *Machines*, vol. 10, no. 6, pp. 1-26, 2022.
- [78] E. Burkus, Á. Odry, I. Kecskés, V. Tadić and P. Odry, "A Novel Leg Design for the Szabad(ka) III Robot," in *IEEE 18th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, Subotica, 2020.
- [79] X. Ding and F. Yang, "Study on hexapod robot manipulation using legs," *Robotica*, vol. 34, no. 02, pp. 468-481, 2016.
- [80] D. Grzelczyk, B. Stańczyk and J. Awrejcewicz, "Power consumption analysis of different hexapod robot gaits," in *13th International Conference on Dynamical Systems: Theory and Applications*, Lodz, 2015.
- [81] A. Mahapatra, S. S. Roy and D. K. Pratihar, "Study on feet forces' distributions, energy consumption and dynamic stability measure of hexapod robot during crab walking," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 65, pp. 717-744, 2019.
- [82] G. Wang, L. Ding, H. Gao, Z. Deng, Z. Liu and H. Yu, "Minimizing the Energy Consumption for a Hexapod Robot Based on Optimal Force Distribution," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 5393-5406, 2019.
- [83] H. Rastgar, H. R. Naeimi and M. Agheli, "Characterization, validation, and stability analysis of maximized reachable workspace of radially symmetric hexapod machines," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 137, pp. 315-335, 2019.
- [84] H. Komatsu, G. Endo, R. Hodoshima, S. Hirose and E. F. Fukushima, "How to optimize the slope walking motion by the quadruped walking robot," *Advanced Robotics*, vol. 29, no. 23, pp. 1497-1509, 2015.
- [85] M. M. Gülhan and K. Erbatur, "Kinematic arrangement optimization of a quadruped robot with genetic algorithms," *Measurement and Control*, vol. 51, no. 9-10, pp. 406-416, 2018.
- [86] M. Rommerman, D. Kuhn and F. Kirchner, "Robot design for space missions using evolutionary computation," in *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Trondheim, 2009.
- [87] H. Zhang, Y. Liu, J. Zhao, J. Chen and J. Yan, "Development of a bionic hexapod robot for walking on unstructured terrain," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 11, no. 2, pp.

176-187, 2014.

- [88] R. R. Ma and A. M. Dollar, "On Dexterity and Dexterous Manipulation," in *15th International Conference on Advanced Robotics*, Tallinn, 2011.
- [89] Y. Liu, C. Wang, H. Zhang and J. Zhao, "Research on the Posture Control Method of Hexapod Robot for Rugged Terrain," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 19, p. 6725, 2020.
- [90] STMicroelectronics, "STM32F401 microcontroller," STMicroelectronics Co., [Online]. Available: https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-high-performance-mcus/stm32f4-series/stm32f401.html. [Accessed 01 10 2020].
- [91] I. Kecskés, E. Burkus, Z. Király, Á. Odry and P. Odry, "Competition of Motor Controllers Using a Simplified Robot Leg: PID vs Fuzzy Logic," in *Fourth International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI)*, Corfu, 2017.
- [92] M. Aruldoss, T. M. Lakshmi and V. P. Venkatesan, "A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications," *American Journal of Information Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 31-43, 2013.
- [93] J. Dombi and T. Jónás, "Weighted aggregation systems and an expectation level-based weighting and scoring procedure," *European Journal of Operational Research*, vol. 299, no. 2, pp. 580-588, 2022.
- [94] A. Kelemenis and D. Askounis, "A new TOPSIS-based multi-criteria approach to personnel selection," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 7, pp. 4999-5008, 2010.
- [95] M. Akram, F. Ilyas and H. Garg, "Multi-criteria group decision making based on ELECTRE I method in Pythagorean fuzzy information," *Soft Computing*, vol. 24, no. 5, pp. 3425-3453, 2020.
- [96] C.-H. Goh, Y.-C. A. Tung and C.-H. Cheng, "A revised weighted sum decision model for robot selection," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 30, no. 2, pp. 193-199, 1996.
- [97] M. Bjelonic, N. Kottege, T. Homberger, P. Borges, P. Beckerle and M. Chli, "Weaver: Hexapod robot for autonomous navigation on unstructured terrain," *Journal of Field Robotics*, vol. 35, no. 7, pp. 1063-1079, 2018.
- [98] S. Seok, A. Wang, M. Y. Chuah, D. Otten, J. Lang and S. Kim, "Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, 2013.
- [99] M. Karlsson and F. Hörnqvist, *Robot Condition Monitoring and Production Simulation*, Luleå: Luleå tekniska universitet, 2018.

- [100] P. Gierlak, K. Kurc and D. Szybicki, "Mobile crawler robot vibration analysis in the contexts of motion speed selection," *Journal of Vibroengineering*, vol. 19, no. 4, pp. 2403-2412, 2017.
- [101] Á. Odry, R. Fullér, I. J. Rudas and P. Odry, "Kalman filter for mobile-robot attitude estimation: Novel optimized and adaptive solutions," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 110, pp. 569-589, 2018.
- [102] J.-M. Yang and J.-H. Kim, "Fault-tolerant locomotion of the hexapod robot," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 28, no. 1, pp. 109-116, 1998.
- [103] J.-M. Yang, "Fault-Tolerant Gait Planning for a Hexapod Robot Walking over Rough Terrain," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 54, pp. 613-627, 2009.
- [104] R. Campos, V. Matos and C. Santos, "Hexapod Locomotion: A Nonlinear Dynamical Systems Approach," in *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Glendale, 2010.
- [105] E. Burkus, J. C. Fodor and P. Odry, "Structural and gait optimization of a hexapod robot with Particle Swarm Optimization," in *IEEE 11th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, Subotica, 2013.
- [106] E. Burkus and P. Odry, "Mechanical and walking optimization of a hexapod robot using PSO," in *IEEE 9th International Conference on Computational Cybernetics (ICCC)*, Tihany, 2013.

Rövidítésjegyzék

PSO	Particle Swarm Optimization
CAD	Computer-Aided Design
DOF	Degrees of Freedom
COG	Center of Gravity
CPG	Central Pattern Generator
PWM	Pulse Width Modulation
STL	STereoLithography
IMU	Inertial Measurement Unit
FLC	Fuzzy Logic Controller
FFT	Fast Fourier Transform
ADC	Analog-to-Digital Converter
PLA	Polylactic Acid
PID	Proportional Integral Derivative
CR	Convergence Rate
PLC	Programmable Logic Controller
DSC	Dynamic Surface Control
QP	Quadratic Programming
COT	Cost of Transport
RMS	Root Mean Square

Táblázatjegyzék

1. táblázat - Hatlábú robotok összehasonlítása.....	10
2. táblázat - A motorok és reduktorok mechanikai paramétereit.	18
3. táblázat - A motor elektromos jellemzői az adatlapban található adatokkal és a megfelelő Simscape Electronics jelölésekkel.	19
4. táblázat - A validálással meghatározott paraméterek három esetben: 1) csak a súrlódás hatásának figyelembevételével, 2) a súrlódás és az önzárás mechanizmusának figyelembevételével, 3) a súrlódás, az önzárás és a holtjáték hatásának figyelembevételével.	35
5. táblázat - A régi és az új láb mechanikai jellemzői.....	43
6. táblázat - A motorok és reduktorok mechanikai paramétereit.	44
7. táblázat - A motormeghajtó lap paramétereit.	47
8. táblázat - Szabad(ka)-III mechanikai jellemzői.	55
9. táblázat - A modell változtatható és rögzített paramétereit.	60
10. táblázat - A szimuláció által generált kimeneti változók.	61
11. táblázat - Az optimalizálás céljai.	68
12. táblázat - Az optimalizálandó paraméterek.	71
13. táblázat - A csökkentett számú optimalizálandó paraméterek.	73
14. táblázat - A fitness eredmények az optimalizálás előtt és után.....	78
15. táblázat - Az optimalizálás eredményei (paraméterek).	79
16. táblázat - Fitness eredmények és optimalizálási paraméterek az össz-paraméteres optimalizálás esetén; a két-lépéses optimalizálás első lépésében; és a két-lépéses optimalizálás második lépésében.....	85
17. táblázat - Az objektív eredmények az optimalizálás előtt és után.....	85
18. táblázat – A független tesztkörnyezetek teljesítmény eredményei.	88

Ábrajegyzék

1. ábra - Szabad(ka)-II hatlábú járó robot.	4
2. ábra - Szabad(ka)-II robot SolidWorks modellje.	5
3. ábra - Szabad(ka)-II robot Multibody modellje (mechanikai és a vezérlő alrendszerek). ...	11
4. ábra - Robotláb alrendszer (csuklók, lábszegmensek, motor-reduktor alrendszerek és talajérintkezés alrendszer).	12
5. ábra - Talajérintkezés és rugó-csillapító alrendszerek.	13
6. ábra - Az előjeles és a simított függvények görbéi.	15
7. ábra - A távolság változása a súrlódás függvényében.	15
8. ábra - Motor és reduktor alrendszer. A téglalapokkal bekeretezett súrlódás, enkóder és holtjáték részek a nem ideális mechanikai jelenségek modellezésének részét képezik.	18
9. ábra - A Joint2 csukló valós és szimulált szögpozíciói.	27
10. ábra - Valós és szimulált áramgörbék a validálás előtt. Az első három görbe a jobb első láb három csuklóját hajtó motorok áramait mutatja, míg a negyedik görbe a második csukló szögpozícióját mutatja.	28
11. ábra - Az áramhibák változása a validálás alatt (MAE/M): validálás előtt; a súrlódás hatásának validálása után; a súrlódás és az önzárás együttes validálása után; illetve a súrlódás, az önzárás és a holtjáték együttes validálása után.	34
12. ábra - A csuklók (Joint1, Joint2 és Joint3) áramgörbéi a validálás különböző fázisaiban: 1. oszlop: a súrlódási paraméterek validálása után, 2. oszlop: a súrlódási és önzárási paraméterek validálása után, 3. oszlop: a súrlódási, önzárási és holtjáték paraméterek validálása után.	35
13. ábra - (bal) 3 DOF-os robot, (jobb) 4 DOF-os robot.	42
14. ábra - (bal) Szabad(ka)-II régi láb kialakítása, (jobb) Szabad(ka)-III új láb kialakítása. ...	43
15. ábra - Az új láb differenciális meghajtó rendszere (a) metszet előlnézetben; (b) metszet oldalnézetben; és (c) metszet szög alatti nézetben.	45
16. ábra - A differenciális meghajtó rendszer prototípusa.	46
17. ábra - Az új lábszegmens (tibia) a hármas rugó-csillapító rendszerrel.	47
18. ábra - (bal) Motormeghajtó lap, (jobb) PC interfész.	47

19. ábra - Motormeghajtó sematikus rajza.	48
20. ábra - Szabad(ka)-III elektronikai rendszere.	56
21. ábra - A robot mechanikai elemei. Az előre megtervezett elemek világos szürke színűek, a változtatható paraméterű elemek pedig sötét szürkék.	58
22. ábra - Szabad(ka)-III robot Multibody modellje.	59
23. ábra - a) A lápárok elhelyezése a testen az X és Z tengelyek mentén. b) A tibia és a femur szegmens hossza. c) A lábpárok közötti távolság egy lábpáron belül. d) A súlypont elhelyezése az X és Z tengelyek mentén.	71
24. ábra - A robot szerkezeti felépítése a) a kombinált tesztkörnyezetre optimalizált paraméterekkel; b) a vízszintes talajra optimalizált paraméterekkel; c) a 30 fokos lejtőre optimalizált paraméterekkel; d) a 30 fokos emelkedőre optimalizált paraméterekkel.....	79
25. ábra - A nyomatékok a) az optimalizálás előtt; b) az optimalizálás után; illetve c) hasznos teherrel.....	82
26. ábra - A több-lépéses optimalizáció folyamatábrája.	84
27. ábra - A robot szerkezeti felépítése a két-lépéses optimalizálás után.	87
28. ábra - A független tesztkörnyezetek teljesítmény eredményei. a) Energiafogyasztás. b) Rotációs mozgás. c) Nyomatékkülönbségek. (d) Százalékos változás.	88