

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

**RHEX SZERŰ HATLÁBÚ ROBOT
MECHATRONIKAI TERVEZÉSE,
DINAMIKAI MODELLEZÉSE ÉS
IRÁNYÍTÁSA**

Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat

Szerző:

Bessenyei Szilárd

Konzulens:

Dr. Harmati István

BUDAPEST, 2016

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Összefoglaló.....	3
Abstract.....	4
Jelölések.....	5
1. Bevezetés.....	7
1.1 Járó robotok.....	7
1.2 Járás mechanizmus.....	8
1.3 A futás mechanizmusa.....	9
1.4 RHex - Hexapod Runner.....	11
1.5 A robotmodellezés szükségessége.....	15
2 RHex-szerű robot modellezése.....	17
2.1 Kinematika modell.....	18
2.2 Statikus rugómodellek.....	20
2.3 Dinamikai modell.....	21
2.4 Dinamikus rugómodell.....	24
3 SimMechanics modell.....	26
3.1 Nyomatékok lefekvés és felállás közben.....	28
3.2 Nyomatékok járás és futás közben.....	31
3.3 Motorméretezés.....	37
4 Az RHex-szerű hexapod robot lába.....	40
4.1 Megvalósított robotlábak.....	42
4.2 A láb szimulálása végeselemes módszerrel.....	43
4.3 Statikus mérés, validációs eredmények és rugóállandók meghatározása.....	46
4.4 Dinamikus mérés.....	48
5 Az eredmények alapján megtervezett robot modellje.....	49
6 Konklúzió.....	52
Irodalomjegyzék.....	55
Függelék.....	57
A lábak mérési eredményei.....	57
SimMechanics által szimulált járásalgoritmusok eredménye.....	60

Összefoglaló

A járó robotok egyre elterjedtebbek napjainkban, mivel több helyen is igény mutatkozik nagy mobilitású robotok alkalmazására. A járó robotoknál irányítani és időzíteni lehet a talaj felé kifejtett erőket, így megválaszthatjuk, hogy a robot előre szökkenjen, felfelé ugorjon, szaltót vagy más mozdulatot végezzen. A gyakorlatban ezek a gépek segíthetik a műszaki mentést, ismeretlen környezet feltérképezését vagy zord környezeti körülmények között végzett munkát.

A természetben az állatok kiváló agilitásuk mellett nagy energiahatékonysággal mozognak. A biológusok megfigyelték, hogy a járás folyamatát egy merev lábön átbillenő pontszerű tömegű testtel (inverz inga), a futásét pedig egy tömeg-rugó sablonnal (Spring Loaded Inverted Pendulum) lehet modellezni. [1] Alulirányított mechanikai szerkezetnél együttesen növelhetjük az energiahatékonyságot és a sebességet, ha a rendszer dinamikus mozgása ezen sablonokhoz hasonló.

Az RHex egy bioinspirált, hatlábú masina mely lábanként egy-egy aktuátorral rendelkezik. Lábai teljesen körbe tudnak fordulni, így mozgása részben hasonlít a kerekes robotokéhoz. Mechanikai egyszerűsége ellenére olyan összetettebb mozgási feladatokra is képes, mint a futás, szaltó, fordulás, ugrálás, lépcsőzés.

A dolgozat egy RHex szerű robot megépítésének előkészületeit és mozgásának szimulálását írja le. A megépítés előtt célszerű a robotot analitikusan modellezni és szimulálni. Ennek segítségével előre optimalizálhatjuk a szerkezet tulajdonságait.

CAD modellezés és végeselemes módszer segítségével meghatározzuk a robot dimenzióit, össztömegét, súlypontjának elhelyezkedését, lábának rugóállandóját és sajátfrekvenciáját. A lábparaméterek validálását egy saját fejlesztésű mérőműszerrel végezzük, mely statikus és dinamikus mérésekre egyaránt fel van készítve. A robot szabályozását megnehezíti, hogy futás közben lábai bizonyos ideig nem érintkeznek a talajjal, így mozgásegyenlete hibrid differenciálegyenlettel írható le.

A járásalgorithmus, a motorszabályozás és a mechanika együttes szimulációját SimMechanics környezetben végezzük az importált CAD modellel. A szimuláció segítségével optimalizálhatjuk a járásalgorithmust, az energiaveszteségeket és a szabályozók paramétereit.

Abstract

Walking robots are becoming more and more common nowadays, since there is higher demand for the application of a highly mobile robots. In case of a walking robot the forces towards the ground can be timed and controlled. By doing so we can determine the movements of the robot, we can make it leap, jump, or do a backflip. In practice these machines can help in technical rescue, exploring previously unknown territories, and doing work in an unfriendly environment for humans.

In nature animals have high agility, as well as great energy efficiency during movement. Biologists have observed that the walking mechanism can be modeled as a point-like mass tilting over a stiff leg (inverse pendulum) and the mechanism of running as a spring-mass template (Spring Loaded Inverted Pendulum) [1]. We can increase the energy efficiency and the speed of an underactuated mechanical system simultaneously, if the systems dynamic movement can be described with the template mentioned previously.

The RHex is a bio-inspired six-legged machine with one actuator for each leg. The legs could completely turn around, so it's movement was similar to a wheeled robot. Despite its mechanical simplicity the robot could run, turn, jump, climb stairs, and do a backflip.

The paper describes the necessary prepares and the movement simulation of an RHex-like robot. Before the construction it is advised to analytically model the robot and to simulate its movements, so we could optimize the structural properties.

We determine the robot's dimensions, mass, locations of the centers of gravity, the leg's spring constant and natural frequency using CAD modelling and finite element analysis. The leg's parameter validation is done by a self-developed measurement device which can measure static and dynamic properties too. During running the legs don't always connect with the ground, so the movement can only be described with hybrid differential equations which make the control of the robot difficult.

The walking algorithm, motor control and the complete mechanical simulations is done in SimMechanics environment with the imported CAD model. With the help of the simulation we can optimize the walking algorithm, the energy losses, and the control parameters.

Jelölések

g	<i>gravitáció</i>
m	<i>a test tömege</i>
SR	<i>a mozgás fajlagos ellenállása</i>
v	<i>mozgási sebesség</i>
E	<i>a mozgás során befektetett munka</i>
l_0	<i>a küllő hossza</i>
d_{gyr}	<i>a test sugara</i>
α	<i>a kerék forgási sebessége</i>
θ	<i>a küllő szöge</i>
γ_{gyr}	<i>a lejtő dőlésszöge</i>
Fr	<i>Froude szám</i>
l	<i>a láb hossza</i>
r_0	<i>a rugó eredeti hossza</i>
r	<i>a rugó hossza</i>
\dot{r}	<i>a rugó hosszának változási sebessége</i>
\ddot{r}	<i>a rugó hosszának változási gyorsulása</i>
k	<i>rugóállandó</i>
θ	<i>a láb szöge</i>
$\dot{\theta}$	<i>a láb szögsebessége</i>
$\ddot{\theta}$	<i>a láb szöggyorsulása</i>
x	<i>a sablon tömegközéppontjának x pozíciója</i>
\ddot{x}	<i>a sablon tömegközéppontjának gyorsulása az x tengelyen</i>
y	<i>a sablon tömegközéppontjának y pozíciója</i>
\ddot{y}	<i>a sablon tömegközéppontjának gyorsulása az y tengelyen</i>
T	<i>kinetikus energia</i>
V	<i>potenciális energia</i>
b_x	<i>a test x pozíciója</i>
b_z	<i>a test z pozíciója</i>
ξ_i	<i>a virtuális rugalmas láb hossza</i>
ξ_0	<i>a virtuális rugalmas láb eredeti hossza</i>
ξ_{it}	<i>a virtuális rugalmas láb hossza ha érintkezik a talajjal</i>
t_p	<i>lépés periódusideje</i>
t_s	<i>az aktív állapot idejének hossza</i>
Φ_i	<i>a robot csípőjének szöge, amely körül a láb forog</i>
Ψ_i	<i>az i-edik virtuális láb szöge</i>
Ψ_{it}	<i>a szög ahol az virtuális i-edik láb érintkezik a talajjal</i>
Ψ_{li}	<i>a szög ahol az i-edik láb nem érintkezik a talajjal</i>
Ψ_s	<i>Az aktív üzemmód szögtartománya</i>
h_i^t	<i>az i-edik láb talajjal történő érintkezés állapotváltozója</i>
h_i^l	<i>a i-edik láb talajtól való felemelkedésének állapotváltozója</i>
d_i	<i>az erőkar hossza</i>

l_t	<i>a virtuális erőkar hossza</i>
l_{arc}	<i>a talajkontaktus által megtett ívhossz</i>
d_t	<i>a C alakú láb átmérője</i>
δ	<i>deformáció</i>
b	<i>a rugó csillapítása</i>
τ_i	<i>általánosított nyomaték</i>
τ_{hip}	<i>csípőre kifejtett nyomaték</i>
\hat{g}	<i>optimális paramétervektor</i>
L	<i>Lagrange függvény</i>
q_i	<i>általánosított koordináta</i>
M	<i>inercia mátrix</i>
C	<i>koriolisz mátrix</i>
N	<i>potenciális energia</i>
χ	<i>a rugó deformációja</i>
f_k	<i>a rezgés sajátfrekvenciája</i>
ω_k	<i>a rezgés körfrekvenciája</i>
b_k	<i>a kritikus csillapítási tényező</i>
ζ_k	<i>a rendszer csillapítási viszonya</i>
ϑ_k	<i>a rezgés fáziszöge</i>
η_{HO}	<i>a rezgés összenergiája</i>
ω_{stance}	<i>aktív üzemmód szögsebessége</i>
ω_{flight}	<i>szabadon forgó állapot szögsebessége</i>
E_y	<i>Young vagy rugalmassági modulus</i>
S_y	<i>folyáshatár (Yield strength)</i>
σ	<i>mechanikai feszültség</i>
ε	<i>megnyúlás</i>
U	<i>az anyag fajlagos rugalmassági energiája</i>
d_{out}	<i>külső átmérő</i>
d_{in}	<i>belső átmérő</i>
h_{leg}	<i>a láb valós vastagsága</i>

1. Bevezetés

A robotika fejlődését a jelenkorban is zajló intenzív kutatások biztosítják. A kutatások kiterjednek a mobil robotok megfelelő kinematikai struktúrájának kutatására, az alkalmazható érzékelők és beavatkozók kutatására és nem utolsósorban a mobil robotoknál hatékonyan alkalmazható irányítástechnikai megoldások keresésére. A kinematikai megoldások közül legismertebbek a járó robotok a kerekeken guruló robotok az úszó autonóm járművek valamint a pilóta nélküli repülő járművek.

A járó robotokat egyre szélesebb körben használják a hétköznapi életben. Szárazföldi felderítésnél, műszaki mentésnél vagy más ember által megközelíthetetlen helyeken ilyen jellegű robotokat célszerű alkalmazni, mivel egyenetlen talajon hatékonyabban és stabilabban képesek haladni a kerekes robotoknál.

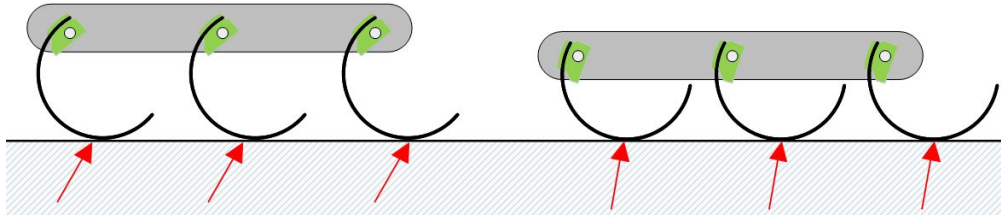
Az RHex egy bioinspirált, hatlábú masina mely lábanként egy-egy aktuátorral rendelkezik. Lábai teljesen körbe tudnak fordulni, így mozgása részben hasonlít a kerekes robotokéhoz. Mechanikai egyszerűsége ellenére olyan összetettebb mozgási feladatokra is képes, mint a futás, szaltó, fordulás, ugrálás, lépcsőzés.

1.1 Járó robotok

A járó robotok egyre elterjedtebbek napjainkban mivel több helyen is igény mutatkozik nagy mobilitású robotokra. A kerekes robotok előnyei a járó robotokhoz képest, hogy sima talajon gyorsabbak és kisebb az energiabefektetésük a mozgás során. [36] Egyenetlen terepen, amilyen például a köves vagy homokos talaj, elvesztik ezeket az előnyüket. 2006-ban metángáz robbanás miatt a Sago bányában több bányász a föld alá rekedt. Zord körülmények között is hatásosan mozgó mobilis robotok segítségével megtudták volna menteni a szerencsétlenség áldozatait. [18] Az űrkutatásban a bolygók felfedezésénél komoly hátránya a kerekes robotoknak, hogy homokos talaj esetén elakadhatnak. 2009 áprilisában a marsjáró robot a homokban elakadt, a mérnökök nyolc hónapon át próbálták kiszabadítani, de nem jártak sikerrel. [19]

Robotikában a lábak első nagy előnye a kerekekkel szemben, hogy irányítani és időzíteni tudjuk a talaj felé kifejtett erőket. Ezen erők irányításával és időzítésével megválaszthatjuk, hogy a robot előre szökkenjen, felfelé ugorjon, szaltót vagy más mozdulatot végezzen. [36]

Második nagy előnye a propriocepció, ahol a robot a végtagok segítségével érzékeli a talajt vagy környezetét. Az érzékelés segítségével lejtőn is találhatunk olyan pozíciót, amelyben a robot megmaradhat minimális energia befektetés mellett. [36]

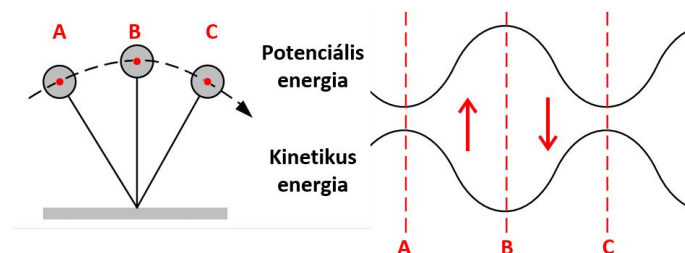


1.1.1. ábra: Előre ugrás bal oldalt és felfelé ugrás jobb oldalt

1.2 Járás mechanizmus

A járás mechanizmusát két csoportba lehet osztani. Az első csoport a szokványos nulla nyomaték pont (ZMP) [24] ahol a robot a mozgás során végig stabil marad. Ahhoz, hogy ezt biztosítani tudjuk, csak lassú mozdulatok engedhetők meg. A második csoport a dinamikus gyaloglás, amelyet eredetileg Tad McGeer fejlesztett ki 1990-ben [26]. Egy lépést merev lábon átbillenő pontszerű tömegű test mozgásával modellezzük (1.2.1. ábra), amely az inverz ingának felel meg. A test egy ív trajektórián billen az A kezdőpontból a C végpontba, melyet két fázisra lehet felosztani. Az első fázisban a láb a talajhoz ér (A és B pont között) és a kinetikus energia fokozatosan átalakul potenciális energiává. A második fázisban (B és C pont között) a függőleges helyzetből a test tovább billen, a gravitációs potenciális energia visszaalakul kinetikus energiává. A lépés periódusa újra kezdődik, amikor a láb újból a talajhoz ér. A következő lépés a jelenlegi lépés energiáját használja fel. [24] Itt a mozgás során a robot nem stabil minden pillanatban .

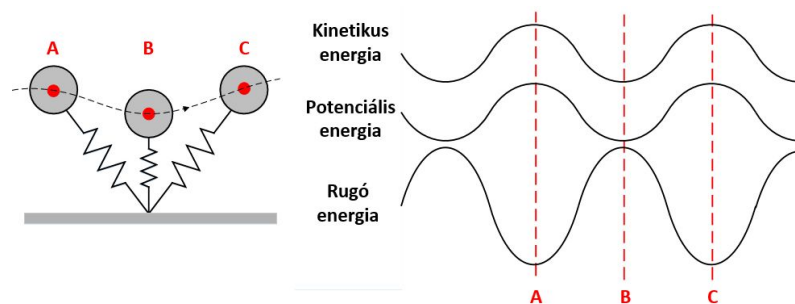
Ez a mozgásforma kis sebességnél bizonyos állatoknál akár 70%-os hatásfokkal is rendelkezhet. A mozgás magas hatásfoka fontos szempont a mobilis robotoknál, mivel így kisebb tömegű energiatárolókat alkalmazhatunk, továbbá a robotok így nagyobb sebességgel haladhatnak, és hosszabb távokat tehetnek meg. [40]



1.2.1. ábra: A egy lépés mechanizmus fázisai [24]

1.3 A futás mechanizmusa

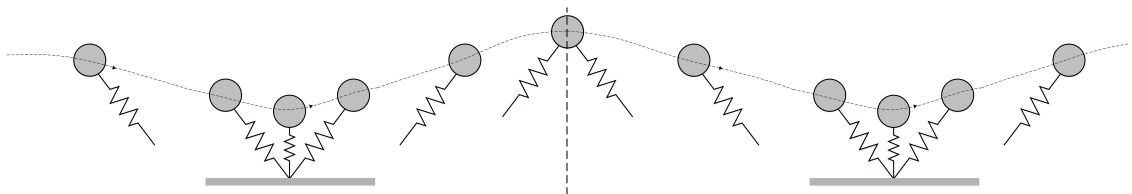
A biológusok megfigyelték, hogy futás közben a test egy tömeg-rugó rendszerhez hasonlóan viselkedik. Ez a modell a legtöbb állat mozgását jól leírja függetlenül testtartásuktól, testalkatuktól és lábuk számától. [29] Egy lépés periódus négy fázisra osztható. Az első fázisban a láb a földhöz ér (A pont), a tömeg középpont magassága pedig csökken a végpontig (B pont), mely hatására a rugó összehúzódik, vagyis a kinetikus és a potenciális energia eltárolódik a rugó potenciális energiájába. A második fázisban az összenyomott rugó potenciális energiája visszaalakul potenciális és kinetikus energiává.



1.3.1. ábra: A futás földi fázisa [26]

Harmadik fázisban a rendszer felemelkedik a földről mely hatására a láb nem érintkezik többet a talajjal. Ebben a fázisban a rendszernek ballisztikus a pályája. A negyedik fázisban repülés közben a láb szöge módosulásával felkészül a következő lépés megkezdéséhez. A lépésperiódus újra kezdődik a rugós lábnak a talajhoz érésekor. [40]

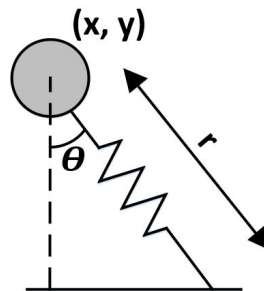
Ezt a sablont SLIP-nek (Spring Loaded Inverted Pendulum) nevezzük. Több fajta SLIP sablon létezik, ahol melyek eltérő a rugómodellel rendelkeznek. A mozgás során azt feltételezzük, hogy nincs csúszás. [26]



1.3.2. ábra: A futás teljes ciklusának modellezése SLIP sablonnal [26]

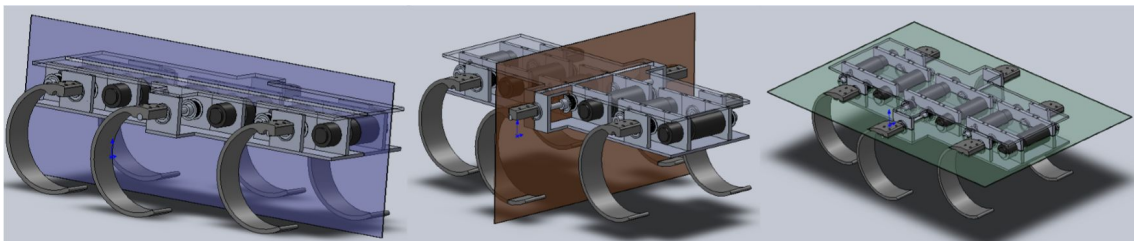
A SLIP sablon jóval összetettebb mint a keret nélküli kerék. Egyrészt több szabadságfokkal rendelkezik, másrészt pedig hibrid differenciaegyenlettel írható le (2.3 fejezet) a mozgásegyenlete. Két hibrid állapottal rendelkezik a rendszer. Az első amikor

a talajon tartózkodik, a második amikor a levegőben van. Az átmenetek a láb talajra érkezésekor és a talaj elhagyásakor jelentkeznek. Ezeknek a hibrid differenciaegyenleteknek nincs analitikus megoldásuk ezért nem tudjuk egyértelműen felírni a tömegközéppont pozícióját az idő függvényében. Ilyen esetben célszerű megközelítéssel számolni. A SLIP rendszer mozgása az ugróbothoz hasonló. [40]

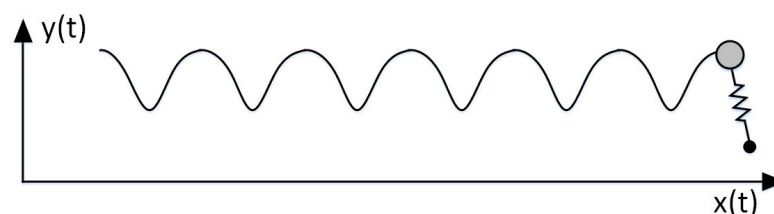


1.3.3. ábra: A SLIP model paraméterei [26]

A szagittális sík a testet jobb és bal félre osztja, a koronális elülső és hátsó félre, a transzverzális sík pedig felső és alsó félre. A legtöbb állat futása főleg a szagittális síkban történik, azonban néhány állat ettől eltérhet. A rák a koronális síkban fut, a csótány futása pedig egyszerre a szagittális és a transzverzális síkban is történik. A folyamatos mozgáshoz két kulcsfontosságú elem szükséges, a talaj felé kifejtett erők megfelelő időzítése és a láb beesési szöge. [40]



1.3.4. ábra: A szagittális sík bal oldalt, koronális sík középen, transzverzális sík jobb oldalt



1.3.5. ábra: A SLIP sablon tömegközéppontjának pályája

A sablon alapján 1982-ben az MIT laboratóriumában építettek egy egy lábú szökkenő robotot, melyet Raibert's hopper-nek neveznek. Két pneumatikus aktuátorral rendelkezett, az első a lába szögét tudta beállítani, a másik pedig rugóként üzemelt. Első

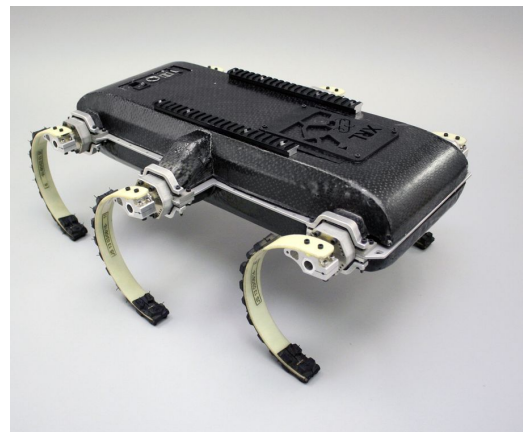
generáció 1982-ben képes volt kisebb sebességgel mozogni, akadályokat átugrani, és egy helyben ugrálni. A második generáció nyílt területen képes volt futás közben egyensúlyozni. A szökdelő eszköz nagy előrelépés volt a robotok világában ami dinamikus mozgást illeti. Konceptiója alapján több rendszert is építettek, melyek két vagy több lábbal rendelkeznek. [35]

Az RHex robot mozgása a SLIP sablonhoz hasonló, mivel a robot hat C alakú lába rugóként használható. A robot tömegközéppont trajektóriáját figyelve tripod járás közben, a lábak hatását egy virtuális rugós lábbal lehet helyettesíteni. A tripod járás mechanikai stabilitást biztosít, mivel egy időben három láb ér a talajhoz.

1.4 RHex - Hexapod Runner

2001-ben Martin Buehler fejlesztette ki az RHex első változatát. A hatlábú masina alulirányított, lábanként egy-egy aktuátorral rendelkezett. A lábai egy küllővel rendelkező keret nélküli kerékek felelnek meg. A haladási sebessége elérte az 1 testhossz/másodpercet, mely rekordnak számított az autonóm járó robotok között. Másik kimagasló eredménye, hogy nagy energiahatékonysággal mozog.[37]

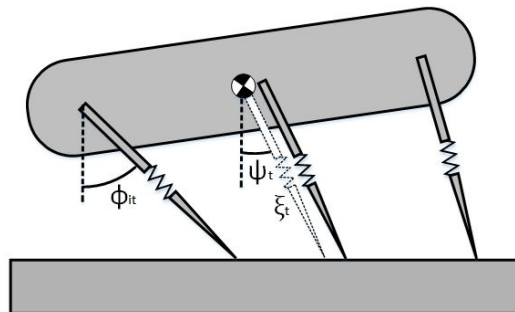
A lábgeometria továbbfejlesztésével elérték az 5 testhossz/másodperces sebességet, mely sík terepen 2.25 m/s-nak felel meg. Lábaknál fontos szempont a rugalmasság, ugyanis összetettebb mozgásoknál ez kihat a haladási sebességre. A rendszer összes szabadságfoka (Degree of Freedom - DOF) 24, a teste 6 szabadságfokkal rendelkezik és lábanként pedig hárommal. Az RHex lábának három generációja van, az első merev tüalaku láb mely a 1.4.1. ábrán látható bal oldalt, második egy összetettebb több lemezből álló, a harmadik pedig a C alakú rugalmas láb mely a 1.4.1. ábrán látható jobb oldalt.



1.4.1. ábra: Az első RHex bal oldalt [33] és egy továbbfejlesztett változata jobb oldalt [7]

Mechanikai felépítése egyszerűbb mint a legtöbb hexapod roboté, mivel egy aktuátorral rendelkezik a megszokott három helyett. Lábai teljesen körbe tudnak fordulni, így mozgása hasonlít a guruló robotokéhoz. Mind a hat lába egymástól függetlenül meghajtható [3]. Összetettebb mozgási feladatokra is képes, mint például a gyaloglás, futás, szaltózás, fordulás, ugrálás, lépcsőzés.

A robot mozgását legpontosabban a BSLIP (Bipedal Spring Loaded Inverted Pendulum) sablon írja le. Ha a tripod járásnál a talajhoz érő lábakat egy virtuális lábbal helyettesítjük akkor biped járást kapunk. Az így kapott két lábat virtuális bal lábnak (1) és virtuális jobb lábnak (2) nevezzük. A robot lábát forgató rotációs csuklót csípőnek nevezzük.



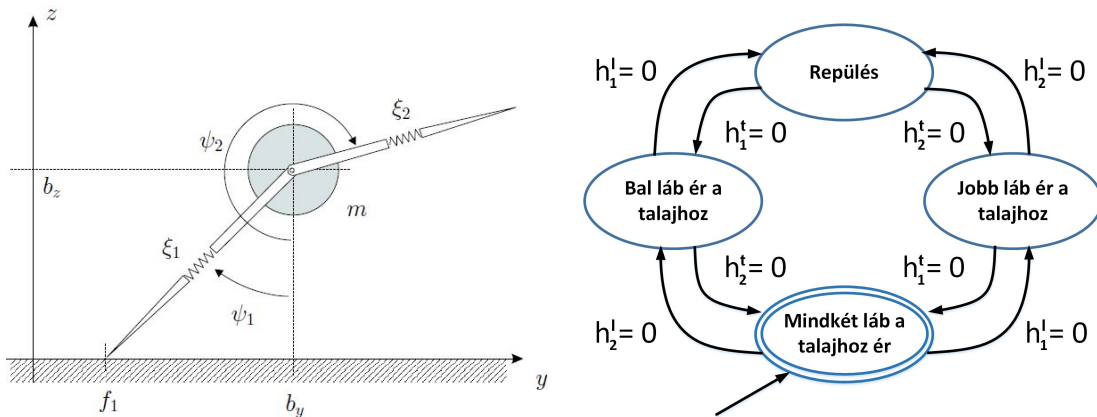
1.4.2. ábra: A rendszer állásának vetülete a szagittális síkon [37]

A szerkezet tömegközéppontja egy virtuális lábon keresztül érintkezik a talajjal. A virtuális lábnak a beesési szögét a valós lábak beesési szögével állítjuk be. A mozgás tervezésekor fontos, hogy lekorlátozzuk a robot csípőjén fellépő nyomatékokat mivel enélkül a robot nem képes álló (stance) állapotban maradni. A korlátozás fontos, ugyanis a rendszer nem tudja a motor nyomatékát továbbítani a talaj felé, ha a lábnak nincs meg a megfelelő tapadása. Ha a feltételek teljesülnek, matematikailag be lehet bizonyítani, hogy a rendszer egy SLIP sablonhoz hasonlóan működhet. [37] Miután elkészítettük a szabályozót a SLIP modellre, továbblépünk az összetettebb modellre vagyis a horgonyra, mely tartalmazza a rendszer jelentősebb szabadságfokait is.

Futás közben a láb egy bizonyos ideig nem érintkezik a földdel, ezért a korábban említett módon a robot mozgásegyenlete csak hibrid differenciaegyenlettel írható le. A probléma megoldására célszerű állapotgépet létrehozni, amely tartalmazza a mozgás közben fellépő állapotokat. A mozgás során négy alapvető helyzet lehet: mindkét láb a talajhoz ér, mindkét láb a levegőben van, csak a bal láb ér a talajhoz vagy csak a jobb láb. A rugalmas láb a földhöz ér, ha a test pozíciója a z tengelyen megegyezik a rugalmas láb hosszával, vagyis a különbségük nulla. A rugalmas láb akkor van

levegőben ha a rugalmas láb hossza megegyezik a láb eredeti hosszával. Ezeket a következő képletben összegezzük, ahol a h_i^t (touchdown) akkor aktív, amikor a földdel érintkeznek, a h_i^l (lift off) pedig akkor aktív amikor a láb felemelkedik:

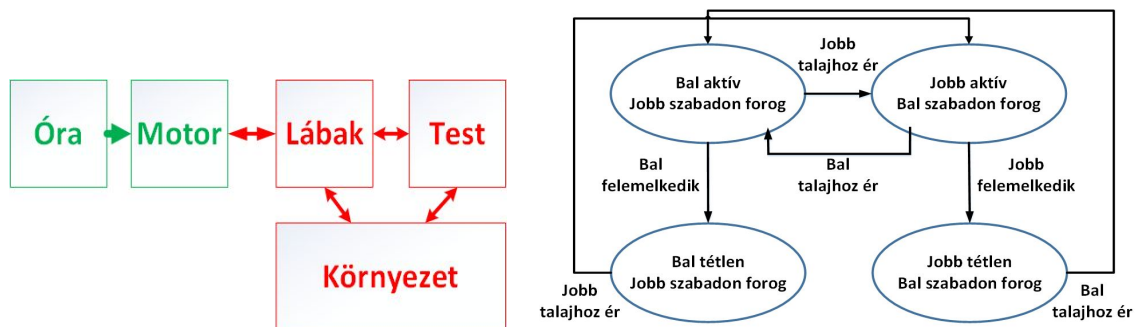
$$\begin{aligned} h_i^t &= b_z - \xi_i \cos \psi_i \\ h_i^l &= \xi_0 - \xi_i \end{aligned} \quad (1.4.1.)$$



1.4.3. ábra: A virtuális biped modellje [33] bal oldalt és az állapotgépe jobb oldalt [33]

Ezt a modellt nem lehet egy a fizikai világban közvetlenül megvalósítani. A fő probléma vele, hogy összetett feladat visszacsatolást adni a láb talajjal történő érintkezéséről. A visszacsatolás megvalósítását nehezíti, hogy az RHex robot lába szabadon körbe forog. A kutatások folyamán ezt a problémát még nem sikerült megoldani, mert a vezeték nélküli kommunikációs megoldások túlzottan zajosnak, a modell alapú megközelítés pedig lassúnak bizonyult [34]

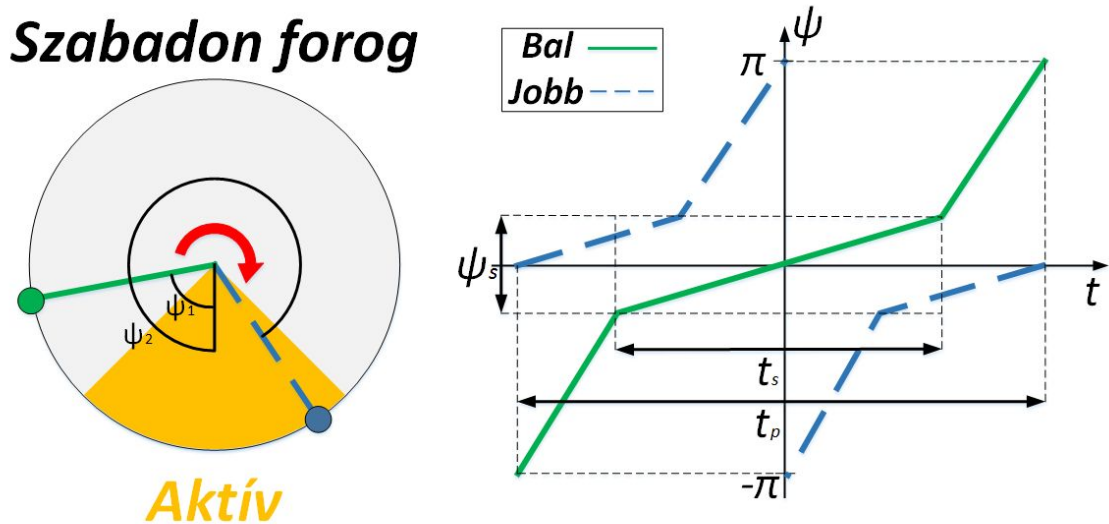
A felsorolt okok miatt a robot mozgását visszacsatolás nélkül nyílt hurkú szabályozással hangolják. A motorok időbeli pozícionálásával határozzuk meg a sablon lépésének frekvenciáját és a virtuális lábak beesési szögét. A motorok pozíciói egy úgynevezett Buehler órája alapján irányítjuk.



1.4.4. ábra: A szabályozási kör felépítése bal oldalt [37] és a BSLIP járás irányításának véges állapotú automatája [33]

A lábak három állapotban lehetnek: *aktív*, *szabadon forog* és *tétlen*. Aktív állapotban a robot a lábra támaszkodik miközben folyamatosan forog egy kisebb sebességgel. A szabadon forgó állapotban a láb a levegőben körbe fordul nagyobb sebességgel. Tétlen állapotban a robotláb szögsebessége megegyezik az aktív állapot szögsebességével, viszont itt nem érintkezik a talajjal. Az állapotátmeneteket a lábak és a talaj viszonya határozza meg.

A lábak egyszerű forgási sebességének növelésével a rendszer dinamikus viselkedése miatt nem fog lineárisan növekedni a rendszer haladási sebessége. Egy lépés során mindkét láb Ψ_s a szögtartományban t_s ideig forog aktív üzemmódban, $2\pi - \Psi_s$ szögtartományon belül pedig $t_p - t_s$ ideig szabadon forog körbe. [33]



1.4.5. ábra: Buehler órájának felépítése bal oldalt és a motorok pozíciójának időbeli függvénye jobb oldalt [37]

Amennyiben a sablonon megvalósítani a kívánt viselkedést, áttérhetünk az összetettebb modellre, vagyis horgonyra. A virtuális bal láb jelével a hexapod bal első, jobb középső és bal hátsó lábat irányítjuk, a virtuális jobb láb jelével pedig a jobb első, bal középső és a jobb hátsó lábat. Az óra Ψ_s , t_s , t_p értékeit empirikus úton hangoljuk, mivel eddigi kutatások során nem sikerült egyértelműen képlettel kiszámítani az óra ezen paramétereinek optimális értékét. A hangolás folyamán a mozgás fajlagos ellenállását (SR) minimalizáljuk. A hangolás során lemérjük egy ismert úthossz megtételének idejét és az elhasznált energiát. A megtett úthossz idejéből kiszámíthatjuk a robot mozgási sebességét, ebből pedig a mozgás fajlagos energiáját. Az óra működését a 3.2. fejezetben fejtem ki.

1.5 A robotmodellezés szükségessége

A robot megépítése előtt előzetes szimulációkkal már jól modellezhető a robot mozgása, így a mozgás során fellépő nyomatékok és az alkatrészekre ható erőterhelések is. Az elemzés nélkül az alkatrészek túlméretezettek vagy alulméretezettek lesznek. Emiatt előfordulhat, hogy a megépített hexapod nem képes a tervezett járási stratégiát megvalósítani, vagy teljesen mozgásképtelen. A robot megépítését megelőző feladatok: optimális tömegű váz kialakítása, kiszámított energiasűrűséggel, indítónyomatékkal és üresjáratú fordulatszámú motor kiválasztása, megfelelő tulajdonságokkal rendelkező robotláb megtervezése, mozgás teljesítményfelvételének becslése valamint az energiátárolók méretezése.

A mai integrált terméktervezés egyik előnye, hogy a CAD rendszerekben az egyes tervezési fázisok párhuzamosan is futhatnak. Tehát már lehet előzetes vázat tervezni és ezzel párhuzamosan a tervezési szempontoknak leginkább megfelelő anyagot kiválasztani. Szimulációnál vége-selemes módszert alkalmazok, mellyel előre lehet becsülni mechanikai szempontból a maximális feszültségeket, így a kritikus részeket is.

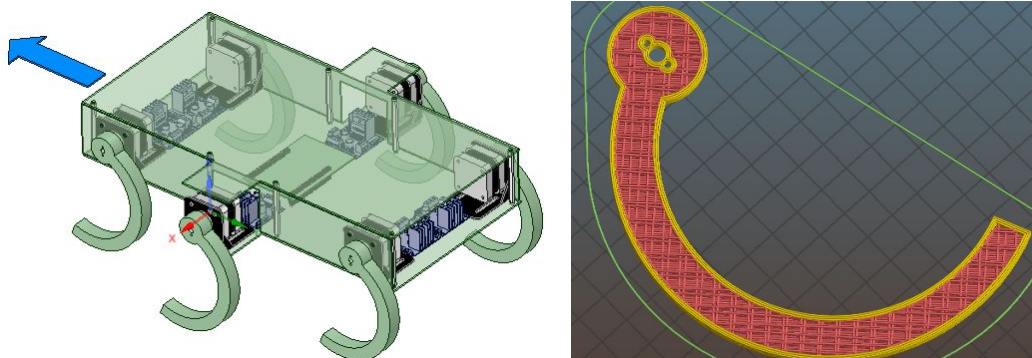
A motorméretezés az RHex-szerű hexapodoknál összetett feladat, mivel nem a megszokott alkalmazási szempontokat igényli. Motor és áttét csatlakozásának szokatlanul széles skálán kell fordulatszámot és nyomatékot átvinnie. Lassú mozgásoknál, mint az egyenetlen talajon haladás vagy lépcsőzés, nagy indítónyomaték szükséges. Ez mellett a nagyobb sebességű tevékenységek, mint a gyors futás, vagy fordulás pedig csak mérsékelt nagyságú nyomatékot igényelnek. A robotikán kívül kevés alkalmazás igényel indítónyomaték után rövid időn belül nagy üresjáratú fordulatszámot.[4] Mobilitás szempontjából a motorok kis tömege és térfogata egyaránt fontos. Megvalósításnál figyelembe kell venni a motorok teljesítményét és felépítését, mely kihat a meghajtó áramkör és a szabályozási algoritmus bonyolultságára.

A dinamikus mozgások végzéséhez, mint például a futás, a hexapod lábainak a robot testtömegétől méretezett rugóállandóval kell rendelkezniük, adott sajátfrekvenciával és csillapítással. A robot lábán ébredő mechanikai feszültség nem haladhatja meg az anyagra jellemző folyáshatárt, ugyanis akkor az anyagban maradós, plasztikus alakváltozás keletkezne. A láb kivitelezéséhez több fajta gyártási technológia közül választhatunk, mint a 3D nyomtatás, kézi laminálás, fröccsentés vagy forgácsolás.

A gyártástechnológiák több tulajdonságát érdemes párhuzamosan vizsgálni, mint például az ár, elérhetőség, összetettség, pontosság, elkészítési idő és megbízhatóság. A CAD modell és anyag mechanikai paramétereit alapján véges elemű módszerrel megállapíthatjuk, hogy melyik lábvastagság lesz az optimális az adott anyag részére. Ez mellett azt is meghatározhatjuk, hogy hol ébred a lábban a legnagyobb mechanikai feszültség.

A SimMechanics lehetőséget nyújt a járásalgoritmus, motorszabályozás és mechanika együttes szimulációjára. A kész CAD modellt beimportálhatjuk a SimMechanics környezetbe ahol dinamikus modellezést végezhetünk vele. Az elemek közötti kapcsolatokat, a talajkontaktust, a motorok vezérlését és szabályozását egyaránt megvalósíthatjuk. Emellett megvizsgálhatjuk a mechanikai elemek viselkedését és a jelentkező erőviszonyokat is, megbecsülhetjük a különböző mozgások és járási stratégiák során a motorok áramának és nyomatékának időbeli változását.

Az 2015-ös év során megpróbáltam megépíteni a Rhex-szerű hexapodot ezen elemzések nélkül. A megépítés nem járt sikerrel, de ez a kudarc számos hasznos tapasztalatot adott. Az első megállapítás, hogy fontos előzetes szimulációkat és számításokat végezni a motor indítónyomatékával kapcsolatban. A léptető motorok helyett érdemes keféss vagy kefe nélküli motorokat használni, ugyanis a léptetőmotorok tömege nagy, energiasűrűsége kicsi, alacsony fordulatszám mellett pedig nagy teljesítményfelvételük van, 12 V feszültség mellett akár 3 A is lehet. A lábgeometrián is változtatni kell a láb merevsége miatt. A hexapod testét plexiből készítettem, amely nagyobb mechanikai terhelések esetén deformálódhat vagy megrepedhet. A láb felfogatására is más módszert kell alkalmaznom. A hexapod nem épült meg, mivel a léptető motor az üres vázat sem tudta megemelni. Végkövetkeztetés, hogy egy teljesen új hexapod tervezésébe kell belekezdenem, és elemeznem kell a robot mozgását is.



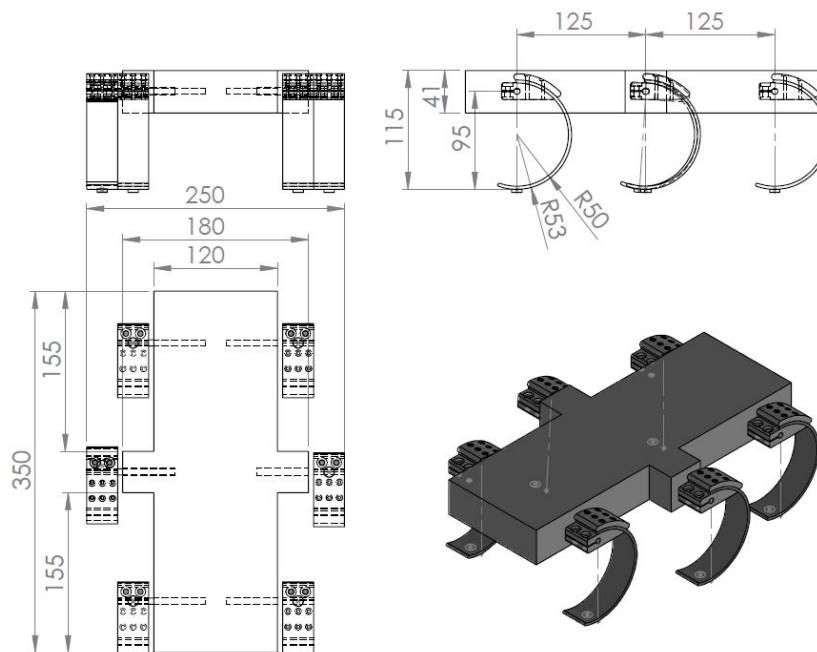
1.5.1. ábra: A próba hexapod felépítése (bal oldalt) és lába (jobb oldalt)

2 RHex-szerű robot modellezése

A CAD modellezést SolidWorks programmal végeztem. A test kialakításához a stabil mozgás érdekében fontos, hogy a súlypont a váz középpontjában legyen. A modell a robot leegyszerűsített változata, melynél a váz teljesen tömött.

A SolidWorks környezetben egy assembly-ben a robot testéhez hozzárendeltem a tengelyeket, majd ezekhez a lábtartókat és a lábat. Az alkatrészekhez a tömeget, vagy az anyagát rendeltem hozzá. A test térfogata és az anyag sűrűsége alapján a program automatikusan kiszámította a tömeget. A lábak alá elhelyeztem egy kis hengert, amely a talajkontaktus helyét adja meg. A tömeg és a dimenziók alapján meghatározom a robot láb optimális rugóállandóját, maximális terhelhetőségét, felállítom a kinematikus és dinamikus modelleket. Előszimulációkat végzek a CAD modell alapján SimMechanics-ban, melyben a mozgás során fellépő maximális nyomatékokat határozom meg. Az adott nyomatékok segítségével elvégzem a motorméretezést, majd a motorokkal és a hozzá tartozó elemekkel kibővítem a CAD modellt. A váz dimenzió alapján a láb maximális átmérője is kiszámítható.

A CAD modellező program segítségével kiszámítható, hogy a robot magassága 115.5 mm, hossza 350 mm és szélessége 250 mm. A robot össztömegét maximálisan 3 kg-ra becsülöm akkumulátorok és más tartozékokkal. Az erőkar hossza szimuláció során 95 mm, a CAD modell lábának belső átmérője 100 mm, külső pedig 106 mm.

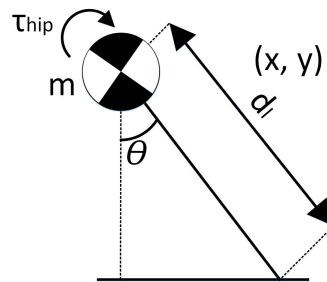


2.1.1.ábra: A CAD modell ortogonális vetületei és izometrikus nézete

2.1 Kinematika modell

CAD modellezés segítségével előre meghatározzuk a robot dimenzióit, össztömegét, súlypontjának elhelyezkedését. Ezen paraméterek alapján kidolgozhatjuk a robot kinematika, dinamikai modelljét és lábának rugómodelljét. A modelleket felhasználhatjuk a robot irányításánál, a motorok szabályozásánál és a mozgások során fellépő erők, nyomatékok kiszámításánál. A decentralizált szabályozásnál minden motor nyomatékát külön szabályozzuk.

A dinamikai modellhez nélkülözhetetlen a pontos kinematikai modell. Az egyenleteket a szagittális síkra vezetjük le, a tömeg pontszerűnek, a lábat merevnek, a súrlódást pedig elhanyagoljuk. A SLIP sablonnál a túalakú lábat használunk. A túalakú láb erőkarral modellezhető, melynek hossza d_l , szöge θ , tömege m , nyomatéka τ_{hip} .



2.1.1. ábra: A túalakú láb paraméterei

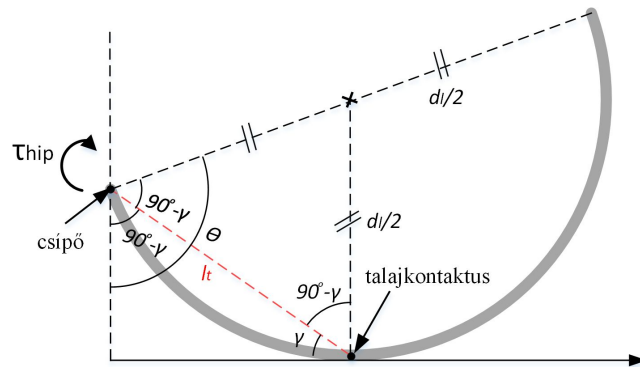
$$\tau_{hip} = d_l \cdot m \cdot \sin(\theta) \quad (2.1.1.)$$

Érdeemes megfigyelni, hogy ez az egyenlet a kiszámított nyomatékok módszerével kapott egyenlet egyszerűsített változata, ahol a szögsebesség ($\dot{\theta}$), és a szöggyorsulás ($\ddot{\theta}$) nulla a rugó pedig teljesen merev.

Az RHex láb C alakú geometriája eltér a túalaktól, mivel felkeléskor a talajkontaktus végig gördül a láb külső felületén. Ami a C alakú láb kinematikai viselkedését illeti, a túalakú láb viselkedésétől jelentősen csak a felkelés során tér el. A felkelésen kívül a többi mozgásnál a lábat túalakúnak feltételezzük. A C alakú láb előnyei a túalakú lábhoz képest, hogy mozgás közben a tömegközéppont vertikális összetevője kisebb határok között változik, felkeléskor kisebb nyomatékot igényel, mozgás közben hosszabb ideig hatunk a talajra. A képletek kidolgozásakor a C alakú láb alakját ideális félkörnek tekintjük.

Felkelés során egy virtuális erőkar segítségével számíthatjuk ki a szükséges nyomatékot, mely a robot csípője és a talajkontaktus pont között helyezkedik el. A

talajkontaktus a láb külső felületén mozog. A robot csípője körül forog a láb, melynél a nyomatékot egy DC motor segítségével biztosítjuk. [39]



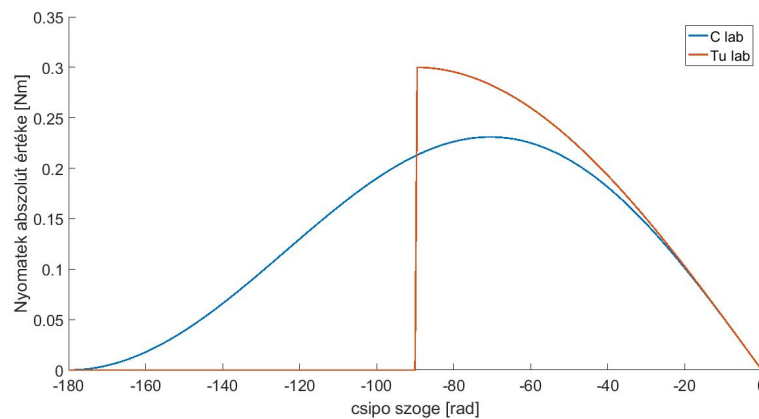
2.1.2. ábra: A C alakú láb és virtuális láb (l_t) [39]

Trigonometria segítségével a csípő szögéből, és a láb sugarából kiszámíthatjuk a virtuális erőkar hosszát (l_t). [39]

$$l_t = d_l \cos(90^\circ - \gamma) = d_l \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.1.2.)$$

A C alakú láb csípő nyomatéka a statikus modell alapján:

$$\tau_{hip} = l_t m \sin(\theta) = d_l m \sin(\pi - \theta) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.1.3.)$$

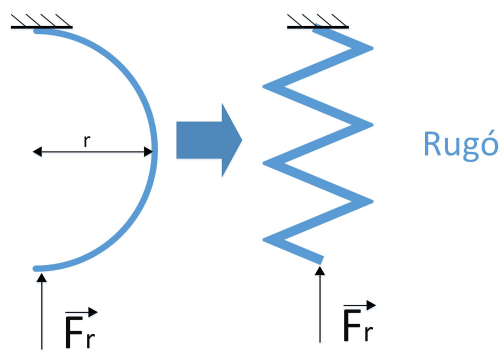


2.1.3. ábra: A C alakú láb és a túl alakú láb csípőjében fellépő nyomatékok statikus esetben a felállás során, $d=0.1$ [m], $\theta = [-180^\circ 0]$, $m = 3$ [kg] paraméterekkel

A felállás során pontszerű tömeget pontszerűnek feltételezzük. Az ábrán látható, hogy a C alakú láb kisebb maximális nyomatékot igényel mint a túl alakú láb. A túl láb ellenben csak a -90° szög után fogja a motort terhelni, mivel a láb csak ekkor érintkezik a talajjal. Szimmetrikus tulajdonságokat feltételezve $[-20^\circ 20^\circ]$ tartományon a túl láb jól közelíti a C láb viselkedését, ezért járás közben túl alakú lábat is alkalmazhatunk.

2.2 Statikus rugómodellek

A robot megfelelő dinamikus viselkedéséhez elengedhetetlenül fontos a láb statikus illetve dinamikus tulajdonságainak hangolása. Statikus esetben a legegyszerűbb a lineáris rugómodell, melyet a SLIP sablonban is alkalmaztunk. A lineáris rugóknál az erő és a deformáció arányát a Hook törvényével határozhatjuk meg, ahol F a rugóra ható erő, δ a deformáció, k pedig a rugóállandó. A lábaknál a lineáris rugóállandó számítása nélkülözhetetlen, mivel az optimális rugóállandó is lineárisan van meghatározva. A reakcióerő pontosabb approximációjánál pedig nemlineáris rugómodellt érdemes használni.



2.2.1. ábra: A félkör alakú láb, és a rugózását helyettesítő modell [11]

$$F_r = -k \cdot \delta \quad (2.2.1.)$$

A paraméterek hangolásánál, a hibanégyzetet legkisebb négyzetek módszerével minimalizáljuk. A $\hat{\mathcal{G}}$ az optimális paramétervektor, amelyet a Φ mátrix pszeudo inverze segítségével kaphatunk meg. Esetünkben a Φ mátrix a deformáció értékeket, az Y mátrix pedig a hozzá tartozó F_r erőt tartalmazza.

$$Y = \begin{pmatrix} y(1) \\ \vdots \\ y(n) \end{pmatrix}, \quad \Phi = \begin{pmatrix} \varphi(1) \\ \vdots \\ \varphi(n) \end{pmatrix} \quad (2.2.2.)$$

$$\hat{\mathcal{G}} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (2.2.3.)$$

Fontos megjegyezni, hogy ez az illesztési módszert csak akkor lehet alkalmazni, ha már vannak szimulációs vagy mérési módszerek.

A végeselemes módszer (4.2. fejezet) és a mérések alapján (4.3 fejezet) megállapítható, hogy a láb erő-elmozdulás görbéje nemlineáris, ezért a lineáris rugómodell nem megfelelő. A jelenség egyik oka, hogy a deformáció során a virtuális

rugó effektív hossza ami a lábtartó tengelyének közepe és a kontaktus pont között található, a deformáció során csökken. A legegyszerűbb eset, ha azt feltételezzük, hogy a virtuális rugó effektív hossza lineárisan csökken a deformáció növekedésével, ilyenkor négyzetes rugómodellt lehet alkalmazni:

$$F_r = -k \cdot \delta^2 \quad (2.2.4.)$$

2.3 Dinamikai modell

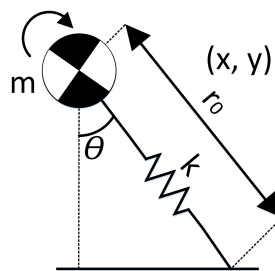
A rendszer motor nyomatékával kibővített SLIP modell mozgásegyenleteit Lagrange függvény segítségével határozhatjuk meg. A Lagrange függvény a kinetikus és a potenciális energia különbsége. Az általánosított koordináta q_i , \dot{q}_i az általánosított sebesség, a Lagrange függvény L , az általánosított nyomaték pedig τ_i .

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (2.3.1.)$$

A felírt modellt átrendezhetjük a következő alakra, ahol az M az inerciális mátrix, C a koriólisz mátrix, N a potenciális energia, τ az általánosított nyomatékok vektora.

$$M(q)\ddot{q} = -C(q, \dot{q})\dot{q} - N(q) + \tau \quad (2.3.2.)$$

A bővített SLIP modell mozgását a szagittális síkban vizsgáljuk (2.3.1. ábra). A tömeget pontszerűnek tekintjük, a lábat lineáris rugónak tekintjük, a súrlódást pedig elhanyagoljuk. Általános koordinátaként a rugó hosszát (r) és a láb szögét (θ) veszem, így $q = (r \ \theta)^T$.



2.3.1. ábra: A SLIP modell

A sablon kinetikus energiája:

$$T = \frac{m}{2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2) \quad (2.3.3.)$$

A sablon potenciális energiája:

$$V = mgr \cos(\theta) + \frac{k}{2} (r - r_0)^2 \quad (2.3.4.)$$

Általános koordináták:

$$q = \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.3.5.)$$

A Laplace függvény:

$$L = T - V = \frac{m}{2}(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2) - mgr \cos(\theta) - \frac{k}{2}(r - r_0)^2 \quad (2.3.6.)$$

$$L = \frac{m}{2}(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2) - mgr \cos(\theta) - \frac{k}{2}(r^2 - 2rr_0 + r_0^2)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} = m\ddot{r}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = mr^2\ddot{\theta} + 2mr\dot{r}\dot{\theta} \quad (2.3.7.)$$

$$\frac{\partial L}{\partial r} = mr\dot{\theta}^2 - mg \cos(\theta) - k(r - r_0)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -mg \sin(\theta)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} - \frac{\partial L}{\partial r} = m\ddot{r} - mr\dot{\theta}^2 + mg \cos(\theta) + k(r - r_0) = 0 \quad (2.3.8.)$$

$$m\ddot{r} = mr\dot{\theta}^2 - mg \cos(\theta) - k(r - r_0)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = mr^2\ddot{\theta} + 2mr\dot{r}\dot{\theta} - mgr \sin(\theta) = \tau_{hip} \quad (2.3.9.)$$

$$mr^2\ddot{\theta} = -2mr\dot{r}\dot{\theta} + mgr \sin(\theta) + \tau_{hip}$$

$$\tau_{hip} = mr^2\ddot{\theta} + 2mr\dot{r}\dot{\theta} - mgr \sin(\theta)$$

Az egyenletek átrendezve:

$$\ddot{r} = r\dot{\theta}^2 - g \cos(\theta) + \frac{k}{m}(r_0 - r) \quad (2.3.10.)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{2}{r}\dot{r}\dot{\theta} + \frac{g}{r} \sin(\theta) + \frac{\tau_{hip}}{mr^2} \quad (2.3.11.)$$

Mátrixos formában:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & mr^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & -mr \\ 2mr\dot{r}\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} mg \cos(\theta) - k(r_0 - r) \\ mgr \sin(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tau \quad (2.3.12.)$$

Az egyenlet a következő alakra hozható, ahol $M(q)$ az inercia mátrixa, $C(q, \dot{q})$ a koriólisz mátrix, $N(q)$ pedig a potenciális energia:

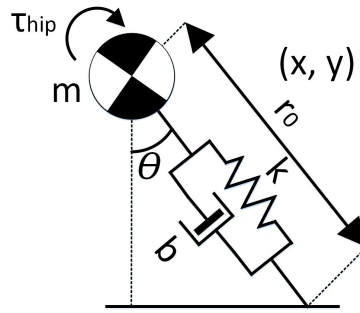
$$M(q)\ddot{q} = -C(q, \dot{q})\dot{q} - N(q) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tau \quad (2.3.13.)$$

$$M(q) = \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & mr^2 \end{pmatrix}, C(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} 0 & -mr \\ 2mr\dot{\theta} & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.3.14.)$$

$$N(q) = \begin{pmatrix} mg\cos(\theta) - k(r_0 - r) \\ mg\sin(\theta) \end{pmatrix}$$

A csuklók nyomatékát a kiszámított nyomatékok módszerével határozhatjuk meg:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + N(q) \quad (2.3.15.)$$



2.3.2. ábra: A rugó viszkózus súrlódással bővített SLIP modell

A rendszeregyenletet kibővíthetjük a rugó viszkózus súrlódással:

$$\ddot{r} = r\dot{\theta}^2 - g\cos(\theta) + \frac{k}{m}(r_0 - r) - \frac{b}{m}\dot{r} \quad (2.3.16.)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{2}{r}\dot{r}\dot{\theta} + \frac{g}{r}\sin(\theta) + \frac{\tau_{hip}}{mr^2} \quad (2.3.17.)$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & mr^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} 0 & -mr + b \\ 2mr\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} mg\cos(\theta) - k(r_0 - r) \\ mgr\sin(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tau \quad (2.3.18.)$$

$$M(q) = \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & mr^2 \end{pmatrix}, C(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} 0 & -mr + b \\ 2mr\dot{\theta} & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.3.19.)$$

$$N(q) = \begin{pmatrix} mg\cos(\theta) - k(r_0 - r) \\ mgr\sin(\theta) \end{pmatrix}$$

2.4 Dinamikus rugómodell

Mozgás modellezésénél a rugóállandó mellett fontos szerepet játszik a sajátfrekvencia és a csillapítás. A rugók feladata:

- A láb és a talaj ütközésekor jelentkező nagyfrekvenciás vibrációk elnyelése mielőtt a lábban található érzékelőket terhelné.

- A járás közben jelentkező alacsony frekvenciájú lengések minimalizálása, valamint az energia esetleges visszatáplálása.

- Esésnél jelentkező nagyobb erőbehatások elnyelése.

A leírt célok elérésének érdekében meg kell határozni a láb rugóállandóját illetve csillapítási tényezőjét. [41]

A rugó dinamikus viselkedése a csillapított harmonikus oszcillátor differenciaegyenletével írható le, ahol m a test tömege, χ a rugó deformációja, k a rugóállandó és b a csillapítás [36].

$$m\ddot{\chi} + b\dot{\chi} + k\chi = 0 \quad (2.4.1.)$$

A rendszer sajátfrekvenciája: [42]

$$f_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.4.2.)$$
$$\omega_k = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

A kritikus csillapítási tényező, ahol a rendszer megszűnik rezegni: [42]

$$b_k = 2\sqrt{km} \quad (2.4.3.)$$

A rendszer csillapítási viszonya: [42]

$$\zeta_r = \frac{b}{2\sqrt{km}} \quad (2.4.4.)$$

A csillapított rendszer differenciaegyenletének megoldása, ahol ϑ_r a fáziszöge, X pedig a kezdeti kitérés: [41]

$$\chi(t) = X e^{-\zeta_r \omega_k t} \cos(\sqrt{1 - \zeta_r^2} \omega_k t - \vartheta_r) \quad (2.4.5.)$$

A csillapított rezgés sajátfrekvenciája (f_{cs}) eltér a csillapítatlan rendszer sajátfrekvenciájától. A gyakorlatban a $\zeta \ll 1$, ami miatt a csillapítási viszony kicsi, vagyis az eltérés elhanyagolható.

$$f_{cs} = 2\sqrt{1-\zeta^2} f_k \quad (2.4.6.)$$

Az oszcillátor kinetikus energiája T , potenciális energiája V , összenergiája pedig η_{HO} .

$$\begin{aligned} T(\dot{\chi}) &= \frac{1}{2} m \dot{\chi}^2 \\ V(\chi) &= \frac{1}{2} k \chi^2 \\ \eta_{HO} &= T(\dot{\chi}) + V(\chi) \end{aligned} \quad (2.4.7.)$$

A [36] levezetés alapján meghatározható, hogy az oszcillátor teljes energiájának csökkenése az idő függvényében:

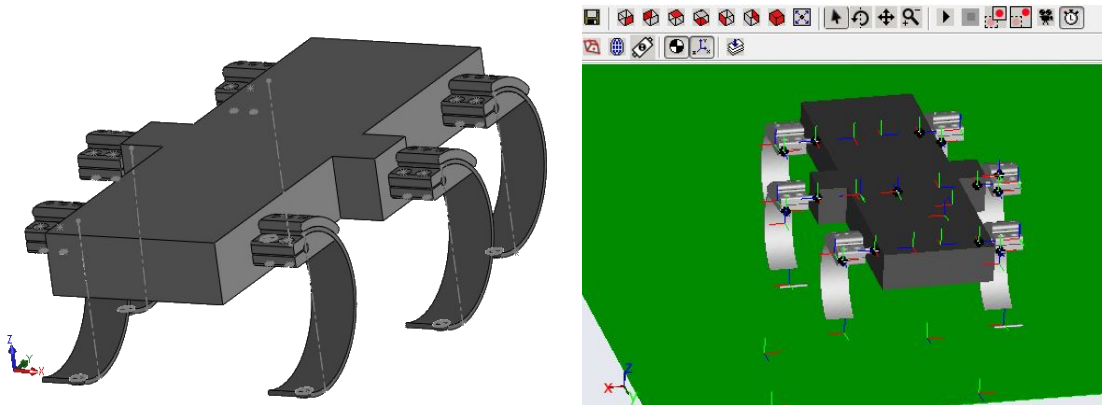
$$\dot{\eta}_{HO} = -b \dot{\chi}(t)^2 \quad (2.4.8.)$$

A csillapított rezgéseknél a viszkózus súrlódás csak pozitív lehet, vagyis $b > 0$, ezért az egyenletből megállapítható, hogy az oszcillátor energiája az időben csak csökkenhet. [36] A b paraméter hangolásával meghatározhatjuk, hogy a rendszer milyen gyorsan nyelje el a vibrációkat. A kapott modellek és egyenletek pontosságát a szimulációk és a mérés során ellenőrizzük.

3 SimMechanics modell

A járásalgorithmus, a motorszabályozás és a mechanika együttes szimulációját SimMechanics környezetben végezzük az importált CAD modellel. A szimuláció segítségével optimalizálhatjuk a járásalgorithmust, az energiaveszteségeket és a szabályozók paramétereit. Az első szimuláció célja, hogy a mozgás során fellépő nyomatékokat meghatározzuk, amely alapján a motorméretezést végezzük. A motorméretezés után a robot CAD modelljét kibővítjük.

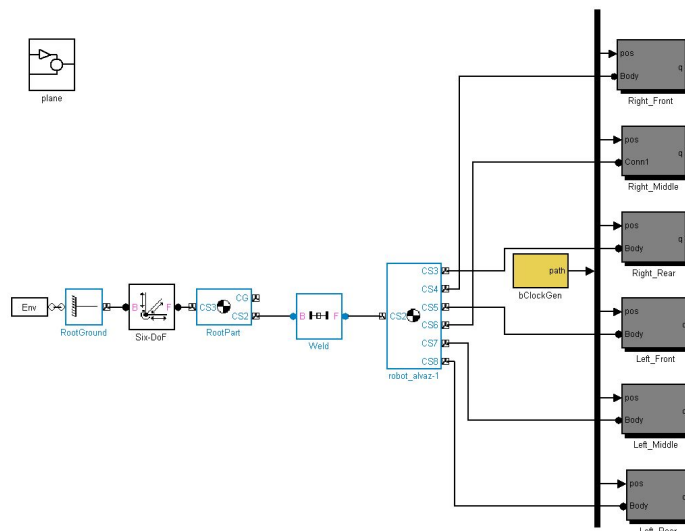
Első lépésként egy leegyszerűsített modellt rajzoltam ahol a robot teste teljesen tömött. A SolidWorks környezetben egy assembly-t készítettem, ahol a robot testéhez hozzárendeltem a tengelyeket, majd ezekhez a lábtartókat és a lábat. A lábak aljára elhelyeztem egy kis hengert, amely a talajkontaktus helyét adja meg.



3.0.1. ábra: A testtömeg, és a rugóállandó aránya [11]

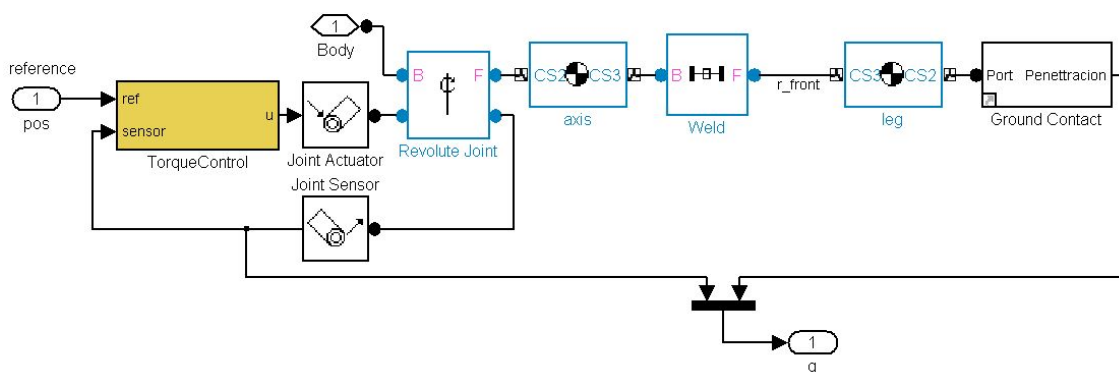
A SolidWorks által exportált .xml adatstruktúrából egy paranccsal simulink modellt lehet készíteni. Alapból a robot nem mobilis mivel a CAD fájlban a robot teste le van rögzítve. Ezt a rögzítést egy 6 szabadságfokú (DOF) csuklóval helyettesítettem, mely egyaránt engedi a transzverzális és a rotációs elmozdulást. A lábak végéhez egy csillapított rugó-tömeg rendszert tartalmazó talajkontaktust illesztettem hozzá.

A modellezést SimMechanics első generációs blokkokkal végeztem. Az exportálás előtt figyelembe kell venni azt is, hogy alapból a SolidWorks és a SimMechanics más báziskoordináta-rendszer beállításokkal működik.



3.0.2. ábra: Az importált SimMechanics modellt átrendezés után

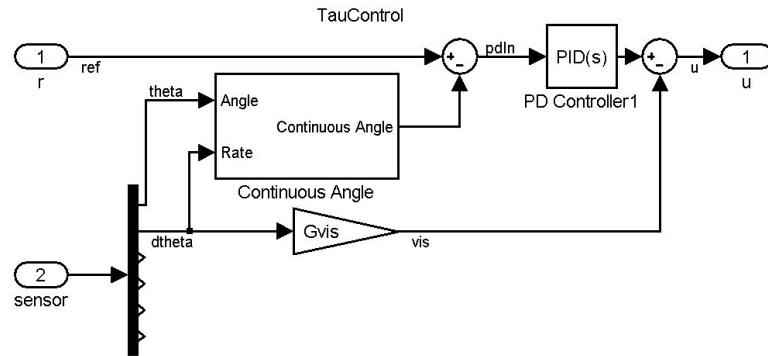
A robot irányításához a csuklók mellé aktuátorokat és szenzorokat kell rendelni. A csuklók szabályozására decentralizált szabályozást valósítottam meg, ahol minden csuklót külön szabályozok. A szabályozókörrrel kiegészített láb felépítése a 3.0.3. ábrán látható. A csukló nyomatékát a „*Torque Control*” blokk szabályozza, a beavatkozó szerv a „*Joint Actuator*”, az érzékelő pedig a „*Joint sensor*”. A csukló érzékelőjéből ki lehet olvasni a csukló szögpozícióját, szögsebességét, szöggyorsulását, és nyomatékát. A csukló érzékelője a csukló szögére $[-180^\circ, 180^\circ)$ értéket ad le. A talajkontaktus kimenete a behatolás, amely a láb vége és a talaj közti távolságot adja meg a z tengelyen. Negatív érték esetén a rugós láb deformálódik, a deformációval arányosan pedig visszahat a testre.



3.0.3. ábra: A robot jobb első lábának SimMechanics modellje felül

A pályakövetést egy kézzel hangolt PID szabályozó biztosítja, amely a „*TorqueControl*” blokkban található. A folyamatos mozgás érdekében az 180° és a -180° közötti átváltásokat a „*Continuous Angle*” blokkal kezeltem, melynek bemenete a

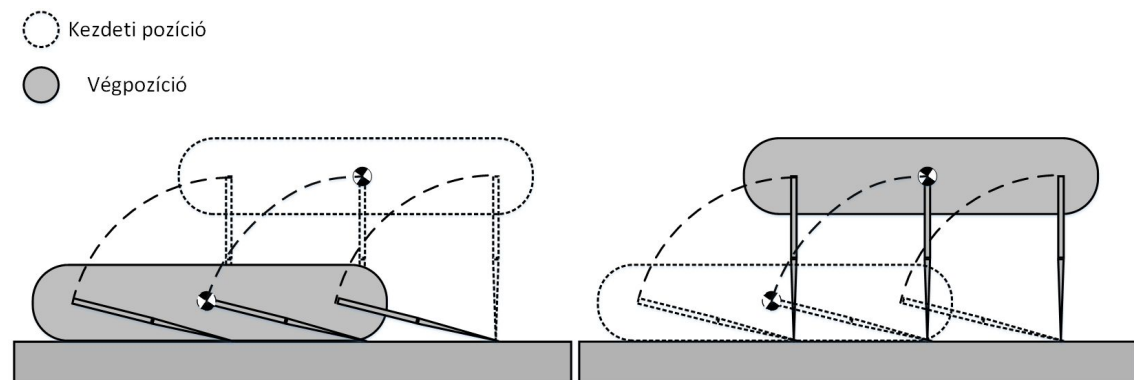
csukló szögpozíciója és a sebessége, a kimenete pedig az átváltás helyett tovább növekszik. A csapágyakban fellépő viszkózus súrlódást a szögsebesség negatív visszacsatolásával modellezem, mely erősítése G_{vis} . A viszkózus súrlódás a rendszerben a mozgás során fellépő oszcillációk lecsengését is gyorsítja, mely hatására a mechanikai szimuláció futási ideje csökken. Nagy G_{vis} erősítés esetén az eredmények torzulnak. Hangolásakor az eredményeknél a minimális torzulás mellett a legkisebb futási időre törekedtem.



3.0.4. ábra: A robot jobb lábának szabályzó köre

3.1 Nyomatékok lefekvés és felállás közben

Első feladatként a robot lefekvését és felállását valósítottam meg. Ebben az esetben a bal és jobb virtuális láb alapjele minden időpillanatban megegyezik. A mozdulat két eseményből áll: lefekszik, majd feláll. Az események pontos azonosításával meghatározható, hogy mely esemény igényel maximális nyomatékot.



3.1.1. ábra: A robot mozgásának fázisai: földetérés, lefekvés és felállás

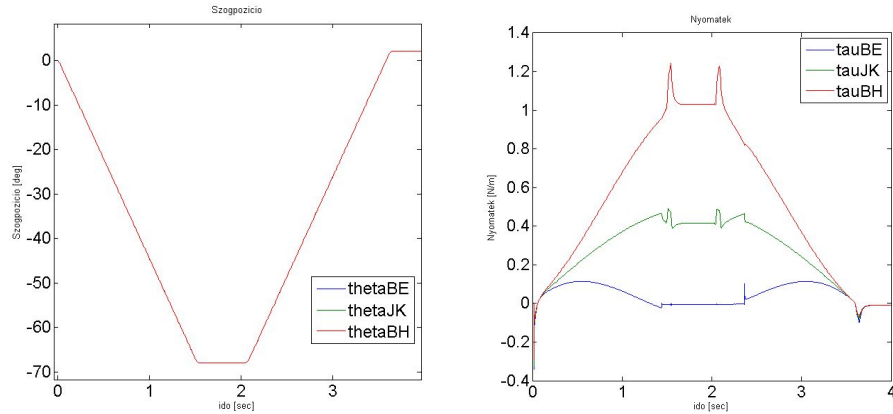
A robot dimenziói alapján a trigonometriai azonossággal kiszámítottam, hogy fekvő helyzetben a robot csípőjének szöge -70° . Így az csípő alapjele a mozdulatsor első

fázisában 0-ról -70° -ra csökken, majd a második fázisban -70° -ról 0-ra növekszik.

A szimuláció általános paramétereit:

$K = 1000; [N/m]$	<i>rugóállandó</i>	$floor = 0.18;$	<i>a talaj eltolása</i>
$C = 100;$	<i>rugó csillapítási tényezője</i>	$m = 3; [kg]$	<i>a robot tömege</i>
$nux = 1;$	<i>csillapítási együttható</i>	$r_0 = 0.095; [m]$	<i>a rugó hossza</i>
$nuy = 1;$	<i>csillapítási együttható</i>	$tau = 0.4;$	<i>a szűrő paraméter</i>

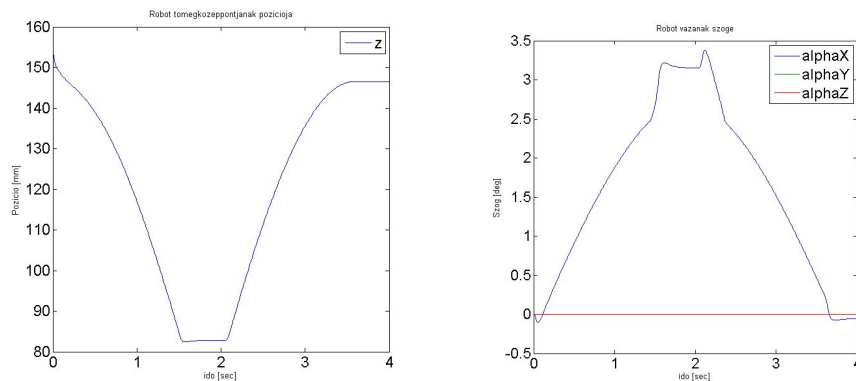
3.1.1. táblázat: A lefekvés és felállás szimulációs paramétereit



3.1.2. ábra: A robot csípőjének szögpozíciója bal oldalt és nyomatéka jobb oldalt

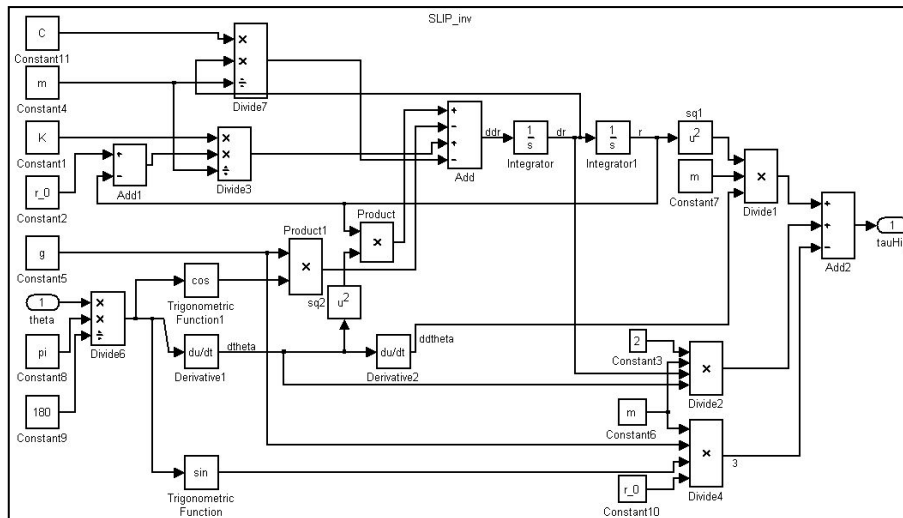
A nyomaték időbeli változásából egyértelműen azonosítani lehet az eseményeket. Lefekvés közben lassan növekszik a nyomaték, felkelés közben pedig fokozatosan csökken a csukló szögétől függően.

A mozgás során a három csípő szöge, szögsebessége és szöggyorsulása nagyon hasonló, viszont nyomatéka jelentősen eltér. A csípő nyomatékoknak oka, hogy felkelés vagy lefekvés közben a szagittális síkon a robot váza kissé megdől. Ezt a jelenséget ágaskodásnak nevezik. A bal hátsó (BH) csípőn 1.242 Nm, a jobb középsőn a 0.4924 Nm, ami fele az előző értéknek, a bal elsőn (BE) pedig 0.1141 Nm nyomaték ami tízszer kisebb mint a bal hátsó csukló nyomatéka. Ha a robot mozgásának iránya ezzel ellentétes, akkor a bal első csípőn jelentkezik a legnagyobb nyomaték.

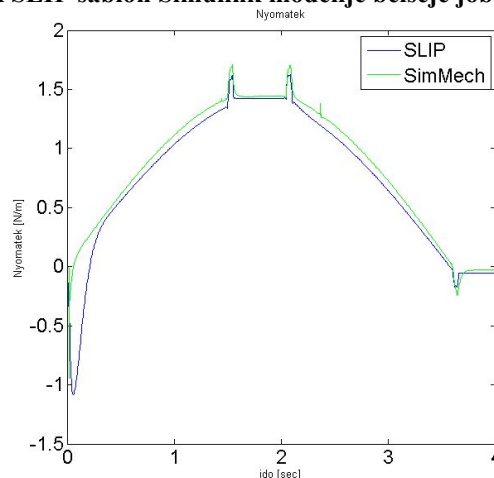


3.1.3. ábra: A robot tömegközéppontjának z pozíciója és a váz dőlésének szöge a mozgás során

A kiszámított nyomatékok módszerével a SLIP sablon differenciaegyenlete alapján meghatároztam a virtuális lábakon jelentkező összegzett nyomatékot. A SLIP sablon szimulációja során a tömeget pontszerűnek, a lábak között a nyomaték eloszlását pedig szimmetrikusnak tekintem, a súrlódást elhanyagoltam. A sablon bemenete a csukló jele, kimenete pedig a csukló nyomatéka.



3.1.4. ábra: A SLIP sablon Simulink modellje belseje jobb oldalt



3.1.5. ábra: A SLIP sablon Simulink modellének belseje a differenciaegyenlet alapján

A bal virtuális láb nyomatékának számításánál a szimmetria miatt a SLIP modellnél a tömeget felére vettem. Összehasonlításnál a SimMechanics modellben a jobb első, középső és hátsó lábakon fellépő nyomatékot összeadtam. A kezdeti negatív nyomaték a láb rugóállandójának függvénye. A nagyobb nyomatékváltozások a test gyorsulásnál és lassulásnál jelentkeznek.

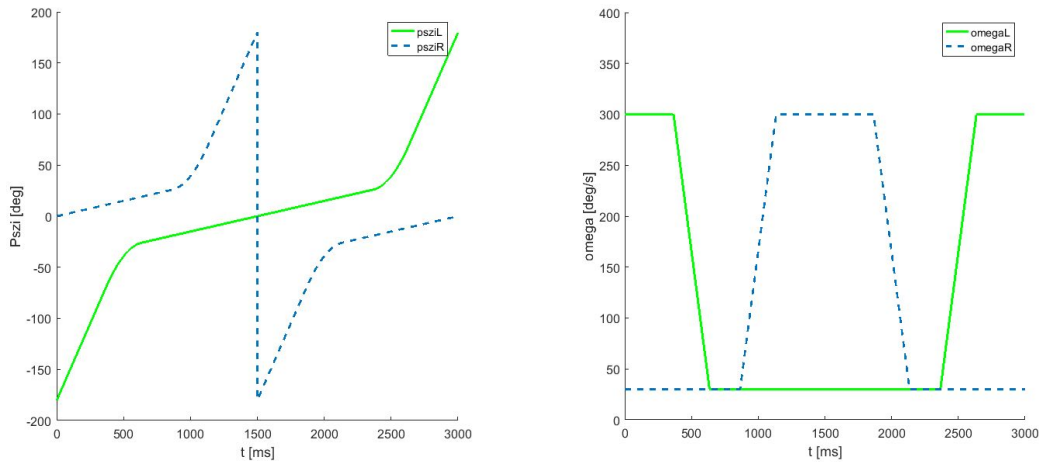
A csuklókon főként a statikus nyomatékok jelentkeznek, mivel a csípők sebessége végig alacsony marad. A pontos motorméretezés érdekében a nyomatékot nagyobb dinamikával rendelkező mozgásoknál is meg kell határozni, mint a járás vagy a futás.

3.2 Nyomatékok járás és futás közben

A robot járásánál a bal és jobb virtuális lábak aktív vagy szabadon forgó állapotban lehetnek. A korábban leírtak alapján aktív állapot a láb a talajjal érintkezik, szabadon forgó állapotban pedig a levegőben van. A járást az különbözteti meg a futástól, hogy itt mindig legalább az egyik láb a talajjal érintkezik. A lábak alapjelének generálását a Buehler órájának módszerével végzem, melyet a 3.2. fejezetben fejtek ki. Az alapparaméterek az aktív állapot hossza (Ψ_s), az aktív állapot ideje (t_s), a periódus hossza (t_p), és a szöggyorsulás (α). A virtuális láb aktív állapotban ω_{stance} , szabadon forgó állapotban pedig ω_{flight} szögsebességgel forog. A gyorsulások kézbentartása érdekében a sebességek váltásának meredekségét az adott gyorsulás értéke alapján határozom meg.

A két állapot szögsebességei:

$$\begin{aligned}\omega_{stance} &= \frac{\Psi_s}{t_s} \\ \omega_{flight} &= \frac{360^\circ - \Psi_s}{t_p - t_s}\end{aligned}\quad (3.2.2.)$$



3.2.1. ábra: A szögpozíció és a szögsebesség változása egy perióduson belül

A sebesség változásának időpillanatai:

$$\begin{aligned}t_{l1} &= \frac{t_p - t_s}{2} - \frac{\omega_{flight} - \omega_{stance}}{2a} & t_{r1} &= \frac{t_s}{2} - \frac{\omega_{flight} - \omega_{stance}}{2a} \\ t_{l2} &= \frac{t_p - t_s}{2} + \frac{\omega_{flight} - \omega_{stance}}{2a} & t_{r2} &= \frac{t_s}{2} + \frac{\omega_{flight} - \omega_{stance}}{2a} \\ t_{l3} &= \frac{t_p + t_s}{2} - \frac{\omega_{flight} - \omega_{stance}}{2a} & t_{r3} &= t_p - \frac{t_s}{2} - \frac{\omega_{flight} - \omega_{stance}}{2a} \\ t_{l4} &= \frac{t_p + t_s}{2} + \frac{\omega_{flight} + \omega_{stance}}{2a} & t_{r4} &= t_p - \frac{t_s}{2} + \frac{\omega_{flight} + \omega_{stance}}{2a}\end{aligned}\quad (3.2.1.)$$

A virtuális lábak szöge a kiszámított időpillanatokban α szöggyorsulás mellett:

$$\begin{aligned}
 \Psi_l(t_{11}) &= -180^\circ + \omega_{flight} t_{11} \\
 \Psi_l(t_{12}) &= -180^\circ + \Psi_l(t_{11}) + \omega_{flight}(t_{12} - t_{11}) - \frac{\alpha(t_{12} - t_{11})^2}{2} \\
 \Psi_l(t_{13}) &= -180^\circ + \Psi_l(t_{12}) + \omega_{stance}(t_{13} - t_{12}) \\
 \Psi_l(t_{14}) &= -180^\circ + \Psi_l(t_{13}) + \omega_{stance}(t_{14} - t_{13}) + \frac{\alpha(t_{14} - t_{13})^2}{2} \\
 \Psi_l(t_p) &= -180^\circ + \Psi_l(t_{14}) + \omega_{flight}(t_{14} - t_{13})
 \end{aligned} \tag{3.2.2}$$

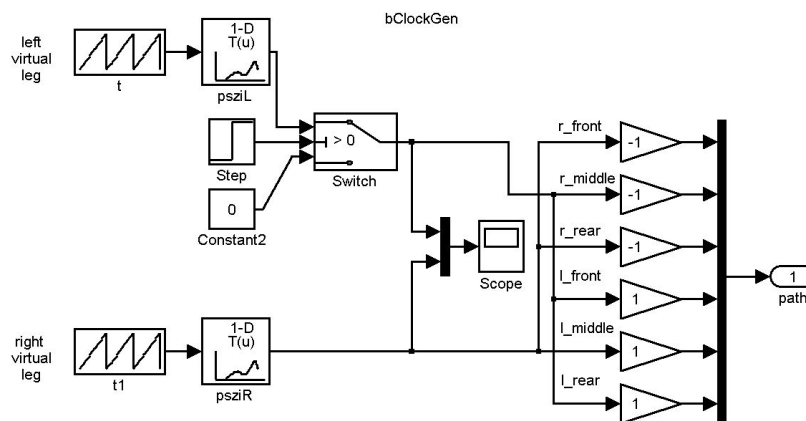
$$\begin{aligned}
 \Psi_r(t_{r1}) &= t_{p1} \omega_{stance} \\
 \Psi_r(t_{r2}) &= \Psi_r(t_{r1}) + \omega_{stance}(t_{r2} - t_{r1}) + \frac{\alpha(t_{12} - t_{r1})^2}{2} \\
 \Psi_r(t_{r3}) &= -180^\circ + \Psi_r(t_{r2}) + \omega_{flight}(t_{r3} - t_{r2}) \\
 \Psi_r(t_{r4}) &= -180^\circ + \Psi_r(t_{r3}) + \omega_{flight}(t_{r4} - t_{r3}) - \frac{\alpha(t_{r4} - t_{r3})^2}{2} \\
 \Psi_r(t_p) &= -180^\circ + \Psi_r(t_{r4}) + \omega_{stance}(t_{r4} - t_{r3})
 \end{aligned} \tag{3.2.3}$$

A virtuális lábak szöge az idő függvényében:

$$\Psi_l(t) = \begin{cases} -180^\circ + \omega_{flight} t & , ha t \in [0, t_{11}) \\ -180^\circ + \Psi_l(t_{11}) + \omega_{flight}(t - t_{11}) - \frac{\alpha(t - t_{11})^2}{2} & , ha t \in [t_{11}, t_{12}) \\ -180^\circ + \Psi_l(t_{12}) + \omega_{stance}(t - t_{12}) & , ha t \in [t_{12}, t_{13}) \\ -180^\circ + \Psi_l(t_{13}) + \omega_{stance}(t - t_{13}) + \frac{\alpha(t - t_{13})^2}{2} & , ha t \in [t_{13}, t_{14}) \\ -180^\circ + \Psi_l(t_{14}) + \omega_{flight} t & , ha t \in [t_{14}, t_p) \end{cases} \tag{3.2.4}$$

$$\Psi_r(t) = \begin{cases} \omega_{stance} t & , ha t \in [0, t_{r1}) \\ \Psi_r(t_{r1}) + \omega_{stance}(t - t_{r1}) + \frac{\alpha(t - t_{r1})^2}{2} & , ha t \in [t_{r1}, t_{12}) \\ \Psi_r(t_{r2}) + \omega_{flight}(t - t_{r2}) & , ha t \in [t_{r2}, t_p / 2) \\ -180^\circ + \Psi_r(t_{r2}) + \omega_{flight}(t - t_{r2}) & , ha t \in [t_p / 2, t_{13}) \\ -180^\circ + \Psi_r(t_{r3}) + \omega_{flight}(t - t_{r3}) - \frac{\alpha(t - t_{r3})^2}{2} & , ha t \in [t_{13}, t_{14}) \\ -180^\circ + \Psi_r(t_{r4}) + \omega_{stance}(t - t_{r4}) & , ha t \in [t_{14}, t_p) \end{cases} \tag{3.2.5}$$

A szimuláció során a robot három teljes lépést tesz. A virtuális bal láb fél periódussal később indul mint a jobb, mely időzítése egy kapcsolóval lett megoldva (3.2.2. ábra). A robot lábainak összehangolása érdekében a jobb oldali csuklók ellentétes előjellel kapják meg a virtuális láb jelét. A két virtuális láb pályájának diszkrét időpillanatokban felvett értékeit két vektor tartalmazza, melyek egy MATLAB szkript által lettek létrehozva. A vektorok alapján a pálya folyamatos értékét egy 1 dimenziós LUT (Lookup Table) generálja. Fontos megjegyezni, hogy egyenletes gyorsulás vagy lassulás esetén a pozíció négyzetesen változik. „Repeating table” használatakor a pontok között lineáris interpoláció van, mely ezekre a szakaszokra nem megfelelő. A LUT blokknál lehetőség van „Cubic spline” interpoláció alkalmazására, ami képes a nemlineáris pozíciót is jól interpolálni.



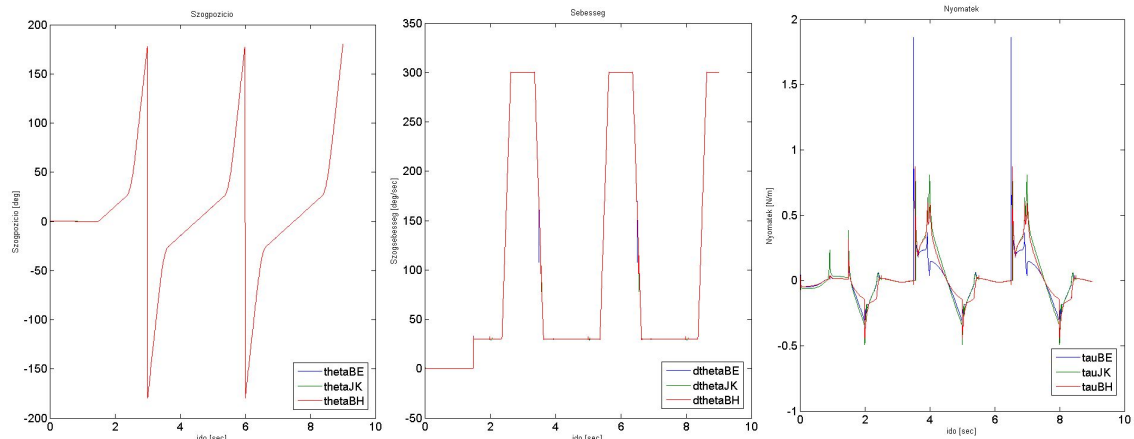
3.2.2. ábra: A virtuális lábak pályájának generálására szolgáló blokk belseje

A szimuláció paraméterei:

<i>Általános paraméterek</i>	<i>Pályagenerálás paraméterei</i>
$K = 1000; [N/m]$ rugóállandó	$t_p = 3.0; [s]$ egy periódus hossza
$C = 100;$ csillapítási tényező	$t_s = 2/3 * t_p;$ aktív üzemmód hossza
$nux = 1;$ súrlódási együttható	$p_{sziS} = 60; [deg]$ az aktív üzemmód szöge
$muy = 1;$ súrlódási együttható	$RES=1000;$ pályagenerálás felbontása
$floor = 0.18;$ talaj ofsztet	
$m = 3; [kg]$ a robot tömege	
$tau=0.4;$ a szűrő paraméter	

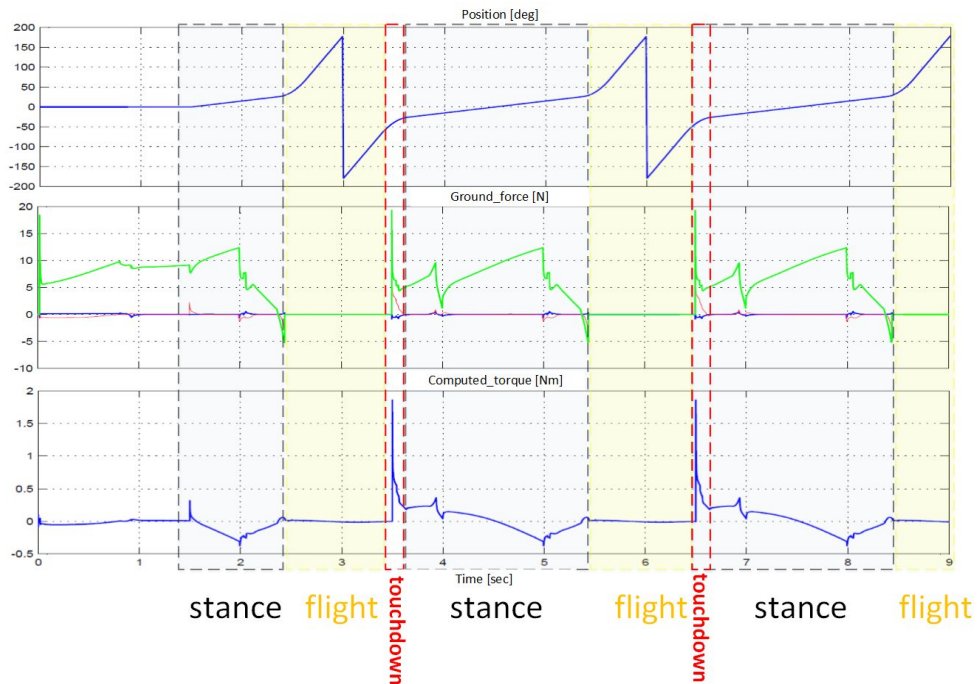
3.2.1. táblázat: A robot járásának szimulációs paraméterei

A robot járása közben a bal első (BE), jobb középső (JK) és a bal hátsó (BH) lábakhoz tartozó szimuláció eredményei:



3.2.3. ábra: A csukló szöge (bal oldalt) és sebessége (középen) és a csuklók nyomatéka az idő függvényében

A járás során mindhárom csípő szöge, szögsebessége nagyon hasonló, viszont nyomatéka jelentősen eltér. Mozgás közben a bal első lábon maximálisan 1.8589 Nm, a jobb középső lábon 0.8064 Nm a bal hátsó lábon 0.8694 Nm jelentkezik. A szimulációban a robot 46.76 mm/s átlagsebességgel mozog az y tengelyen, ami megközelítőleg 0.13 testhossz/másodpercrek felel meg. A csuklópozíciójának, a talaj reakcióerejének és a csuklónyomatékának időbeli eloszlása a 3.2.4.-es ábrán látható.



3.2.4. ábra: Járás közben a csukló szöge (legföül) a föld reakcióereje (középen) és a csukló nyomatéka (legalul) az idő függvényében

A szimulációs eredményeket a 3.2.2. táblázatban láthatjuk, ahol T a lépés periódusának hossza, τ_{max} a csuklóban fellépő maximális nyomaték, ω_{max} csuklók maximális szögsebessége, v_{atl} pedig a tömegközéppont átlagsebessége.

T = 1 [s]	k=500	k=1000	k=2000
τ_{max} [Nm]	10.443	6.441	3.4636
ω_{max} [°/sec]	905.611	905.847	905.662
ω_{max} [RPM]	150.932	150.974	150.944
v_{atl} [mm/sec]	160.835	144.263	138.141

T = 3 [s]	k = 500	k = 1000	k = 2000
τ_{max} [Nm]	3.229	1.858	0.874
ω_{max} [°/sec]	300.569	300.339	300.356
ω_{max} [RPM]	50.0948	50.056	50.0593
v_{atl} [mm/sec]	47.413	46.732	46.0896

T = 2 [s]	k = 500	k = 1000	k = 2000
τ_{max} [Nm]	3.660	2.475	1.595
ω_{max} [°/sec]	450.494	450.387	450.482
ω_{max} [RPM]	75.082	75.064	75.0804
v_{atl} [mm/sec]	74.010	75.462	73.789

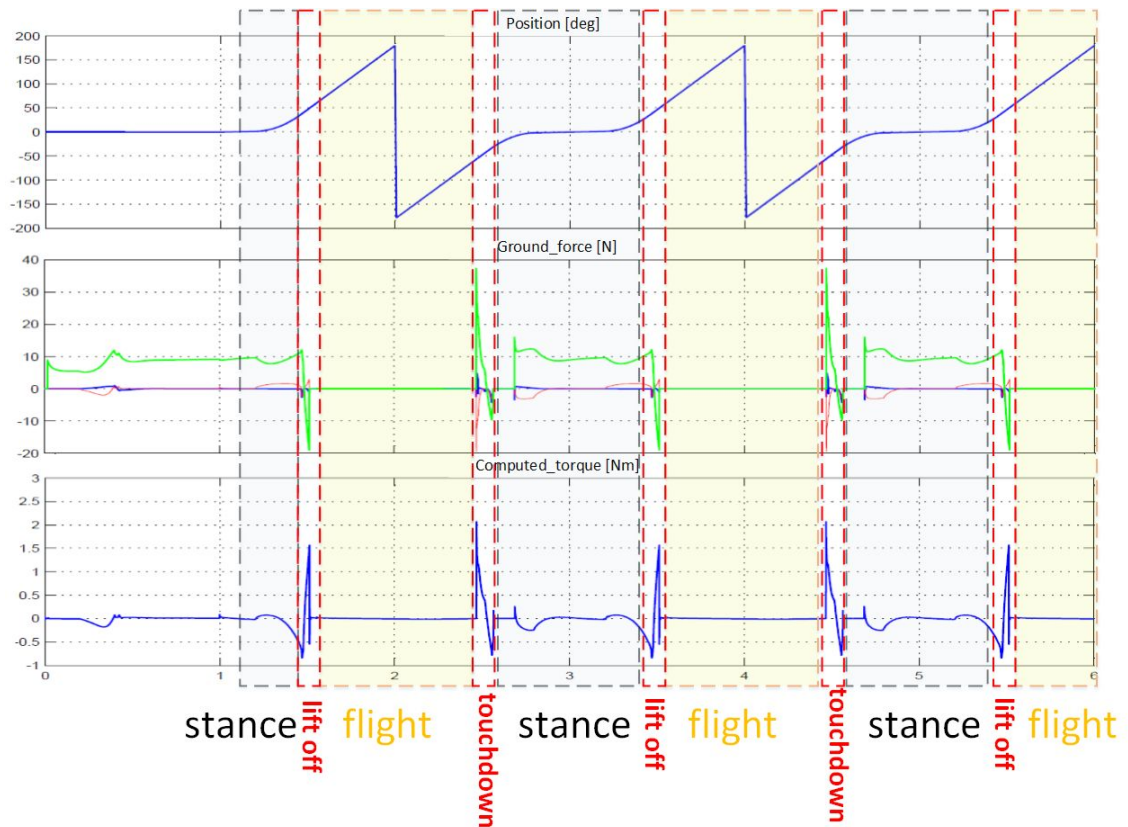
T = 4 [s]	k = 500	k = 1000	k = 2000
τ_{max} [Nm]	3.122	1.6442	0.5749
ω_{max} [°/sec]	234.551	225.697	225.539
ω_{max} [RPM]	39.091	37.616	37.589
v_{atl} [mm/sec]	32.613	33.458	33.631

3.2.2. táblázat: A robot járásának szimulációs eredményei különböző periódus hossza és rugóállandóra

A pozíció és a föld reakcióereje alapján (3.2.5. ábra) meghatározható, hogy a maximális nyomatékok a láb földetérésekor (touchdown) jelentkeznek. A szimulációs eredmények és a fizikai összefüggések alapján megállapítható, hogy ez a nyomaték csökkenthető a pályagenerálási paraméterek (Ψ_s , t_s , t_p , α) hangolásával, a robot össztömegének, csuklók gyorsulásainak, erőkar hosszának (láb átmérője), és a rugó csillapításának csökkentésével, vagy a láb rugóállandójának növelésével.

A futás abban különbözik a járástól, hogy a lépés egy periódusán belül mindkét virtuális láb a levegőben van. Ilyen esetben a mozgás nagyobb rotor forgási sebességet és nyomatékokat igényel. Esetemben a futásnál a járáshoz képes kisebb nyomatékok jelentkeztek, mert a Ψ_s , t_s járási paramétereket változtattam. A mozgási sebesség az előszimulációnál nem játszik fontos szerepet.

Futásnál a járással ellentétben a mozgás nem csak a földetéréskor igényel nagy nyomatékot, hanem a talaj elhagyásakor is (3.2.5. ábra). Felemelkedésnél a rugó visszatáplálja a földetéréskor felvett energiát, így segíti a robot mozgását. A szimuláció igazolja az 1.4. fejezetben részletezett állítást, miszerint az egyszerű passzív járás esetén a merev láb előnyösebb mivel járás során kisebb maximális nyomatékot igényel a rugós lábhoz képest. Ennek ellenére dinamikusabb mozgásoknál a merev láb elvesztette az előnyét és a rugós láb bizonyult hatékonyabbnak mivel a mozgás során nagyobb az átlagsebessége és kisebb a nyomatékigénye.



3.2.5. ábra: Futás közben a csukló szöge (legfölül) a föld reakcióereje (középen) és a csukló nyomatéka (lent) az idő függvényében

T = 1 [s]	k=500	k=1000	k=2000	T = 2 [s]	k = 500	k = 1000	k = 2000
τ_{\max} [Nm]	3.744	3.834	4.045	τ_{\max} [Nm]	2.115	2.165	2.719
ω_{\max} [°/sec]	615.235	586.011	545.352	ω_{\max} [°/sec]	331.836	335.629	336.766
ω_{\max} [RPM]	102.539	97.668	90.892	ω_{\max} [RPM]	55.306	55.938	56.128
v_{atl} [mm/sec]	327.157	355.355	348.999	v_{atl} [mm/sec]	217.302	225.244	224.322

3.2.3. táblázat: A robot futásának szimulációs eredményei különböző periódushosszra és rugóállandóra

A fejezet fő célja a dinamikus mozgásokhoz szükséges nyomaték és fordulatszám meghatározása volt, mely alapján elvégezhetem a motorméretezést. Az eredmények alapján a **5 Nm** nyomaték és a **120 RPM** fordulatszám lesz a referencia. A motor megvalasztása után a CAD és a SimMechanics modellt bővíthetjük a kiválasztott motorral.

3.3 Motorméretezés

A megfelelő motor kiválasztásához hét fő igényt állapítottam meg. Ezt a feladatot nem pusztán a robot igényei szerint vizsgáltam (indítónyomaték * üresjárat fordulat/szám, térfogat és tömeg), hanem fejlesztői (beszerezhetőség) és megvalósíthatósági (vezérlő komplexitása, szabályozás bonyolultsága, üzemi feszültség, fogyasztás) szempontokból is.

- **Beszerezhetőség** - a beszerezhetőséget is figyelembe kell venni a motor paraméterei mellett, mivel megvalósítás esetén releváns szempont. A beszerezhetőségbe az ár is beleszámítható.
- **Térfogat, tömeg** - Mivel a robot mobilis, ezért a tömeget és térfogatot minimalizálni kell. A kisebb térfogatú motorhoz kisebb méretű tartó is elegendő, amely csökkenti a költséget, az össztömeget és a fogyasztást.
- **Fogyasztás** - A roboton a tápfeszültséget egy adott kapacitással rendelkező akkumulátor biztosítja. A fogyasztás minimalizálásával a robot üzemideje meghosszabbítható.
- **Üzemi feszültség** - A motorok tápfeszültség igénye alapján kell meghatározni az akkumulátorok feszültségét. Nagyobb térfogatú akkumulátor esetén a robot össztömege is növekszik.
- **A vezérlő áramkör komplexitása** - Motor fajtájától függően változik a vezérlő áramkör komplexitása. A BDC¹ motorok meghajtása igen egyszerű, mely egy H hidat igényel. A léptetőmotoroknál dupla H hídra van szükség. A BLDC² motorok ettől összetettebb vezérlési áramkört igényelnek.
- **Pozíciószabályozás bonyolultsága** - A BDC motorok sebességszabályozását PWM segítségével kivitelezhetjük. A pozíciószabályozás PID, Fuzzy vagy más szabályozó algoritmusok segítségével valósítható meg, melyben a visszacsatolást az enkóder biztosítja. A léptetőmotorok nagy előnye, hogy könnyen megoldható velük a pozíciószabályozás, a hátrányuk, hogy nem rendelkeznek visszacsatolással, ezért könnyen hiba jelentkezhet a pozíciót illetően. A BLDC motorok szabályozása

¹ Kefés egyenáramú motor

² kefe nélküli egyenáramú motor

összetett. Náluk szintén PID vagy más szabályozó algoritmusokat kell alkalmazni. Előnye, hogy pontosan tudhatjuk a rotor valós pozícióját.

- A motorok mellé egy λ mérőszámot rendelhetünk, amely azt szemlélteti, hogy mennyire felel meg a motor a robot igényeinek. Ahol a motor indítónyomatéka τ_{start} , üresjárat fordulatszáma n_0 , a tömege m_{mot} , hossza l_{mot} , átmérője d_{mot} .

$$\lambda = \frac{\tau_{start}^2 \cdot n_0}{m_{mot} \cdot l_{mot} \cdot d_{mot} \cdot m_{red}} \quad (3.3.1.)$$

Paraméterek		Mérték- egység	Maxon	M. Faulhaber	Faulhaber	Dunker	Dunker	NEMA 17
	A sorozat neve		118752	2342S006	2232U024S	G 30.0S	BG 32x20	17HS4401
1	Motor fajta		BDC	BDC	BDC	BDC	BLDC	Step.M.
2	Teljesítmény	W	20	24	8.68	10	20	20
3	Üzemi feszültség	V	24	6	24	24	12	12
4	Üresjárat fordulatszám	rpm	9560	9000	7100	3550	5240	4672
5	Indítónyomaték	mNm	243	87.2	46.7	170	210	292.08
6	Folyamatos nyomaték	mNm	26.3	14	10	37	20	400
7	Hossz	mm	54	42	32	75	58	40
8	Átmérő	mm	25	23	22	30.6	32.4	42
9	Tömeg	g	130	88	62	240	200	280
10	Indítónyomaték*üresjárat fordulatszám	kNm * rpm	2.32308	0.648	0.33157	0.6035	1.1004	1.364624

3.3.1. táblázat: A motorok adatlapjai alapján összegzett táblázat

A motorokhoz tartozó áttét neve:		Mérték- egység	166163	Series 26A	Series 26A	PLG 30	PLG 32	
11	Redukció		1:33	1:64	1:64	1:28	1:20	1:27
12	Üresjárat fordulatszám	RPM	412	127	111	126	259	174
13	Üresjárat frekvencia	Hz	6.86	2.11	1.84	2.10	4.31	2.9
14	Indítónyomaték	Nm	8.10	5.12	2.98	4.78	4.25	7.84
15	Folyamatos nyomaték	Nm	0.87	0.90	0.64	1.04	0.40	2.94
16	Reduktor tömege	g	162	21	21	80	180	295
17	Motor és reduktor tömege	g	292	109	83	320	380	575
18	Motor és áttét hossza	mm	90	74	67	78	78	90
19	Összesített mérőszám		19.86	26.51	16.89	2.33	3.42	1.95

3.3.2. táblázat: A motorokhoz tartozó áttét adatlapjai alapján összegzett táblázat

A következő motorokkal kapcsolatos megállapítások:

- **Faulhaber 2342S006CR** BDC motor jó paraméterekkel rendelkezik. Az indítónyomatéka a második legkisebb a vizsgált motorok közül, viszont kis tömege, térfogata és nagy üresjárat fordulatszáma miatt ez a motor bizonyul a robot számára a legjobbnak az összehasonlítottak közül.

- **MaxonMotor 118752** egy jó paraméterekkel rendelkező BDC motor de nagy hátránya az ár és ez mellett nehezen beszerezhető.
- **2232U024 sorozat** a 2342S006CR sorozathoz képest valamennyivel rosszabb paraméterekkel rendelkezik. A legkisebb térfogatú és tömegű a csoportban, de legkisebb az indítónyomaték és üresjárat fordulatszám szorzata is legkisebb. A versenytársai nagyobb teljesítménnyel rendelkeznek. Előnye, hogy könnyebben hozzáférhető.
- **Dunkermotoren BG 32x20** egy BLDC motor, viszonylag nagy indítónyomatékkal és tömeggel rendelkezik. Előnye, hogy ez a Dunkermotoren könnyebben elérhető terméke, a hivatalos oldalon rögtön reduktor és enkóder választható mellé. Hátránya, hogy nagy a térfogata.
- **Dunkermotoren G 30.0S** - egy kefések DC motor, mely léptetőmotorhoz képest kisebb, de a többi kefések és kefe nélküli motorokhoz képest nagyobb tömeggel és térfogattal rendelkezik. Előnye, hogy ez a Dunkermotoren könnyebben elérhető terméke, és a hivatalos oldalon rögtön reduktor és enkóder választható mellé.
- **NEMA 17HS4401** egy léptetőmotor. Egyik hátránya, hogy tömege és térfogata jelentősen nagyobb mint a kefések és a kefe nélküli egyenáramú motoroknak. Másik jelentős hátránya a léptetőmotoroknak, hogy kis fordulatszámon nagy áramot igényelnek. A léptetőmotorral a pozíciószabályozás nagyon egyszerűen megvalósítható, viszont nincs visszacsatolás a rotor szögéről.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a **Faulhaber 2342S006** motor a legkiválóbb a robot megépítésére. A motor és az áttét modelljével kibővítem a CAD modellt (5. fejezet).

4 Az RHex-szerű hexapod robot lába

A robot dinamikus tulajdonságainál a lábak kialakítása és viselkedése különlegesen fontos szerepet játszik, ugyanis a robotok a talpakon keresztül érintkeznek a környezetükkel. A modellezés megmutatta, hogy a talajkontaktus esetén létrejövő erőhatások többek között jelentősen kihatnak a test járás közbeni lengésére illetve a csuklóban létrejövő nyomatékokra mely arányos a motorok által felvett árammal. [41] A dolgozatban 9 fajta lábat készítettem, melyeket először végeelem módszerrel szimuláltam, azután pedig a Test Bench nevű mérőműszerrel validáltam [41], az eredményekkel pedig a SimMechanics modellt kiegészítettem. Az elvégzett mérések és a szimulációs eredmények alapján kiválasztottam az optimális anyagú és kialakítású lábat, mellyel a robot a leghatékonyabban tud haladni.

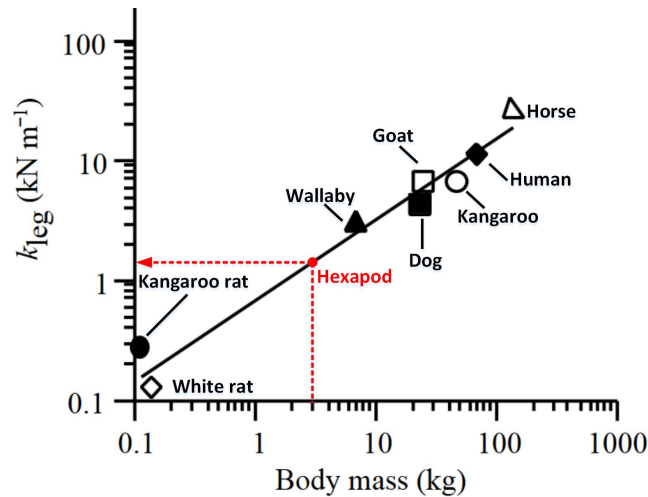
A láb kialakításakor kitűzött általános célok:

- A lábakat és a testet érő erőhatások minimalizálása és minél egyenletesebbé tétele annak érdekében, hogy csökkentsük az alkatrészek károsodásának esélyét, illetve, hogy a robot testén elhelyezett szenzorok által mért jeleket ne befolyásolják az elkerülhető vibrációk.
- A fogyasztást minimalizálása. A lábak feladata, hogy elnyeljék a felesleges lengéseket. Ha ez nincs biztosítva, akkor extra áramfelvétel jelentkezik a meghajtókban. Ugyanakkor a lábokban található rugók a járás megfelelő fázisában visszatáplálják a tárolt energiát. [41]

A robotláb modellezését célszerű az emlősök lábai alapján végezni, mivel az emlősök a természetben nagy energiahatékonyan mozognak és kiváló alkalmazkodóképességgel rendelkeznek. Az állatok futás közben lábukat rugóként használják melynek mechanizmusát SLIP sablonnal modellezhetjük. Egy lépés első felében az állatok teste gravitációs és a kinetikus energiája az inak és izmok segítségével átalakul rugóenergiává. A lépés második felében ez az energia visszaalakul kinetikus és potenciális energiává. A rugós láb egy aluláteresztő szűrő is a talajkontaktus részéről érkező erőhatásokkal szemben.

A rugóállandó meghatározásánál elsősorban az emlősök lábait érdemes modellezni, melyeknek lábai rugóállandójának, vastagságának és testtömegének aránya könnyen belátható melyet a 4.0.1. ábrán láthatunk. [11] A hexapod maximális tömege 3,3 kg, mely alapján a kisebb emlősökhöz hasonló. A grafikonról megállapíthatjuk,

hogy a robot össztömegére 1500 N/m rugóállandó jut, ez pedig szétosztva hat lábra megközelítőleg **250 N/m**, két lábra pedig **750 N/m**. A valós láb rugóállandójának e két határ közé kell esnie. A maximális mozgási sebességre kihat a láb rugóállandója is, amely tényét mechanikai szimuláció is alátámasztja.



4.0.1. ábra: Az emlősök testtömegének és a rugóállandójának aránya [11]

Az RHex hexapodok lábainak formáját tekintve három generációra oszlanak. Az első két generációval nem érdemes foglalkozni ugyanis több hátránnyal rendelkeznek, és nincs jelentős előnyük a harmadik generációs C alakú lábhoz képest. [11] Ha túlalkú lábat használnánk, a motornak nagy indítónyomatékra lenne szüksége ami megnöveli az áramfelvételt. A félkör alakú C láb segítségével jobban eloszlik a nyomaték és kisebb nyomatékváltozás mellett nagyobb erőt tudunk kifejteni. Nagyobb kapaszkodást és stabilitást is biztosít az egyenetlen talajon. [11]

A láb definiált tulajdonságai:

- A lineáris rugóállandót a robot tömegéhez kell hangolni. Az állatok mérete és a lábukban található inak aránya alapján meghatározható, hogy a robotláb függőleges rugóállandójának minimális értéke 250 N/m, míg a maximális értéke 750 N/m.
- Tudnia kell folyamatosan továbbítani a motor áttételén megjelenő nyomatékot a föld felé. A maximális nyomatékot a motor paramétereiből és a láb geometriájából tudjuk kiszámolni.
- Semmilyen csúszás sem engedett a motor tengelye és a láb között a precíz pozíciószabályozás elérése érdekében.

- Fel kell készíteni a haladásnál jelentkező csúcsterhelésre, ami megközelítőleg a járás közben fellépő erők kétszerese.
- Rendelkeznie kell dinamikus tulajdonságokkal is, mellyel képes lesz az összetettebb mozgásokra. Ilyen például a futás vagy az ugrálás. Azt is meg kell vizsgálni hogyan hat ki a csillapítás értéke a dinamikus mozgásokra [11]
- Mivel a láb az össztömeg legalább 10%-a, ezért törekedni kell a tömeg minimalizálására.

4.1 Megvalósított robotlábak

A munka során 9 lábat készítettem, négy fajta PLA, két fajta PVC és három üvegszál kompozit lábat. A CAD modell és az anyagtulajdonságok alapján végesem módszerrel meghatároztam a láb rugóállandóját, a sajátfrekvenciáját és a mechanikai terhelhetőségét. Az eredmények segítségével megbecsülhetők a legyártott láb tulajdonságai. A láb mechanikai tulajdonságai mellett figyelembe kell venni a legyártási folyamatának idejét, összetettségét és költségét. A szimulációnál azzal is kell számolni, hogy nem minden esetben tekinthető az láb tömöttnek. A szimulációs eredményeket validációval igazolom.

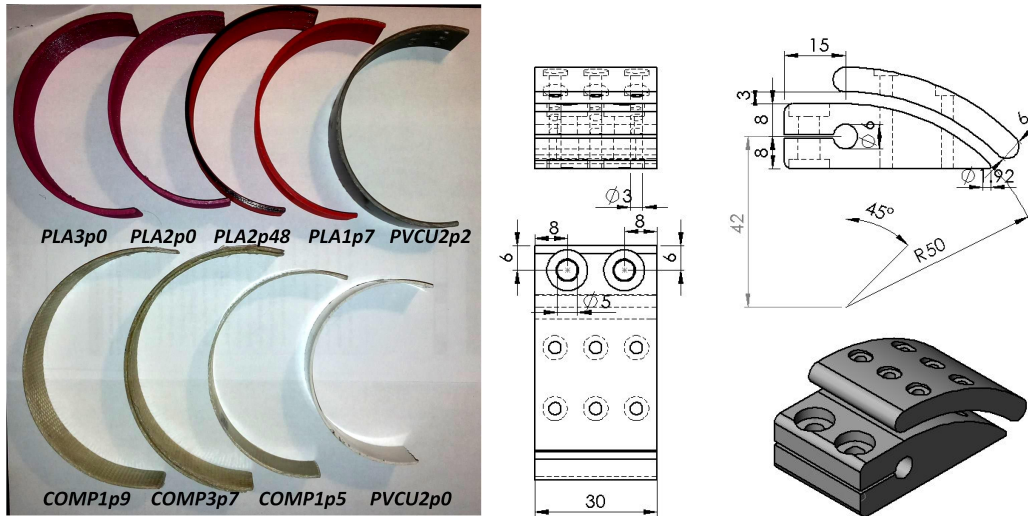
A pontos összehasonlítás céljából a lábak formája megegyezik, az eltérés csak az arányokban jelentkezik. A lábak dimenziói a külső (d_{out}), belső (d_{in}) átmérő és a lábvastagság (h_{leg}). Az eltérések oka, hogy bizonyos anyagú lábakat csak adott dimenzióval lehetett kivitelezni.

	Név	Felépítés	Anyag	d_{in} [mm]	d_{out} [mm]	h_{leg} [mm]	Tömeg [g]	Megjegyzés
1	PLA1p7	8 réteg	PLA	100.0	103.2	1.70	9.7	CraftBot
2	PLA2p0	12 réteg	PLA	100.0	104.0	2.00	11.5	RepRap Prusa i3
3	PLA2p48	8 réteg	PLA	100.0	105.0	2.48	15.0	CraftBot
4	PLA3p0	12 réteg	PLA	100.0	106.0	3.00	15.5	RepRap Prusa i3
5	PVCU2p0	Extrudált	PVC-U	100.0	104.0	2.00	12.0	
6	PVCU2p2	Extrudált	PVC-U	105.6	110.0	2.20	13.5	
7	COMP1p5	12 réteg	E-glass	106.0	109.0	1.50	11.6	Üvegszál kompozit
8	COMP1p9	6 réteg	E-glass	121.4	125.0	1.80	17.3	Üvegszál kompozit
9	COMP3p7	6 réteg	E-glass	110.0	117.4	3.70	33.8	Üvegszál kompozit

4.1.1. táblázat: A lábak dimenzióit összegző táblázat[8]

A lábakhoz tervezett lábrögzítőt PLA-ból nyomtattam. Megtervezésekor fontos szempont volt, hogy mindegyik lábbal kompatibilis legyen. Összesen két lábrögzítőt

terveztem, az egyik a robot testéhez, a másik pedig a Test Bench lábütő készülékhez. A lábörögztítő össztömege csavarokkal együtt 45.4 gramm.

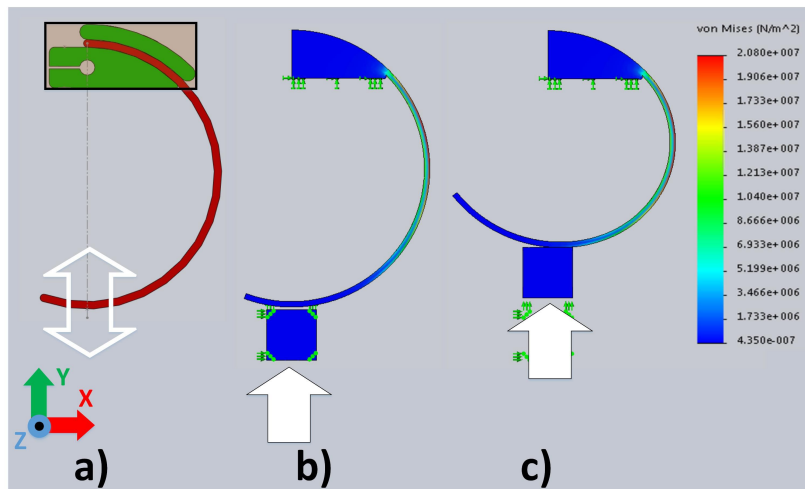


4.1.1. ábra: A legyártott robot lábak

4.2 A láb szimulálása végeleemes módszerrel

A legyártás előtt a megtervezett láb CAD modellje és anyagának mechanikai tulajdonságai alapján, végeleemes módszerrel meghatározom a láb rugóállandóját, sajátfrekvenciáját és mechanikai terhelhetőségét. Jellegüket tekintve, a szimulációkat feloszthatjuk statikus és dinamikus szimulációkra. Statikusnál a láb terhelhetőségét és rugóállandóit tudjuk meghatározni az összenyomás hatására jelentkező erők alapján, a dinamikus szimulációknál pedig a sajátfrekvenciát. A szimulációt a Test Bench mérőműszer segítségével validálom.

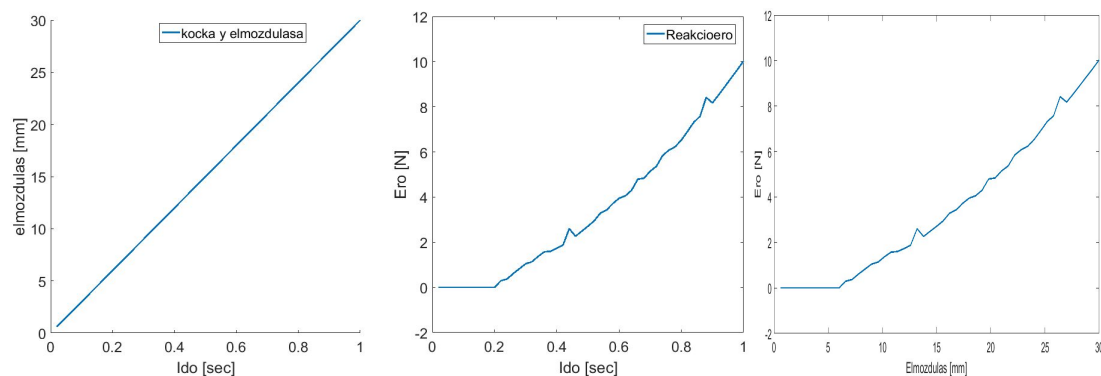
Statikus nemlineáris szimuláció



4.2.1. ábra: A lábtartó és a láb CAD modellje (a ábra), a nemlineáris szimuláció alap- (b ábra) és végállapota

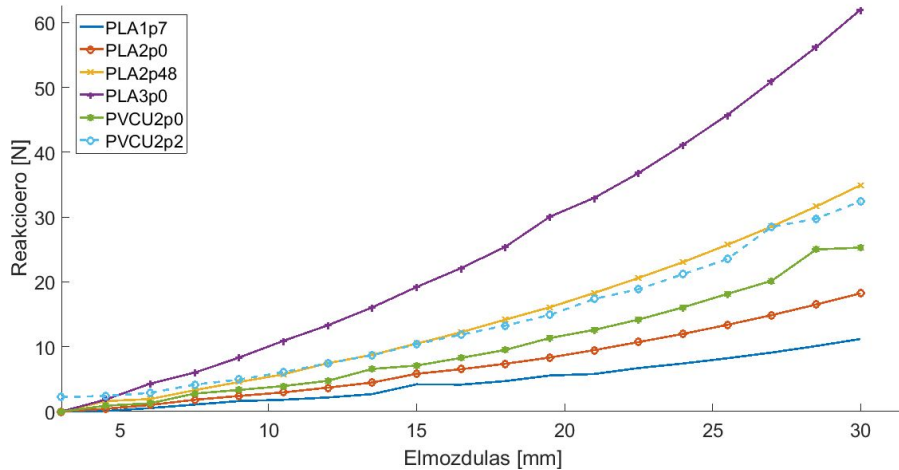
Statikus esetben a láb geometriájából adódóan a deformáció nemlineáris, ezért a SolidWorks-ben nemlineáris szimulációt kell alkalmazni. A szimulációk során egy leegyszerűsített modellt használtam, melynek tartó részét lerögzítettem. Az egyszerűsített modell dimenziói megegyeznek a láb dimenzióival. A modellt egy adott dimenziójú és elhelyezkedésű kockával nyomom össze, melynek mozgása az y tengelyre van korlátozva. A kocka végig egyenletes sebességgel halad az y tengelyen pozitív irányba először szabadon, majd a lábbal történő érintkezés után. A láb reakcióerejéből és a kocka elmozdulásából megállapítható a láb rugóállandója. A szimuláció során a súrlódást elhanyagoltam, és fix lépésközt alkalmaztam.

A szimuláció a Test Bench által végzett statikus mérés folyamata alapján készült, amelyet a 4.3. fejezetben részletezek. A kapott eredményeket a validálás után érdemes értékelni, mivel a valós anyag tulajdonságait a mérési eredményhez kell hangolni. A szimuláció során 20 időpillanatban lett kiszámítva az eredmény.

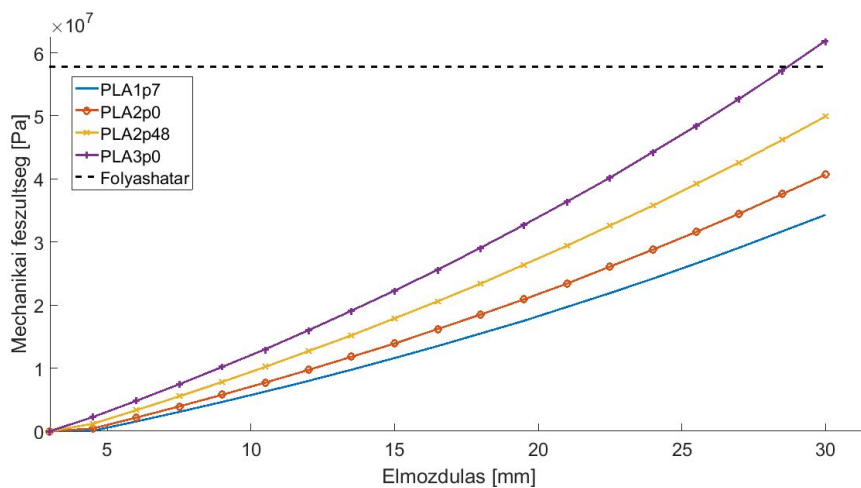


4.2.2. ábra: A kocka y szerinti elmozdulása az idő függvényében bal oldalt és a láb által kifejtett reakcióerő közepén és a PVC-U láb erő-elmozdulás grafikonja nemlineáris szimulációval kapott eredménye jobb oldalt

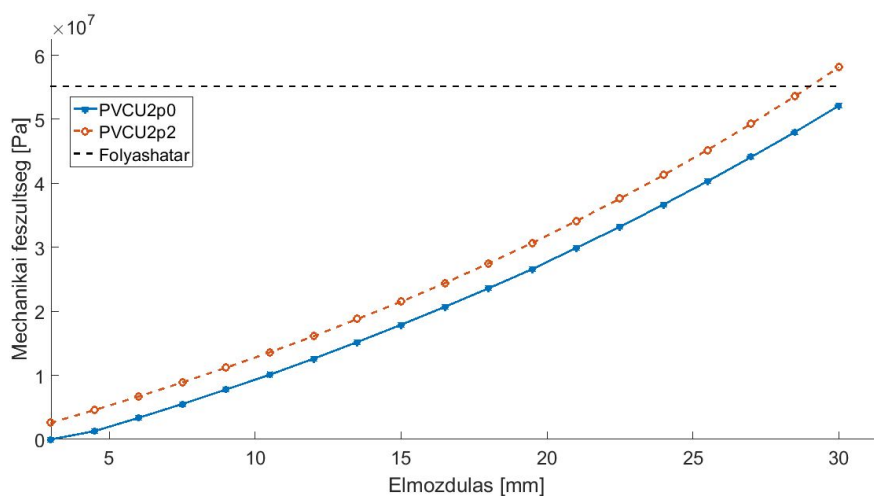
Az erő-elmozdulás grafikonon megállapítható, hogy a deformáció nemlineáris. Ebből kifolyólag a lineáris rugó nem tudja teljesen modellezni a láb deformációját. Lehetséges megoldás, hogy egyszerű négyzetes rugómodellel, vagy másodfokú polinommal közelítjük az eredményeket. Ezekben az esetekben is a legkisebb négyzetek módszerével biztosítjuk a minimális négyzetes hibát. A nemlinearitás a láb geometriájából adódik. A kompozit lábakat nem sikerült szimulálnom.



4.2.3. ábra: A PLA lábak erő-elmozdulás grafikonja nemlineáris szimulációval



4.2.4. ábra: A PLA lábak belső mechanikai feszültsége az elmozdulás függvényében



4.2.5. ábra: A PVCU lábak belső mechanikai feszültsége az elmozdulás függvényében

Sajátfrekvencia meghatározása

A hexapod dinamikus modellezésénél a rugóállandó mellett még fontos paraméter a láb sajátfrekvenciája. A láb sajátfrekvenciáját SolidWorks környezetben a „Frequency” szimulációval lehet meghatározni. A szimuláció előtt csak a láb rögzített pontjait kell megadni.

A sajátfrekvencia értéke mellett meg lehet nézni a deformáció irányát is. A rezgéseket csak a szagittális síkon vizsgáljuk. A 2. és a 4. sajátfrekvenciájú rezgés nem ezen a síkon történik, ezért ez ezek nem relevánsak számunkra. A későbbi mérés során az 1. sajátfrekvenciát akarjuk meghatározni.

	f1 [Hz]	f2 [Hz]	f3 [Hz]	f4 [Hz]	f5 [Hz]
PLA1p7	29.087	51.428	102.69	269.33	350.24
PLA2p0	33.830	59.493	119.27	309.92	406.50
PLA2p48	41.274	72.269	145.28	371.97	494.42
PLA3p0	49.027	85.015	172.16	431.37	585.13
PVCU2p0	33.180	57.192	117.02	298.16	398.74
PVCU2p2	32.534	55.929	114.70	296.60	390.77

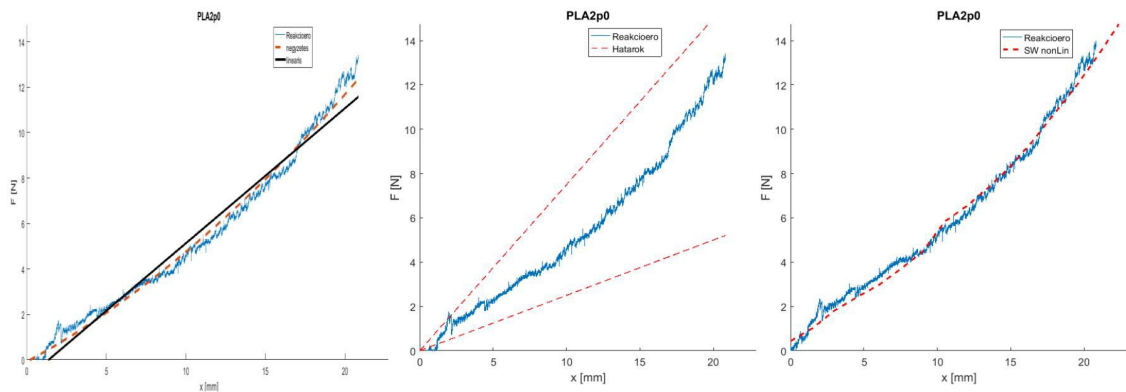
4.2.1. táblázat: a PVC-U láb sajátfrekvenciái

4.3 Statikus mérés, validációs eredmények és rugóállandók meghatározása

A statikus mérésekkel validáljuk a nemlineáris szimulációs eredményeket. A 3. fejezet elején meghatároztam a robotláb rugóállandóját az emlősök rugóállandó és tömeg arányai alapján. Az optimális láb lineáris rugóállandója **250** és **750 N/m** közé kell, hogy essen. A lábgeometriából adódóan a láb erő-elmozdulás egyenese exponenciális jellegű, ezért nemlineáris rugómodellt célszerű alkalmazni. A mérési eredményen az ugrások a felületi érdesség miatt jelentkeztek.

A 4.3.1. ábra jobb oldalán az erő-elmozdulás görbe approximációja látható lineáris és négyzetes rugómodellel. A szimulált és az approximált módszerek pontosságát mindhárom esetben hibanégyzet átlag (RMSE) szerint hasonlítom össze a 4.3.1. táblázatban. A 4.3.1. ábrán közepén az erő-elmozdulás grafikonon a láb reakcióerejét és a 250 és a 750 [N/m] lineáris rugóállandó határait hasonlítom össze. Az egyéb lábak mérési eredményei a függelékben vannak feltüntetve. A 4.3.1. ábrán jobb oldalt a nemlineáris szimuláció eredménye látható. Az anyagtulajdonságokat is validálni kell, mivel eltérhet az adatlapon feltüntetett paramétereiktől.

PLA2p0 láb:



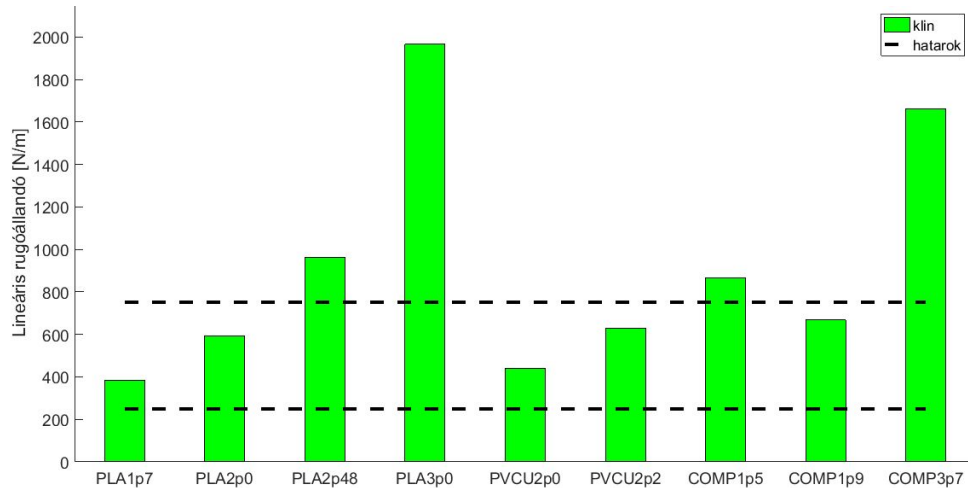
4.3.1. ábra: A PLA2p0 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a rugóállandó határokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény (jobb oldalt)

	Név:	k_{lin} [N/m]	$RMSE_{klin}$	k_{sq} [mN/m ²]	$RMSE_{ksq}$	$RMSE_{sim}$
1	PLA1p7	385.2	0.4869	22.31	0.2156	0.1489
2	PLA2p0	594.5	0.6053	27.75	0.3562	0.0537
3	PLA2p48	961.1	1.1545	58.96	0.6547	0.3167
4	PLA3p0	1965.6	2.0312	121.31	0.9542	0.0258
5	PVCU2p0	438.8	0.4328	23.90	0.2639	0.1300
6	PVCU2p2	630.2	0.8199	26.45	0.5473	0.1811
7	COMP1p5	865.1	1.3411	35.56	0.6982	
8	COMP1p9	667.6	0.5751	26.76	0.7668	
9	COMP3p7	1661.5	2.1551	66.45	1.1024	

4.3.1. táblázat: A statikus validáció eredménye

A statikus validáció eredménye alapján megállapítható, hogy a SolidWorks nemlineáris szimulációjával kapott értékek pontosak, ezért a 3D nyomtatott lábak anyaga tömörnek tekinthető. A szimulációs eredményeknél a PVCU2p0 láb esetében a reakcióerőt 1.7-el, PVCU2p2-nél pedig 1.5-el kellett osztani. A négyzetes rugómodell pontosabbnak bizonyult, ezért ez a model jobban megfelel a lábtulajdonságok jellemzésére. A COMP1p5 rugóállandója azért nagyobb a COMP1p9 lábétól mert a külső és belső átmérő eltér. Az testtömeg alapján kiszámított optimális rugóállandó lineáris, ezért a lábakat ezen paraméter alapján célszerű összehasonlítani. Az adott korlátok között a PLA1p7, PLA2p0, PVCU2p0, PVCU2p2 és a COMP1p9 lábak rugóállandója van, amelyek közül a folyáshatár és a dinamikus paraméterek függvényében lehet kiválasztani az optimális lábat.

A statikus validáció összegzett eredménye a 4.3.1. táblázatban található, ahol k_{lin} az közelített lineáris rugóállandó, k_{sq} a négyzetes rugóállandó, a $RMSE_{klin}$, $RMSE_{ksq}$ a közelítések, a $RMSE_{sim}$ pedig a szimuláció hibanégyzet átlaga.



4.3.2. ábra: A legyártott robotlábak méréssel megállapított lineáris rugóállandója

4.4 Dinamikus mérés

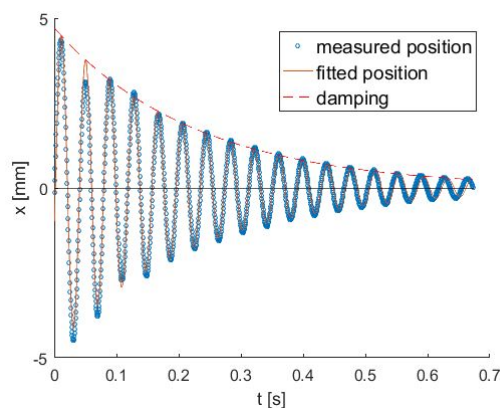
A dinamikus mérés során a lábat egy előre meghatározott pozícióig feszítettem, majd elengedtem. Ezután a rugó csillapított szabad lengést végzett. Az 5.8.1. ábrán a rugó időben változó pozíciója látható, melyet a gyorsulásmérő adatainak kétszeres integrálásával kaptam meg.

A mért adatok által generált jelre ráilleszthető a csillapított szabad rezgésmodell differenciálegyenletének megoldása:

$$\chi(t) = X e^{-\zeta \omega_k t} \cdot \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_k t - \vartheta_r), \quad f = 2\pi f \quad (5.8.1.)$$

Ahol $\chi(t)$ a kitérés az idő függvényében, X a kitérés kezdeti értéke, ζ a csillapítási viszony, ω_k a szögsebesség, f_k pedig a rezgés sajátfrekvenciája.

A függvényidentifikáció eredménye $f = 25.8$ Hz és $\zeta = 0.027$. A gyorsulásmérő modul meghibásodása miatt nem sikerült több mérést végezni.



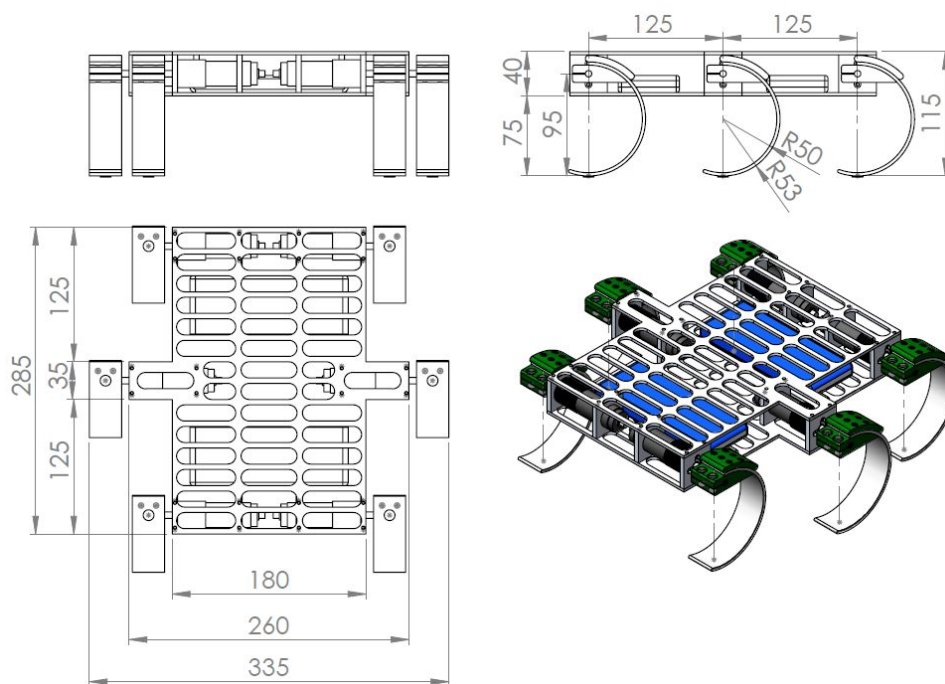
4.4.1. ábra: A láb elmozdulása az idő függvényében

5 Az eredmények alapján megtervezett robot modellje

A CAD modellt kibővítettem a motorméretezés fejezetben kiválasztott *Faulhaber 2342S006* BDC motorral a *Series 26A* áttétellel és két *Turnigy nano-tech 3000mah 2S 25~50C Lipo Pack 7.4 V* feszültségű lítium polimer akkumulátorral.

A robot össztömege akkumulátorokkal 2 kg, hossza 285 mm, szélessége 335, magassága pedig 115 mm. A hexapod alvázat 3 mm vastag alumínium lemezből terveztem. A felső és az alsó alvázat a motortartók fogják össze. A könnyített alváz tömege 0,177 kg, az ugyan ilyen dimenziókkal rendelkező tömött alváz tömege pedig 0,438 kg. A két értékből kiszámítható, hogy az első alváz 2,45-ször könnyebb a másodiknál, és az össztömeg pedig 0,522 kg-al kevesebb. Az alváz terhelhetőségét végelemes módszer segítségével teszteltem. A hexapod tömegének váza tízszeres túlterhelés mellett sem deformálódik nagyobb mértékben, mint 0,087 mm. A legnagyobb mechanikai feszültség értéke 26,20 MPa, mely nem érte el az anyagon belüli folyáshatárt amely 27,57 MPa. Ez modellezés szempontjából annyit jelent, hogy a könnyített váz is elég erős, és nem kell figyelembe venni a váz deformációját.

Stabil mozgás érdekében a test kialakításakor fontos szempont a test tömegközéppontjának elhelyezkedése, annak a robotalvá geometriai középpontjában kell lennie. A robot kialakításakor törekedtem a szimmetriára.

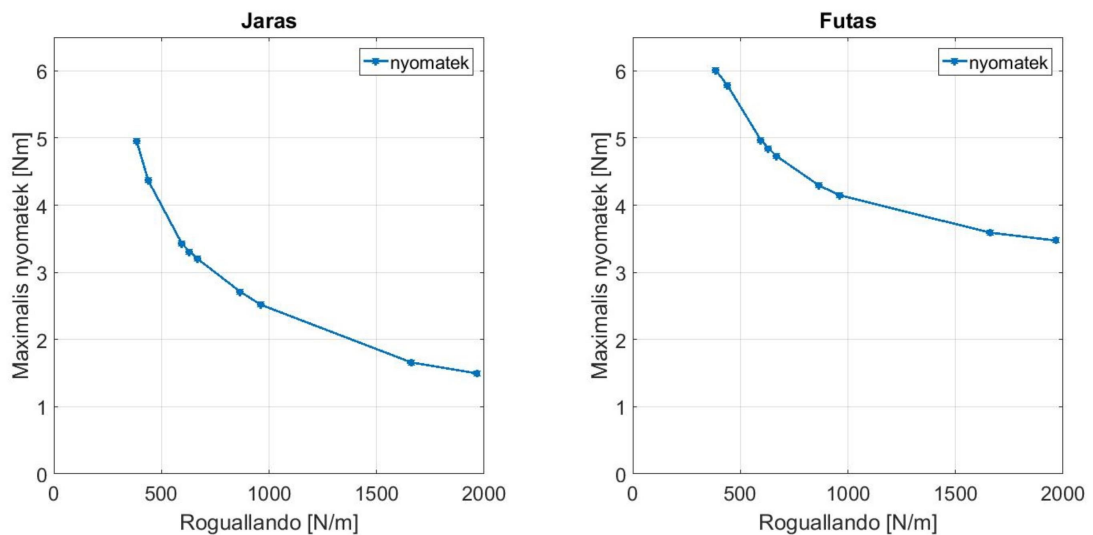


5.0.1.ábra: A CAD modell ortogonális vetületei és izometrikus nézete

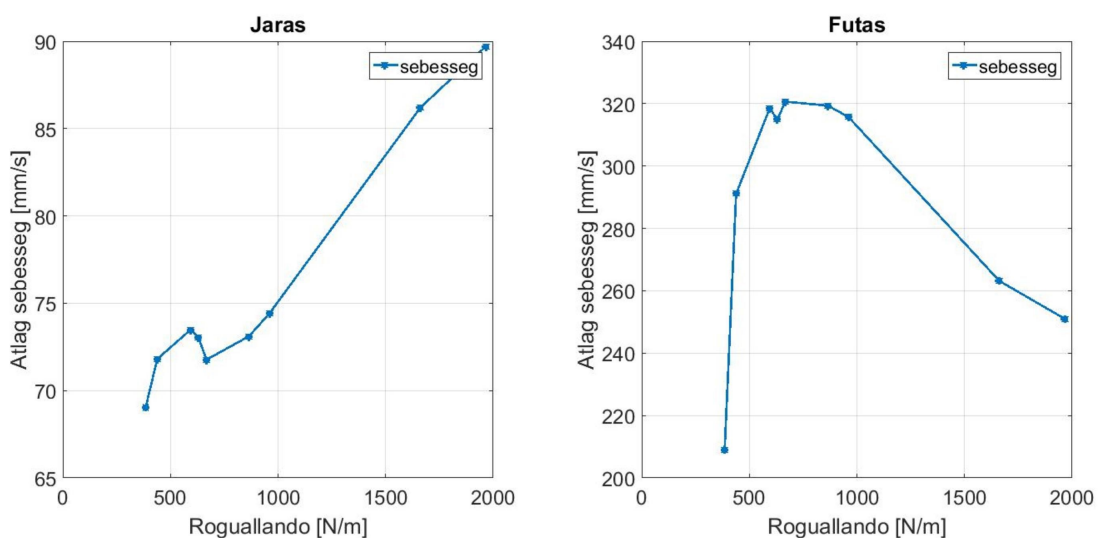
Az optimális láb meghatározásához az új CAD modell segítségével újragenerálom a SimMechanics modellt. Mivel a motor feszültségét konstansnak tekinthetjük, az árama pedig a nyomatékával arányos, ezért a mozgás során befektetett munka arányos az átlag nyomatékkal (τ_{atl}). A pályagenerálási paraméterek hangolásánál a nagy sebesség elérése a fő cél, ahol a nyomatékok és a talaj reakcióereje minimális. A mozgás maximális költsége arányos a τ_{max}/v_{atl} mérőszámmal, az átlagköltség pedig a τ_{atl}/v_{atl} arányával. Az eredmények táblázata a függelékben található.

Paraméterek		Járás	Futás
t_p	[s]	1.5	1.5
t_s/t_p	[s]	0.6	0.45
Ψ_s	[°]	30	5
α	[m/s ²]	2000	2500

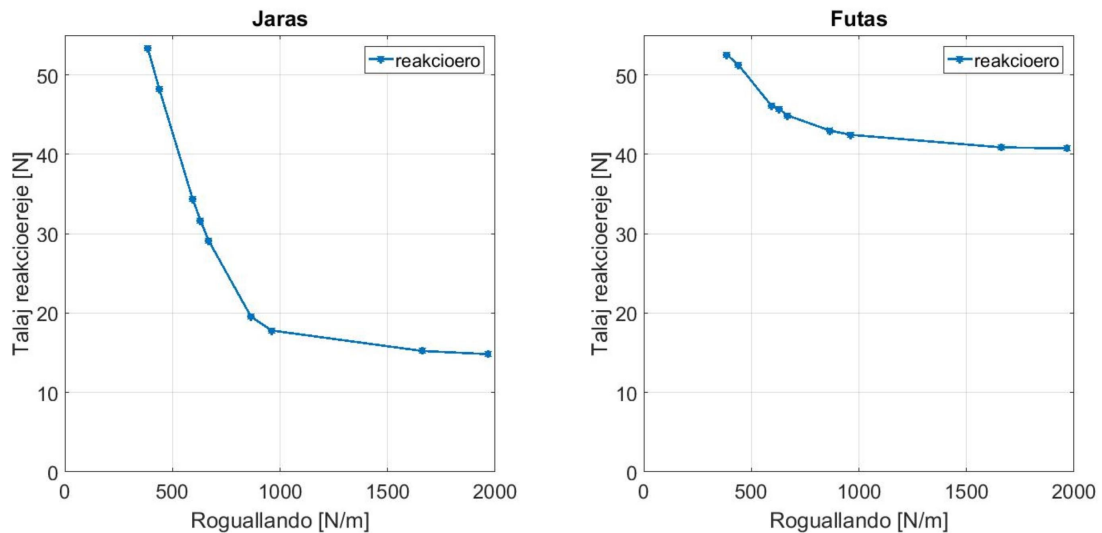
5.0.1. ábra: A járásalgoritmus paraméterei



5.0.2. ábra: A mozgás közben fellépő nyomatékok a rugóállandó függvényében



5.0.3. ábra: A mozgás átlagsebessége a rugóállandó függvényében



5.0.4. ábra: A mozgás során a reakcióerő nagysága a rugóállandó függvényében

Mint ahogy korábban is beláttuk, futás közben nagyobb nyomatók jelentkeznek mint járáskor. Fontos megjegyezni, hogy a haladási sebesség és a nyomatók között nincs egyértelmű arányosság. A dinamikus rendszer viselkedése akkor optimális sebesség és elhasznált energia arányát tekintve ha az 1.2. és 1.3. fejezetben ismertetett sablonokéhoz hasonló. Ha ez nem teljesül, a kisebb sebességű mozgások is nagy nyomatókat eredményezhetnek.

Ahogy már megállapítottuk, lassú mozgások esetén előnyösebb a merev láb, viszont nagyobb sebességű mozgásoknál a rugós láb az előnyösebb. A 6.0.3. ábrán megfigyelhető, hogy adott a láb rugóállandója nagy mértékben befolyásolja a haladási sebességet. Ez mellett létezik egy optimális rugóállandó, mellyel a robot haladási sebessége maximális. Az optimális rugóállandó meghatározásakor figyelembe kell venni, hogy a terhelés nem arányosan oszlik szét a lábak között.

A robot a maximális haladási átlagsebességet a *COM1p9* lábbal érte el. A maximális költség a *PLA3p0* lábnál a legkisebb. A robot részére a *COM1p5* láb a legkiválóbb. A robot mozgása során a magas energiahatékonysága és az üvegszál kompozit magas folyáshatárral rendelkezik. Ezzel a lábbal a robot 0,32 m/s sebességgel képes haladni a robot, ami körülbelül 1 testhossz/másodpercnél felel meg. A mozgás során fellépő maximális nyomatók 4,295 Nm és a maximális fordulatszám 72 RPM, melyeket a *Faulhaber 2342S006* motor a *1:64 Series 26A* áttétellel képes biztosítani.

6 Konklúzió

A dolgozat egy RHex szerű robot struktúrájának és mozgásának elemzését, megépítésének előkészületeit és mozgásának szimulálását írja le. A megépítés előtt célszerű a robotot analitikusan modellezni és szimulálni, mert az elemzés nélkül az alkatrészek túlméretezettek vagy alulméretezettek lesznek. Emiatt az is előfordulhat, hogy a megépített hexapod nem képes a tervezett járási stratégiát megvalósítani, vagy teljesen mozgásképtelen. Az elemzések segítségével továbbá előre optimalizálhatjuk a szerkezet tulajdonságait.

A CAD modell alapján a SimMechanics segítségével a járásalgoritmus, a motorszabályozás és a mechanika együttes szimulációját is elvégezhetjük. A szimuláció segítségével optimalizálhatjuk a járásalgoritmust, az energiaveszteségeket és a szabályozók paramétereit.

A legtöbb szabályozási és optimalizálási algoritmus modell alapú, így a szakasz pontos analitikus modellezése nélkülözhetetlen. Az RHex mozgásegyenletének nincs analitikus megoldása, mivel a mozgásegyenletek különbözőek attól függően, hogy a test a levegőben van-e, vagy a talajon. A rendszer a SLIP sablonhoz hasonlóan viselkedik.

A robot modellezése széleskörű ismereteket kívánt. A **gépészeti ismeretek** nélkülözhetetlenek voltak a robot CAD modellezésénél (váz terve, a lábak modellezése, kialakítása, legyártása, mechanikai rendszer illesztése), és a végeselemes módszer ismerete nagyon fontosnak bizonyult a lábak statikus és dinamikus szimulálásakor. **Mechanika** ismeretekre volt szükségem a kinematikai és dinamikai modellezéshez valamint a csuklók pályagenerálásához. **Elektronika** ismeretek kellettek a motorméretezéshez. Az **informatikai** ismeretek nélkülözhetetlenek voltak a mechanikai szimulációk kezelésénél, a validált eredmények feldolgozásánál. **Irányítástechnikai** ismeretek **kellettek** a csuklók szabályozásához, irányításához. **Robotikai ismeretek** **kellettek** az RHex-szerű robot szerkezetének megtervezéséhez és a SLIP sablonhoz hasonló dinamikai viselkedés eléréshez.

A robot tervezése során CAD modellezés és végeselemes módszer segítségével meghatároztam a robot dimenzióit, össztömegét, súlypontjának elhelyezkedését, lábának rugóállandóját és sajátfrekvenciáját. A 9 darab legyártott láb szimulált eredményeit egy saját fejlesztésű mérőműszerrel végeztem, mely statikus és dinamikus mérésekre egyaránt alkalmas. A validációs eredményekkel megállapítható, hogy az

adott kitöltési tényezővel 3D nyomtatott láb mechanikai tulajdonságai megegyeznek a tömör láb tulajdonságaival. A láb rugóállandóját az emlősök tömeg-rugóállandó arányához igazítottam. Szimmetrikus tehereloszlást feltételezve a robotláb függőleges rugóállandójának minimális értéke 250 N/m, míg a maximális értéke 750 N/m.

A szimulációs eredmények is igazolták, hogy kisebb sebességű mozgásoknál mint például a passzív dinamikus járás, a merev láb jobb hatásfokkal rendelkezik a rugós lábnál. Ennek ellenére gyorsabb mozgásoknál mint a futás, a rugós láb rendelkezik jobb hatásfokkal. Az is megállapítható, hogy a mozgás során a csuklók nyomatéka eltér egymástól. Futás esetén az alulirányított mechanikai szerkezet akkor mozog maximális sebességgel és energiahatékonysággal, ha a rendszer dinamikus mozgása a SLIP sablonhoz hasonló.

A maximális nyomaték csökkenthető a pályagenerálási paraméterek (Ψ_s , t_s , t_p , α) hangolásával, a robot össztömegének, csuklók gyorsulásainak, erőkar hosszának (láb átmérője), és a rugó csillapításának csökkentésével, vagy a láb rugóállandójának növelésével.

A mozgásszimuláció alapján meghatároztam a felállás, járás és futás során fellépő maximális nyomatékokat, mely 5 Nm, és a fordulatszámot amely 120 RPM. Ezt a forgási sebességet és a terhelést a *Faulhaber 2342S006CR Series 26A 1:64* motor és áttétpáros képes biztosítani. A kiválasztott motorok alapján a robot CAD modelljét újraterveztem. Az új modellnél tömör alváz helyett egy könnyített alvázat alkalmaztam, melynek tömege a tömött váz 40 %-a. Az alváz terhelhetőségét végelesemes módszerrel ellenőriztem.

A validációs eredmények és az újratervezett CAD modell alapján új mozgásszimulációkat végeztem. Első lépésben a járás és a futás járásalgoritmus t_p , t_s , Ψ_s , α paramétereit hangoltam. Majd ezt követően az összes láb rugóállandójára újra elvégeztem a szimulációkat.

Az összegzett eredmények megerősítették az előzetes szimulációk eredményeit. A robot részére a *COMPlp5* láb a legkiválóbb. A robot mozgása során a magas energiahatékonysága és az üvegszál kompozit magas folyáshatárral rendelkezik. Ezzel a lábbal a robot 0,32 m/s sebességgel képes haladni a robot, ami körülbelül 1 testhossz/másodpercrek felel meg. A mozgás során fellépő maximális nyomaték 4,295 Nm és a maximális fordulatszám 72 RPM.

Köszönetnyilvánítások

A szerző hálóját fejezi ki Istennek, hogy adott neki erőt, egészséget és bölcsességet a munkájához és családjának a támogatásért. Külön köszönetet mond a mentoroknak, Burkus Ervinnek, Harmati Istvánnak akik támogatták ötleteikkel, tapasztalataikkal, Szegedi Mihálynak, aki segített a nyomtatott áramkör kimaradásában, 3D nyomtatásban, Bihari Ádámnak aki gépészeti tanácsaival segített. A BME Polimertechnika Tanszéknek, akik segítették a kompozit láb kialakítását, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszéknek, akik SolidWorks licenst biztosítottak, Az Irányítástechnika és Informatika Tanszéknek akik a 3D nyomtatásban segítettek.

Irodalomjegyzék

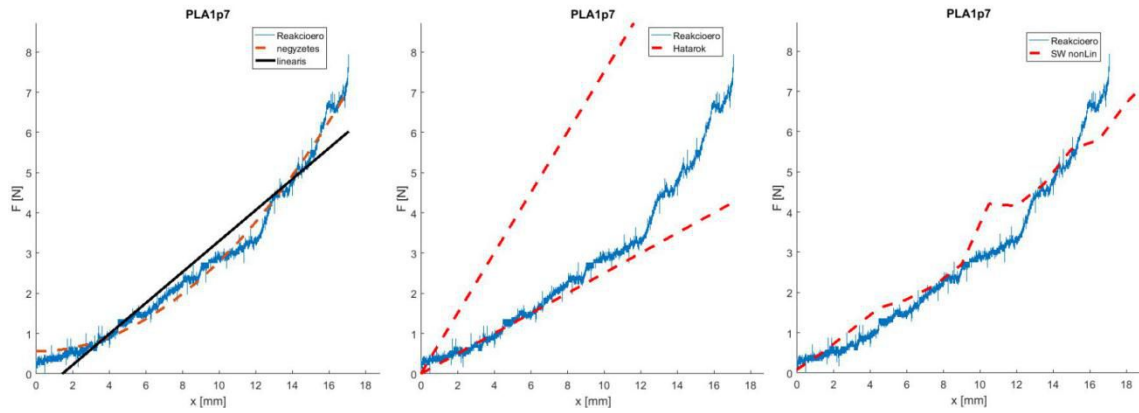
- [1] <http://hexapodrobots.weebly.com/advantages-of-hexapod-gait.html>
letöltve: 2015.12.04
- [2] <http://hexapodrobots.weebly.com/types-of-robot-gait.html>
letöltve: 2015.12.04
- [3] FOBOT, a hatlábú lépegető robot - Balázs András, Molnár András, Pécskai Balázs, Supola Balázs, Vámosy Zoltán
- [4] X-RHex: A Highly Mobile Hexapedal Robot for Sensorimotor Tasks
- [5] Boston Dynamics, Inc., "RHex Devours Rough Terrain." [Online]. Available:
http://www.bostondynamics.com/robot_rhex.html
- [6] http://www.msl.ri.cmu.edu/publications/pdfs/Uluc_Saranli_ICRA_2003.pdf letöltve: 2016.09.07.
- [7] <http://cdn.phys.org/newman/gfx/news/hires/2013/therhextakes.jpg> letöltve:2016.10.17.
- [8] http://www.engineeringtoolbox.com/engineering-materials-properties-d_1225.html letöltve:
2015.12.07.
- [9] https://hu.wikipedia.org/wiki/Rugalmass%C3%A1gi_modulus letöltve: 2015.12.07.
- [10] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Foly%C3%A1shat%C3%A1r>
- [11] Edward Z. Moore - "Leg Design and Stair Climbing Control for the RHex Robotic Hexapod"
Department of Mechanical Engineering McGill University, Montreal, Canada January 2002
- [12] http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0012_szerkezeti_anyagok/ch04s02.html
letöltve: 2015.12.09.
- [13] <http://www.st.com/web/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/PF252419?sc=internet/evalboard/product/252419.jsp> letöltve: 2015.12.10.
- [14] <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00274221.pdf> letöltve: 2015.12.10
- [15] István Kecskés, Ervin Burkusy, Fülöp Bazsó, and Péter Odry: "Model Validation of Hexapod Walker Robot" Cambridge University Press 2015. April
- [16] <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/motor/dcmotor/re/re25/118752>
letöltve: 2015.12.12.
- [17] https://fmcc.faulhaber.com/technology/PGR_13801_13601/PGR_13813_13801/en/GLOBAL/
letöltve: 2015.12.12.
- [18] https://www.cis.aueb.gr/Besides%20Security/securitynews/NEWS-3_09_01_06.pdf letöltve:
2016.08.30.
- [19] <http://www.space.com/11773-nasa-mars-rover-spirit-mission-ends.html>
letöltve: 2016.08.30.
- [20] https://en.wikibooks.org/wiki/Robotics/Types_of_Robots/Walkers#endnote_Gait letöltve:
2016.08.30.
- [21] <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/robots-main.html> letöltve: 2016.08.30.
- [22] http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-software/this_three_legged_robot_walks_1
letöltve: 2016.08.30.
- [23] <http://filipposanfilippo.inspitivity.com/teaching/modular-five-legged-robot/89> letöltve: 2016.08.30.
- [24] https://bsp.berkeley.edu/labs/koehl/pdfs/HowAnimalsMove_Science_2000.pdf letöltve: 2016.08.31.
- [25] <http://kodlab.seas.upenn.edu/uploads/Kod/Koditschek04.pdf> letöltve: 2016.08.31.
- [26] http://ruina.tam.cornell.edu/research/history/mcgeer_1990_passive_dynamic_walking.pdf letöltve:
2016.09.01.
- [27] http://ruina.tam.cornell.edu/research/topics/locomotion_and_robotics/ranger/Ranger2011/ letöltve:
2016.09.01.
- [28] <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1617162/> letöltve: 2016.09.01.
- [29] http://www.polypedal.com/Images/PolypedalPublications/59_Musculoskel_Dynamics.pdf letöltve:
2016.09.01.
- [30] http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1509&context=ese_papers letöltve:
2016.09.05.

- [31] <https://www.coursera.org/learn/robotics-mobility/lecture/zfdjB/4-3-4-transitions-rhex-jerboa-and-minitaur-leaping> letöltve: 2016.09.07.
- [32] <https://biomimetics.mit.edu/research/dynamic-locomotion-mit-cheetah-2> letöltve: 2016.09.07.
- [33] Dynamic locomotion with a Hexapod Robot - Uluc. Saranl 2002
- [34] http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1611&context=ese_papers letöltve: 2016.09.07.
- [35] <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a299453.pdf> letöltve: 2016.09.13.
- [36] <https://www.coursera.org/learn/robotics-mobility/home/week/1> letöltve:2016.09.13.
- [37] <https://www.coursera.org/learn/robotics-mobility/home/week/4> letöltve:2016.09.13.
- [38] <https://www.coursera.org/learn/robotics-mobility/lecture/kQwnC/2-2-2-materials-manufacturing-and-assembly> letöltve:2016.09.14.
- [39] EGE SAYGINER - MODELLING THE EFFECTS OF HALF CIRCULAR COMPLIANT LEGS ON THE KINEMATICS AND DYNAMICS OF A LEGGED ROBOT, MAY 2010 p. 34
- [40] <https://www.coursera.org/learn/robotics-mobility/home/week/2> letöltve:2016.09.28.
- [41] Ervin Burkus, Szilárd Bessenyei, Ákos Odry, István Kecskés, Péter Odry - Test Bench Built for the Identification of the Szabad(ka)-II Hexapod Robot Leg Prototypes 2016
- [42] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Rezg%C3%A9s> letöltve:2016.10.02.

Függelék

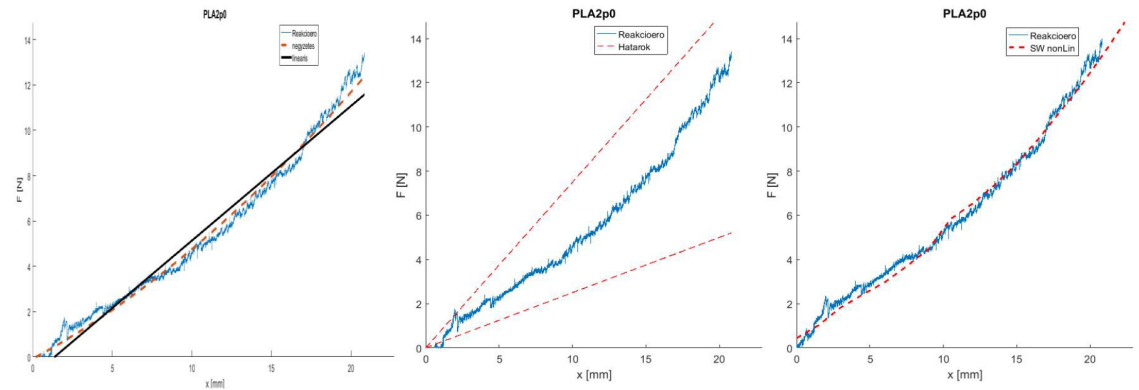
A lábak mérési eredményei

PLA1p7



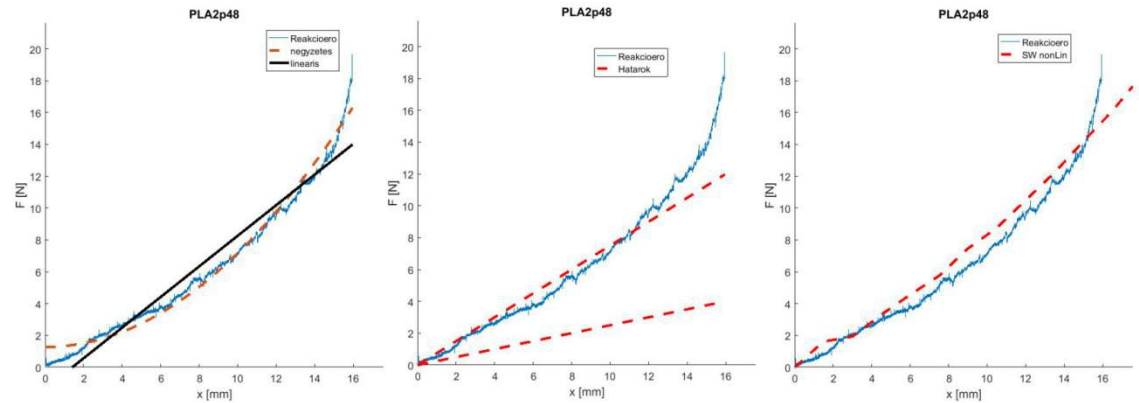
8.0.1. ábra: A PLA1p7 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

PLA2p0



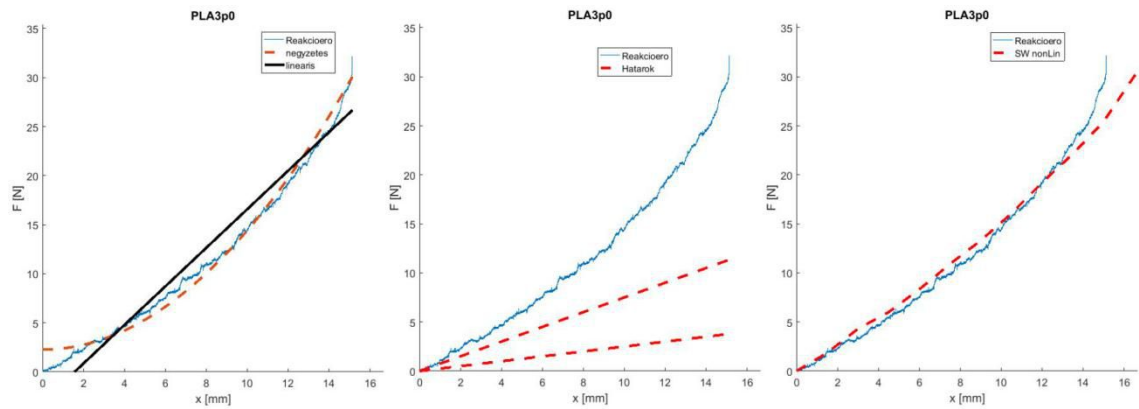
8.0.2. ábra: A PLA2p0 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

PLA2p48



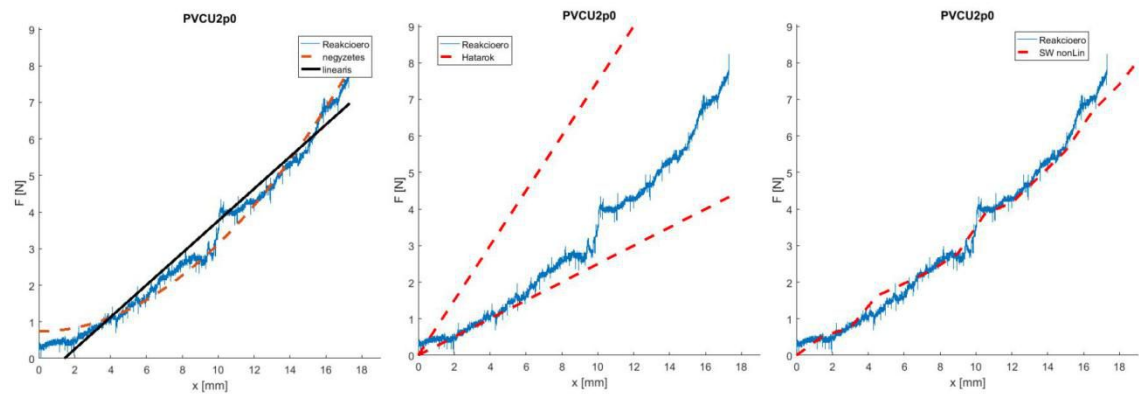
8.0.3. ábra: A PLA2p48 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

PLA3p0



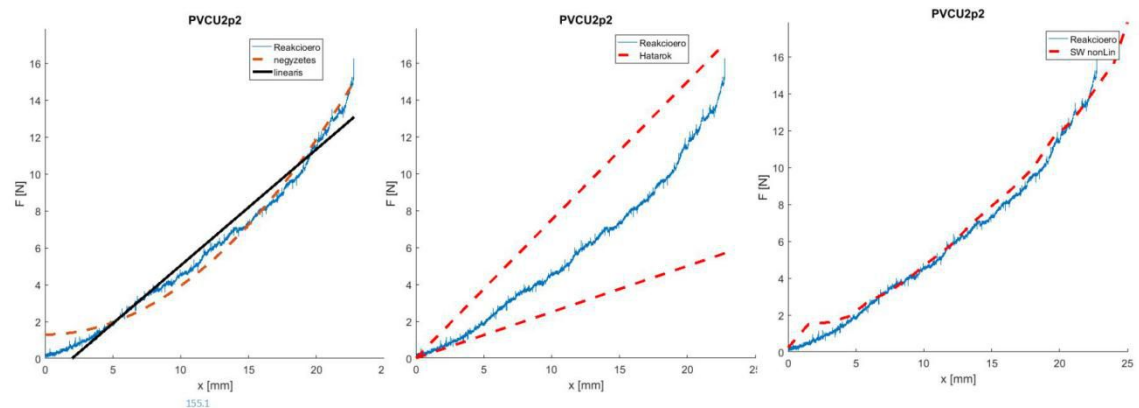
8.0.4. ábra: A PLA3p0 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

PVCU2p0



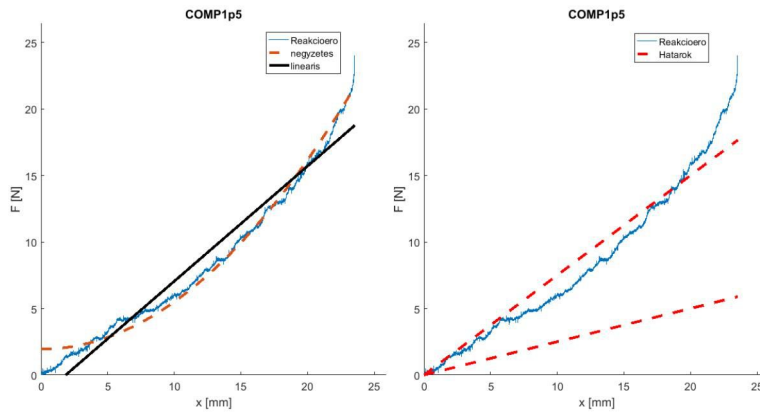
8.0.5. ábra: A PVCU2p0 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

PVCU2p2



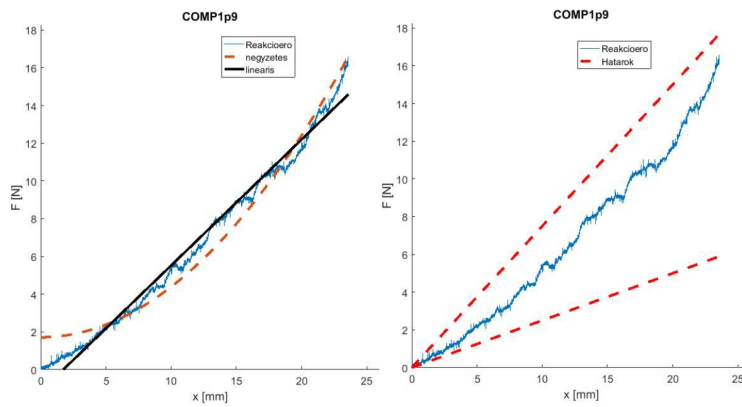
8.0.6. ábra: A PVCU2p2 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

COMP1p5



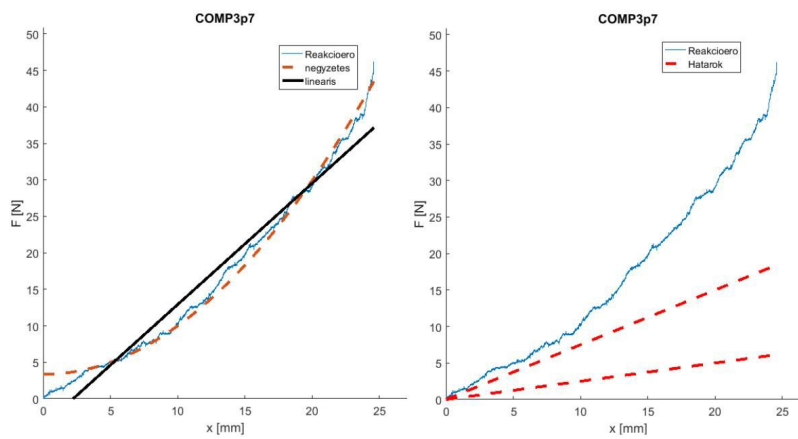
8.0.7. ábra: A COMP1p5 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

COMP1p9



8.0.8. ábra: A COMP1p9 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

COMP3p7



8.0.9. ábra: A COMP3p7 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

SimMechanics által szimulált járásalgoritmusok eredménye

Járás											
		PLA1p	PLA2p	PLA2p4	PLA3p	PVCU2p	PVCU2p	COMP1p	COMP1p	COMP3p	K=100
		7	0	8	0	0	2	5	9	7	0
k	[N/m]	385.2	594.5	961.1	1965.6	438.8	630.2	865.1	667.6	1661.5	385.2
tp	[sec]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
ts/tp	[sec]	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Ψ_s	[deg]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
α	[m/s ²]	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
τ_{max}	[Nm]	4.951	3.431	2.519	1.496	4.367	3.311	2.715	3.202	1.659	4.951
τ_{atl}	[Nm]	0.283	0.141	0.005	-0.155	0.256	0.124	0.031	0.101	-0.103	0.283
ω_{max}	[RPM]	91.667	91.667	91.667	91.667	91.667	91.667	91.667	91.667	91.667	91.667
vatl	[mm/s]	69.051	73.491	74.435	89.709	71.807	73.026	73.108	71.771	86.2	69.051
vatl	[body/s]	0.197	0.21	0.213	0.256	0.205	0.209	0.209	0.205	0.246	0.197
Fz_max	[N]	53.38	34.337	17.811	14.835	48.252	31.688	19.55	29.166	15.233	53.38
$\tau_{max}/vatl$		71.695	46.684	33.843	16.671	60.82	45.344	37.136	44.615	19.242	71.695
$\tau_{max}/vatl$		4.103	1.921	0.073	-1.732	3.566	1.696	0.419	1.407	-1.193	4.103
Fz_max/vatl.		773.058	467.228	239.275	165.367	671.972	433.923	267.416	406.375	176.723	773.058

8.0.1. táblázat: A járás szimulációjának eredményei

Futás											
		PLA1p7	PLA2p	PLA2p4	PLA3p0	PVCU2p	PVCU2p	COMP1p	COMP1p	COMP3p	
			0	8		0	2	5	9	7	
k	[N/m]	385.2	594.5	961.1	1965.6	438.8	630.2	865.1	667.6	1661.5	
tp	[sec]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	
ts/tp	[sec]	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	
Ψ_s	[deg]	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
α	[m/s ²]	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	
τ_{max}	[Nm]	6.01	4.974	4.148	3.474	5.791	4.849	4.295	4.732	3.591	
τ_{atlag}	[Nm]	0.339	0.438	0.32	0.139	0.477	0.422	0.345	0.415	0.18	
ω_{max}	[RPM]	71.717	71.717	71.717	71.717	71.717	71.717	71.717	71.717	71.717	
vatlag	[mm/s]	208.926	318.482	315.703	251.019	291.116	314.941	319.361	320.647	263.155	
vatlag	[body/s]	0.597	0.91	0.902	0.717	0.832	0.9	0.912	0.916	0.752	
Fz_max	[N]	52.565	46.08	42.463	40.749	51.312	45.692	42.995	44.909	40.878	
$\tau_{max}/vatlag$		28.766	15.617	13.138	13.839	19.894	15.395	13.45	14.757	13.645	
$\tau_{max}/vatlag$		1.622	1.374	1.012	0.555	1.64	1.341	1.079	1.293	0.684	
Fz_max/vatl.		251.595	144.686	134.502	162.333	176.261	145.083	134.627	140.058	155.338	

8.0.2. táblázat: A futás szimulációjának eredményei