

# Óbudai Egyetem

Doktori (PhD) értekezés  
tézisfüzete



**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.**

## **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.

## I. A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI

A mobil robotok kutatása folyamatosan bővülő tudományterület, melynek potenciálja szüntelenül növekszik. Ennek megfelelően a kutatók is egyre nagyobb érdeklődést mutatnak a különféle mobil eszközök fejlesztése iránt. A mobil robotok esetén legtöbbször kerekes vagy mászó-járó robotokról 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 akadályokon is át tudnak haladni [Fielding, Dunlop, & Damaren, 2001], [Silva & Machado, 2011]. A komplexitásból eredő hátrányok leküzdése azonban nagy kihívást jelent és a megfelelő szerkezet meghatározásához gyakran optimalizációs eljárásokat alkalmaznak [9].

A járó robotok fentebb említett fontossága és a tématerület kiaknázatlan lehetőségei miatt választottam célul a Szabad(ka) hexapod robotok kutatását és fejlesztését. Doktori munkám megkezdése előtt megterveztem és megépítettem a Szabad(ka)-I hexapod járó robotot. Ez egy fémszerkezetű, szervó motorokat és bolygóműves reduktorokat használó hatlábú, lábanként három szabadságfokkal rendelkező járó robot [1]. A fejlesztése során kidolgoztam a mechanikai-, elektronikai- és beágyazott rendszerek tervezéséhez szükséges technológiákat. A robot azonban viszonylag kezdetleges szerkezet volt, nem rendelkezett a megfelelő pontossággal, hogy elvégezhessem rajta a további lépésekhez szükséges méréseket.

Doktori kutatásom célja a Szabad(ka)-I robot továbbfejlesztése volt, mely magában foglalta az elektromechanikai és szerkezeti megoldások kivizsgálását, a robot modellezését és a modell validálását, valamint egy új, optimalizált robotszerkezet megalkotását.

Az általánosan elterjedt megoldásokon túl, több hexapod robot fejlesztése során alkalmaztak specifikus elektromechanikai és szerkezeti megoldásokat. Ezek közül érdemes a következő, komolyabb mechanikai kialakítással rendelkező robotokat kiemelni: Hamlet [Fielding, Dunlop, & Damaren, 2001], LAVA [Zielinska & Heng, 2002], SILO6 [Gonzalez-de-Santos, Cobano, Garcia, Estremera, & Armada, 2007], LEMUR II [Kennedy, és mtsai., 2002], ANTON [Konyev, és mtsai., 2008], SpaceClimber [Bartsch, Birnschein, Rommermann, Hilljegerdes, & Kuhn, 2012], HITCR-II [Liu, Wang, Zhang, & Zhao, 2020]). Kutatásom egyik célja ezeknek és az ehhez hasonló megoldásoknak a kivizsgálása és továbbfejlesztése volt.

A következő lépésben megalkotott Szabad(ka)-II robot modellezése és validálása során felfedeztem néhány összetett mechanikai jelenséget, melyek a valós robot nem ideális mivoltából erednek. Ezekkel több irodalom is foglalkozik. A súrlódás [Jianxun, Steven, & Ou,

2012], [Diez-Ibarbia, és mtsai., 2018], a reduktor önzárás [Marco & Giacomo Bianchi, 2009] és a holtjáték [Siyu, Jinyuan, Caiwang, & Qibo, 2011], [Altuzarra, Aginaga, & Hernánd, 2011] hatásai azonban általában külön kerülnek tárgyalásra. A robot modell validálása során szükséges volt eme jelenségek pontos meghatározása és a modellbe történő implementálása, hogy minimalizálni lehessen a valós robot és a modell közötti különbségeket.

Számos tanulmány foglalkozik járó robotok szerkezeti optimalizálásával is. A [Silva & Machado, 2011] publikációban a járó robotok szerkezeti és járás optimalizálására alkalmazott különböző módszerek szakirodalma kerül összegzésre. Több cikk foglalkozik a robotok energiafogyasztásával [Ding & Yang, 2016], [Grzelczyk, Stańczyk, & Awrejcewicz, 2015], [2], vagy például a robotok munkaterének kivizsgálásával [Ding & Yang, 2016], [Wang, és mtsai., 2019], [Rastgar, Naeimi, & Agheli, 2019]. Azonban, a fellelt kutatásokra jellemző, hogy az optimalizálás során kevesebb számú célt határoznak meg és a felhasznált modellek nem rendelkeznek megfelelő kidolgozottsággal. Saját kutatásom során törekedtem az optimalizálási célok és paraméterek minél sokoldalúbb és részletesebb megfogalmazására és figyelembevételére, valamint egy nagyon részletes, validált dinamikai modell megalkotására.

## II. CÉLKITŰZÉSEK

Kutatásom célja egy olyan hatlábú járó robotot megalkotása, mely optimális test- és lábszerkezettel rendelkezik. Ehhez első lépésben elengedhetetlen feltétel a meglévő fizikai robot részletes modellezése, validálása és az ismeretlen elektromechanikai események elemzése és megértése. A validált modell létrehozásához és a további modellek megépítéséhez szükséges modellezési eszközök és eljárások kifejlesztése utáni lépés a szerkezeti és geometriai optimalizálás, ami magában foglalja a lábak és a test elemeinek (motor, reduktor, szegmensek) kiválasztását és méretezését. A végső cél egy új, optimalizált (jobb, előnyösebb) szerkezettel rendelkező hexapod járó robotot megtervezése.

A célul kitűzött kutatási feladatok tételekre bontva:

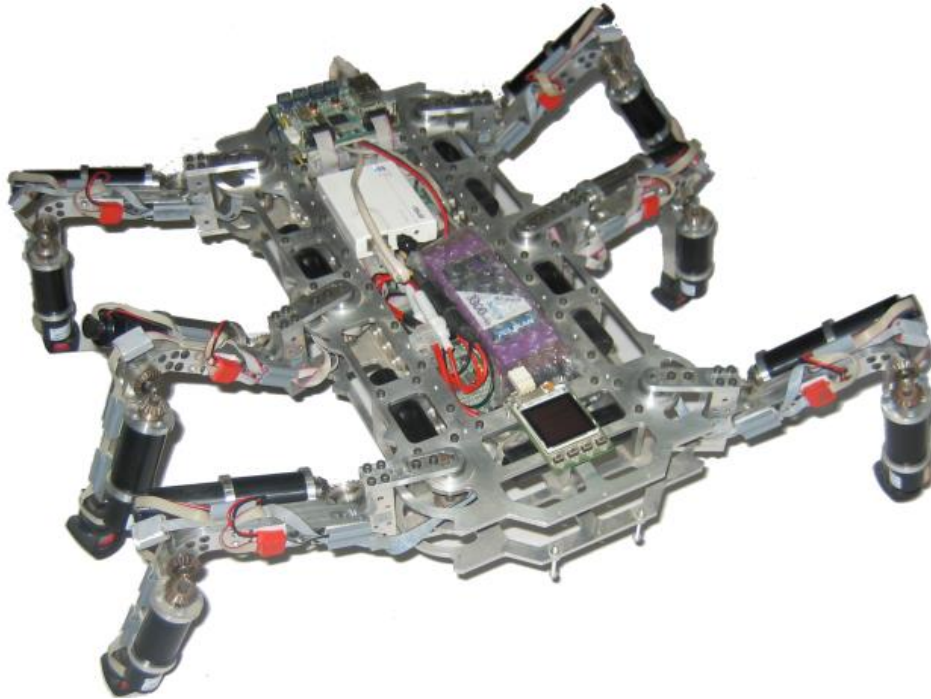
- Meg kell tervezni és építeni egy valós hatlábú robotot (Szabad(ka)-II valós robot), mely megfelelően precíz mérési eredményeket tud szolgáltatni. Ki kell dolgozni a robot mechanikai, elektronikai és beágyazott szoftver rendszerét.
- A robotot fel kell szerelni a megfelelő áram-, szög-, erő- és gyorsulásmérő érzékelőkkel és a feldolgozáshoz szükséges jelfeldolgozó elektronikai elemekkel.

- Létre kell hozni a hatlábú járó robot részletes dinamikus szimulációs modelljét (Szabad(ka)-II robot modell). A rendszer mechanikai leírása mellett, a modellnek tartalmaznia kell a motorok és a reduktorok részletes mechatronikai definícióját is. Ezen felül, szoftveres oldalon a modell részét kell, hogy képezze a mozgásalgoritmus, illetve a motor szabályozó alrendszerek is.
- Validálni kell a modellt a valós robot és a modell által generált jelek összevetésével. A validáció során magyarázatot kell találni az eltérések okaira és minimalizálni kell az eltéréseket.
- Kutatni kell az új robot (Szabad(ka)-III valós robot) esetén alkalmazható mechanikai és elektronikai megoldásokat. Ki kell vizsgálni a harmadik csukló mellett egy negyedik csukló bevezetésének előnyeit és hátrányait.
- Ki kell dolgozni egy továbbfejlesztett, paraméterezhető modellt (Szabad(ka)-III robot modell), mellyel el lehet végezni az új robot szerkezeti optimalizálását.
- Meg kell határozni az optimalizálás céljait, paramétereit és tesztkörnyezeteit és el kell végezni az optimalizálást.
- Verifikálni kell az optimalizálás eredményeit.

### **III. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK**

#### **Szabad(ka)-II robot**

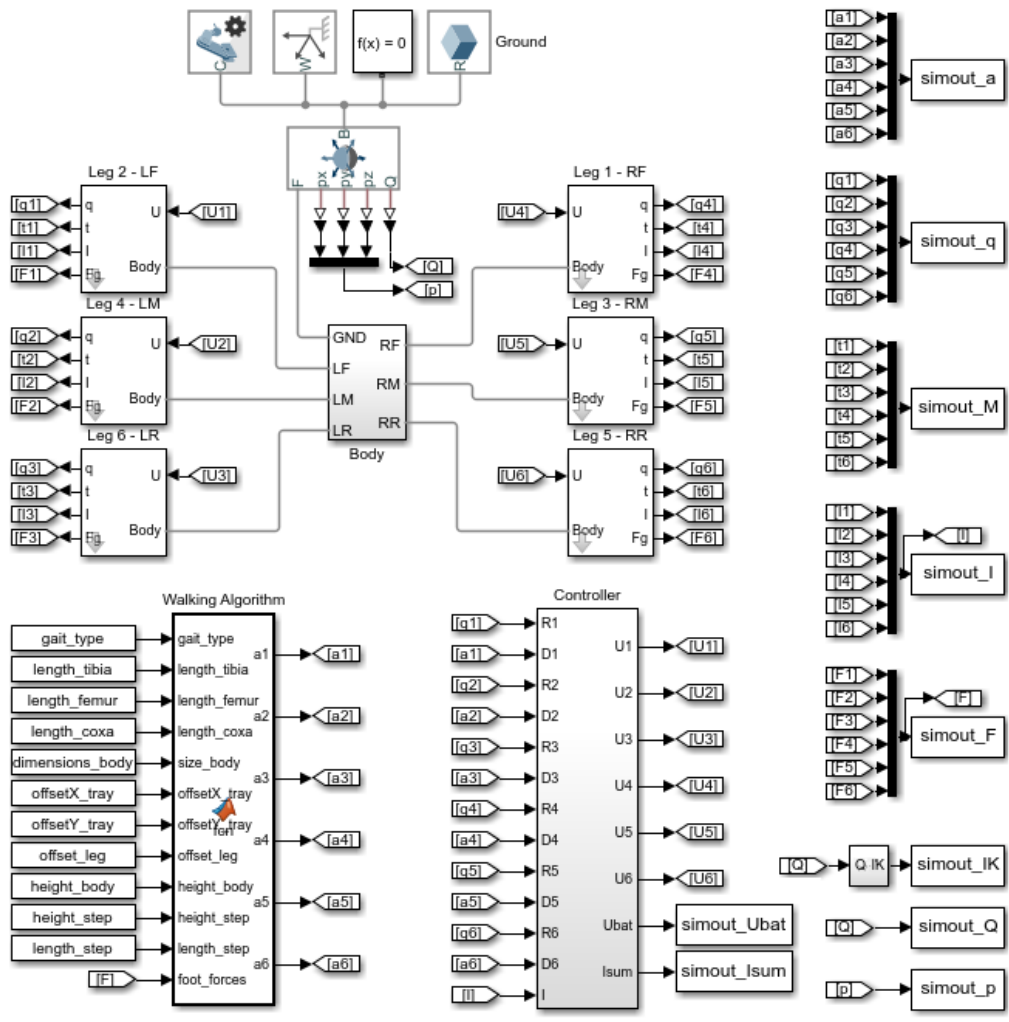
A kutatásom során végzett validálás alatt a Szabad(ka)-II (1. ábra) valós robot mérési eredményeit hasonlítottam össze a dinamikus modell által számított adatokkal. A robot a hat láb 18 csuklójának motoráramait és csuklósögeit szolgáltatva. A csuklósögek elemzésével a kinematikai hibákat tudtam meghatározni, a motoráramok elemzésével pedig a csuklóban jelentkező nyomatékokat becsültem meg. A validáláshoz tartozó mérések során a mechanikai szerkezet extrém igénybevételnek volt kitéve, minek következtében a megfigyelt áramgörbéken nagyfrekvenciás tranziensek is jelentkeztek. Emiatt, a kimeneti változók kinyerése magasabb mintavételezéssel (500 Hz) történt.



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

## **Dinamikus modell**

A Szabad(ka)-III robot szerkezeti optimalizálásának elvégzéséhez szükség volt egy paraméterezzhető, nagyon részletes dinamikus modellre. Először Szabad(ka)-II modelljét hoztam létre, hogy elvégezhessem a validálást, majd e modell kibővítésével realizáltam Szabad(ka)-III paraméterezzhető modelljét (2. ábra). Mindkét modell részletesen leírja a robot mechanikai, elektronikai és vezérlő/szabályozó elemeit. A modelleket a Simscape Multibody szoftver segítségével készítettem, ami jelentős előnyöket biztosított a hagyományos Simulink alapú megoldásokhoz képest [2]. A vezérlési folyamatok megvalósításához Simulink elemeket használtam, az elektronikai és mechanikai elemek megvalósításához pedig a Simscape Electronics, Electrical, Mechanical és Driveline könyvtárakat alkalmaztam.



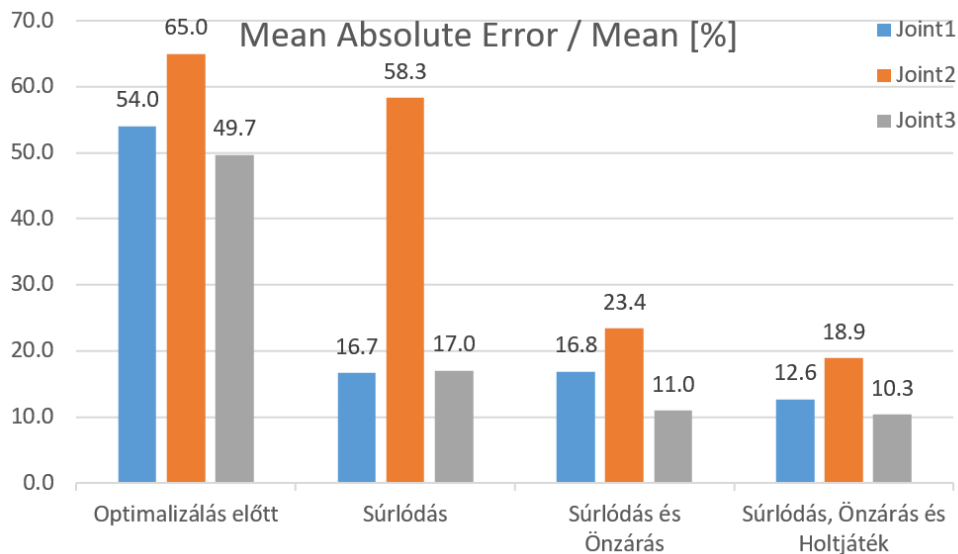
2. ábra - Szabad(ka)-III robot Multibody modellje.

## Modell validálás (Szabad(ka)-II)

A Szabad(ka)-II robot modellből kapott eredmények 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 bővítettem 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 (3. ábra).



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 ([2], [Kecskés, Székács, C. Fodor, & Odry, 2013]).

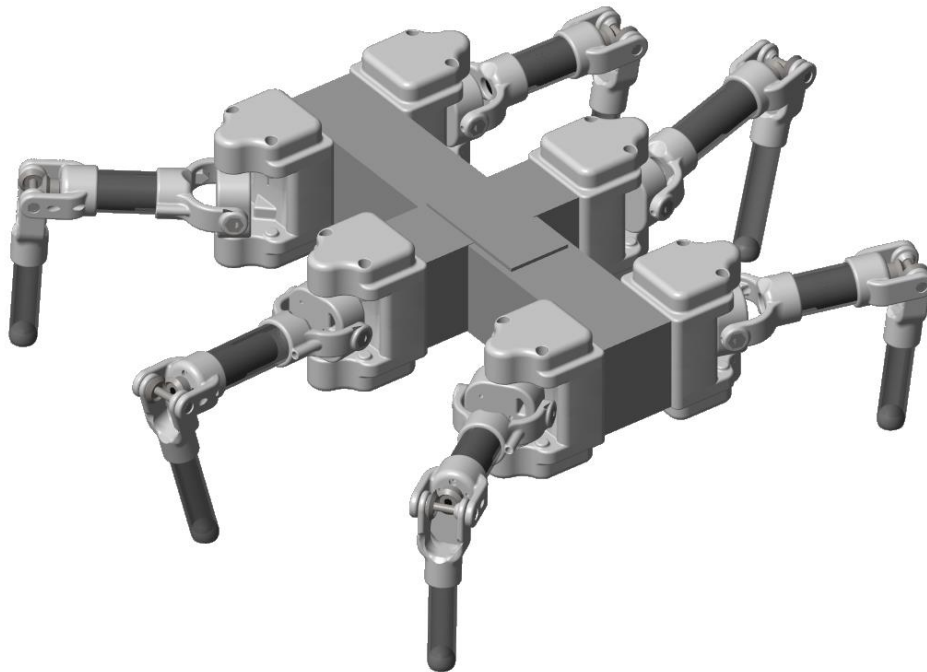


3. ábra - Az áramhibák változása: optimalizálás előtt; a súrlódás hatásának optimalizálása után; a súrlódás és az önzárás együttes optimalizálása után; illetve a súrlódás, az önzárás és a holtjáték együttes optimalizálása után.

### Szerkezeti optimalizálás (Szabad(ka)-III)

A szerkezeti optimalizációval a lábszegmensek méreteit és elhelyezkedéseit, a test méreteit, és a talpak pozícióit határoztam meg. Az optimalizálás céljai az energiafogyasztás, a test nem kívánt mozgásának és a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálása, valamint a sebesség és mozgékonyság megtartása voltak. A kutatás során elemeztem a paraméterek és a célok nagyobb halmazát is, ezekből emeltem ki a számomra releváns elemeket. A tesztkörnyezetek (szcenárió) közül egyenes 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 célja, hogy nagyobb paraméterszámú problémák esetén, kevés iteráció számmal is megfelelő eredményeket produkáljon. A Szabad(ka)-III robot (4. ábra) 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.



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

### **Eredmények verifikálása**

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. Ezek az eredmények igazolják a két-lépéses optimalizációval meghatározott szerkezeti paraméterek általánosságát és robusztusságát.

A Szabad(ka)-I, Szabad(ka)-II és Szabad(ka)-III robotok kutatása és fejlesztése során, fokozatosan fejlődött a szerkezetek elektronikai, mechanikai és szoftveres rendszere is. A kutatás végeredményeként pedig létrejött a Szabad(ka)-III robot optimalizált modellje, mely megfelelő alapot ad egy, az elődjeihez képest jelentősen előnyösebb szerkezettel rendelkező, korszerű mechatronikai elemekkel megvalósított hatlábú járó robot megépítéséhez.

## IV. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

### 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: [1], [2], [3].

### 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: [2].

## **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: [2].

## **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: [4], [5].

## **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 mozgékonyság megtartása voltak.

Tézisekhez kapcsolódó saját publikációk: [4], [6], [7].

## 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: [4].

## V. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGE

A járó robotok a kerekes robotokhoz viszonyítva sokkal effektívebben alkalmazhatók összetett akadályokkal vagy nagy meredekséggel jellemezhető terepeken [Silva & Machado, 2011], [Fielding, Dunlop, & Damaren, 2001], [Bjelonic, és mtsai., 2018]. Ebből kifolyólag, ezeket a robotokat gyakran használják bányászati, felderítő, katonai, mentő, aknamentesítő, illetve általában ipari alkalmazásokban [Fielding, Dunlop, & Damaren, 2001], [Gonzalez-de-Santos, Cobano, Garcia, Estremera, & Armada, 2007] a Földön vagy akár a világűrben is [Bartsch, Birnschein, Rommermann, Hilljegerdes, & Kuhn, 2012], [Kennedy, és mtsai., 2002].

A kutatásom során megtervezett Szabad(ka)-III robot szintén felhasználható az említett alkalmazásokban. Megoldást jelenthet például radioaktív sugárzásnak kitett területen folytatott vizsgálatokra vagy háborús övezetben történő aknakeresésre. A többcélú optimalizálásnak és a részletes mechanikai tervezésnek köszönve a robot jellemzői jelentősen javultak. A szerkezet egy további előnye, hogy könnyen átalakítható esetleges speciális igényeknek (nagyobb hasznos tömeg, összetettebb terepviszonyok) megfelelően. Ez a könnyen paraméterezhető modellnek, az egyszerűen modifikálható, moduláris felépítésnek és a tetszőlegesen változtatható optimalizációs céloknak köszönhető.

Ezen felül, a validált modell és az optimalizációs eljárás elsősorban a Szabad(ka)-III robot kifejlesztésének érdekében lett megalkotva, de a folyamat közben kidolgozott megoldások és eljárások más mechatronikai eszközök modellezésére és optimalizálására is felhasználhatók.

## VI. IRODALMI HIVATKOZÁSOK LISTÁJA

- Altuzarra, O., Aginaga, J., & Hernánd, A. (2011). Workspace analysis of positioning discontinuities due to clearances in parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 46, 577-592.
- Bartsch, S., Birnschein, T., Rommermann, M., Hilljegerdes, J., & Kuhn, D. (2012). Development of the Six-Legged Walking and Climbing Robot SpaceClimber. *Journal of Field Robotics*, 29(3), 506-532.
- Bjelonic, M., Kottege, N., Homberger, T., Borges, P., Beckerle, P., & Chli, M. (2018). Weaver: Hexapod robot for autonomous navigation on unstructured terrain. *Journal of Field Robotics*, 35(7), 1063-1079.
- Diez-Ibarbia, A., Fernandez-del-Rincon, A., de-Juan, A., Iglesias, M., Garcia, P., & Viadero, F. (2018). Frictional power losses on spur gears with tip reliefs. The friction coefficient role. *Mechanism and Machine Theory*, 121, 15-27.
- Ding, X., & Yang, F. (2016). Study on hexapod robot manipulation using legs. *Robotica*, 34(02), 468-481.
- Fielding, M. R., Dunlop, R., & Damaren, C. J. (2001). Hamlet: force/position controlled hexapod walker - design and systems. *IEEE International Conference on Control Applications*, (pp. 984-989). Mexico.
- Gonzalez-de-Santos, P., Cobano, J. A., Garcia, E., Estremera, J., & Armada, M. A. (2007). A six-legged robot-based system for humanitarian demining missions. *Mechatronics*, 17(8), 417-430.
- Grzelczyk, D., Stańczyk, B., & Awrejcewicz, J. (2015). Power consumption analysis of different hexapod robot gaits. *13th International Conference on Dynamical Systems: Theory and Applications*. Lodz.
- Jianxun, L., Steven, F., & Ou, M. (2012). An extended bristle friction force model with experimental validation. *Mechanism and Machine Theory*, 56, 123-137.

- Kecskés, I., Székács, L., C. Fodor, J., & Odry, P. (2013). PSO and GA optimization methods comparison on simulation model of a real hexapod robot. *IEEE 9th International Conference on Computational Cybernetics (ICCC)*. Tihany.
- Kennedy, B., Aghazarian, H., Cheng, Y., Garrett, M., Hutsberger, T., Magnone, L., . . . Robinson, M. (2002). Limbed Excursion Mechanical Utility Rover: LEMUR II. *53rd International Astronautical Congress*. Houston.
- Konyev, M., Palls, F., Zavgorodniy, Y., Melnikov, A., Rudskiy, A., Telesh, A., . . . Rusin, V. (2008). Walking Robot “ANTON”: Design, Simulation, Experiments. *11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, (pp. 922-929). Coimbra.
- Liu, Y., Wang, C., Zhang, H., & Zhao, J. (2020). Research on the Posture Control Method of Hexapod Robot for Rugged Terrain. *Applied Sciences*, *10*(19), 6725.
- Marco, L., & Giacomo Bianchi. (2009). Self-locking analysis in closed kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, *44*, 2038-2052.
- Rastgar, H., Naeimi, H. R., & Agheli, M. (2019). Characterization, validation, and stability analysis of maximized reachable workspace of radially symmetric hexapod machines. *Mechanism and Machine Theory*, *137*, 315-335.
- Silva, M. F., & Machado, J. A. (2011). A literature review on the optimization of legged robots. *Journal of Vibration and Control*, *18*(12), 1753-1767.
- Siyu, C., Jinyuan, T., Caiwang, L., & Qibo, W. (2011). Nonlinear dynamic characteristics of geared rotor bearing systems with dynamic backlash and friction. *Mechanism and Machine Theory*, *46*(4), 466-478.
- Wang, G., Ding, L., Gao, H., Deng, Z., Liu, Z., & Yu, H. (2019). Minimizing the Energy Consumption for a Hexapod Robot Based on Optimal Force Distribution. *IEEE Access*, *8*, 5393-5406.
- Zielinska, T., & Heng, J. (2002). Development of a walking machine: Mechanical design and control problems. *Mechatronics*, *12*(5), 737-754.

## **VII. A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK**

- [1] E. Burkus and P. Odry, "Autonomous Hexapod Walker Robot "Szabad(ka)"," Acta Polytechnica Hungarica, vol. 5, no. 1, pp. 69-85, 2008.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

## **VIII. TOVÁBBI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK**

- [8] 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.



- [9] 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.
- [10] Z. Pap, I. Kecskés, E. Burkus, F. Bazsó, and P. Odry, "Optimization of the hexapod robot walking by genetic algorithm," in *IEEE 8th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, 2010: IEEE, pp. 121-126.
- [11] I. Kecskés, E. Burkus, and P. Odry, "Swarm-based optimizations in hexapod robot walking," in *2014 IEEE 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, 2014: IEEE, pp. 123-127.
- [12] Á. Odry, E. Burkus, and P. Odry, "LQG control of a two-wheeled mobile pendulum system," in *The Fourth International Conference on Intelligent Systems and Applications*, 2015, pp. 119, 2015.
- [13] L. Gutasi, E. Burkus, and P. Odry, "Facilitation of obstacle detection by utilization of low-cost sensors in the case of mobile robots," in *2015 IEEE 13th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, 2015: IEEE, pp. 179-184.
- [14] Á. Odry, E. Burkus, I. Kecskés, J. Fodor, and P. Odry, "Fuzzy control of a two-wheeled mobile pendulum system," in *2016 IEEE 11th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, 2016: IEEE, pp. 99-104.
- [15] I. Kecskés, Á. Odry, E. Burkus, and P. Odry, "Embedding optimized trajectory and motor controller into the Szabad (ka)-II hexapod robot," in *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2016: IEEE, pp. 001417-001422.
- [16] Á. Odry, I. Kecskés, E. Burkus, and P. Odry, "Protective fuzzy control of a two-wheeled mobile pendulum robot: Design and optimization," *WSEAS Trans. Syst. Control*, vol. 12, pp. 297-306, 2017.
- [17] 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 *2017 Fourth International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI)*, 2017: IEEE, pp. 37-43.

- [18] Á. Odry, I. Kecskés, E. Burkus, Z. Kiraly, and P. Odry, "Optimized fuzzy control of a two-wheeled mobile pendulum system," *Int. J. Control Syst. Robot*, vol. 2, pp. 73-79, 2017.
- [19] I. Kecskés, E. Burkus, and P. Odry, "Gear efficiency modeling in a simulation model of a DC gearmotor," in *2018 IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*, 2018: IEEE, pp. 000065-000070.
- [20] V. Tadic, A. Odry, I. Kecskés, E. Burkus, Z. Kiraly, and P. Odry, "Application of Intel realsense cameras for depth image generation in robotics," *WSEAS Transac. Comput*, vol. 18, pp. 2224-2872, 2019.
- [21] V. Tadic, A. Odry, E. Burkus, I. Kecskés, Z. Kiraly, and P. Odry, "Edge-preserving filtering and fuzzy image enhancement in depth images captured by realsense cameras in robotic applications," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 83-92, 2020.
- [22] V. Tadić, E. Burkus, A. Odry, I. Kecskés, Z. Kiraly, and P. Odry, "Effects of the post-processing on depth value accuracy of the images captured by RealSense cameras," *data processing*, vol. 5, pp. 9, 2020.
- [23] V. Tadic, A. Odry, E. Burkus, I. Kecskés, Z. Kiraly, M. Klincsik, Z. Sari, Z. Vizvari, A. Toth, and P. Odry, "Painting path planning for a painting robot with a realsense depth sensor," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, pp. 1467, 2021.
- [24] V. Tadić, A. Odry, E. Burkus, I. Kecskés, Z. Kiraly, Z. Vizvari, A. Toth, and P. Odry, "Application of the ZED Depth Sensor for Painting Robot Vision System Development," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 117845-117859, 2021