

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 HEXAPOD ROBOTLÁB
DINAMIKUS MODELLEZÉSE, OPTIMALIZÁLÁSA
ÉS A LÁB VALIDÁLÁSÁRA SZOLGÁLÓ
MÉRŐMŰSZER FEJLESZTÉSE**

Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat

Szerző:
Bessenyei Szilárd

Konzulens:
Burkus Ervin

Újvidék, 2016

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	3
Abstract	4
1 Bevezetés	5
2 RHex-szerű robot modellezése	7
2.1 Statikus rugómodellek	8
2.2 Dinamikus rugómodell.....	9
3 Az RHex-szerű hexapod robot lába	11
3.1 A láb anyaga.....	13
3.2 Megvalósított robotlábak	14
3.3 A láb szimulálása végeselemes módszerrel	19
4 Test Bench.....	22
4.1 A Test Bench szerkezete	23
4.2 A Test Bench számítógépes kezelő felülete.....	24
4.3 A Test Bench beágyazott felülete.....	26
4.4 Mérés folyamata	31
4.5 Pályagenerálás	32
4.6 Szabályozó	35
4.7 Statikus mérés, validációs eredmények és rugóállandók meghatározása.....	35
4.8 Dinamikus mérés	40
5 A CAD modell kibővítése és a rugóállandó optimalizálása.....	41
5.1 Részecske-raj optimalizáció (PSO)	44
5.2 Járásalgorithmus paramétereinek és a rugóállandó optimalizálása	46
6 Konklúzió.....	49
Irodalomjegyzék.....	52

Összefoglaló

Az RHex egy bioinspirált, hat lábú robot mely lábanként egy-egy aktuátorral rendelkezik. Lábai C formájúak melyek teljesen körbe tudnak fordulni. A robot megfelelő dinamikus viselkedéséhez elengedhetetlenül fontos a lábparaméterek hangolása.

A dolgozat bemutatja egy RHex szerű robot lábának tervezését, megvalósítását, ezen lábak szimulációjának eredményeit, a Test Bench lábparamétert mérő műszer megépítését és az általa validált eredményeket. Geometriáját tekintve a láb félkör formájú. Optimális rugóállandója és mechanikai terhelhetősége a robot tömege alapján számítható. A megtervezett láb CAD modellje és anyagának mechanikai tulajdonságai alapján, végeselemes módszerrel lett meghatározva a láb rugóállandója, sajátfrekvenciája és mechanikai terhelhetősége. A dolgozatban ismertetve van több fajta anyagú és megmunkálási technológiájú láb megvalósítása is.

A szimulációs eredmények validálása a saját fejlesztésű Test Bench mérőműszer segítségével lett elvégezve. A Test Bench négy fő részből áll: lábütő készülék, motormeghajtó, mérőáramkör és számítógépes kezelőfelület. A lábütő készüléken egy DC motor által meghajtott forgattyús mechanizmus található. A motor szabályozását és meghajtását valamint a jelek elő-feldolgozását illetve digitalizálását egy erre a célra kialakított ARM Cortex-M4 mikrovezérlővel rendelkező beágyazott felület végzi. A mérési folyamata öt szakaszból áll: pályagenerálás, motorszabályozás, analóg bemenetek beolvasása, digitális szenzorok leolvasása, a mért adatok továbbítása a számítógépnek. A folyamat vezérlése és a jelek megjelenítése egy .NET alapú számítógépes kezelőfelületen történik.

Jellegüket tekintve, a méréseket feloszthatjuk statikus és dinamikus mérésekre. Statikus mérésekkel a láb terhelhetősége és rugóállandója számítható ki, dinamikus mérésekkel pedig a láb csillapítása illetve sajátfrekvenciája.

Kulcsszavak: RHex, C alakú robotláb, modellezés, validálás, mérőműszer

Abstract

The RHex is a bio-inspired six-legged machine with one actuator for each leg. The C shaped legs can completely turn around, so it's movement is similar to a wheeled robot. The tuning of the leg parameters is crucial for the appropriate dynamic behavior of the robot.

The paper presents the design and realization of an RHex-like robot's leg as well as the simulation results along with the construction of the Test Bench measuring device and its validation results. The legs geometry is a half circle, and it's optimal spring constant and mechanical endurance can be calculated from the robots weight. The spring constant, mechanical endurance and natural frequency was determined from the leg's CAD model and the used material's mechanical characteristics using finite element analysis. The paper presents multiple variations for realizing the leg with different materials and processing techniques.

Test Bench measuring device was used for the validation of the simulation results. The Test Bench has four main parts: leg hitting device, driving part, measuring circuit and a computer interface. The leg hitting device consists of a crank mechanism driven by a DC motor. The DC motor control, the drive and the signal pre-processing and digitization is done by an embedded environment with an ARM Cortex-M4 microcontroller. The measuring process has five stages: path generation, motor control, analog input read, digital sensor read, and transmission of the measured values to the computer. The control of the process as well as the visualization of the signals is achieved by a .NET based computer interface.

The measurements can be divided into static and dynamic measurements. With the former we can calculate the leg's spring constant and endurance, while the latter is used for calculating the characteristic frequency and attenuation.

Key words: RHex, C shaped robot leg, modeling, validation, measuring instrument

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.

2001-ben Martin Buehler fejlesztette ki az RHex első változatát. A hatlábú masina alulirányított, lábanként egy-egy aktuátorral rendelkezik. A lábai egy küllővel rendelkező keret nélküli kerékek feleltek meg. A haladási sebessége elérte az 1 testhossz/s-t, mely rekordnak számított az autonóm járó robotok között. Másik kimagasló eredménye, hogy nagy energiahatékonysággal mozgott. [15]



1.0.1. ábra: Az első RHex bal oldalt [11] és egy továbbfejlesztett változata jobb oldalt [7]

A lábgeometria továbbfejlesztésével elérték az 5 testhossz/s 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 túalakú láb mely a 1.0.1. ábrán látható bal oldalt, második egy összetettebb több

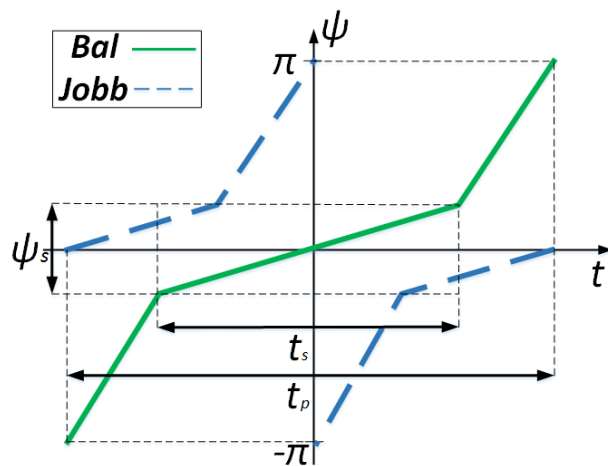
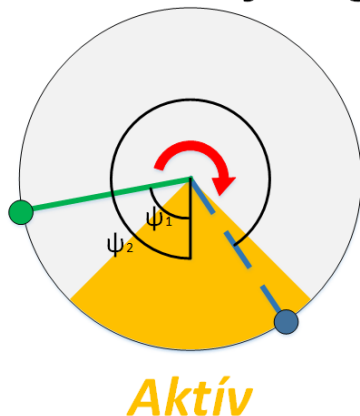
lemezből álló, a harmadik pedig a C alakú rugalmas láb mely az 1.0.1. ábrán látható jobb oldalt.

Az Rhex szerű robotok mechanikai felépítése egyszerűbb mint a legtöbb hexapod roboté, mivel egy aktuátorral rendelkeznek 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 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 nagyobb sebességgel fordul körbe. Tétlen állapotban a robotláb szögsebessége megegyezik az aktív állapot szögsebességével, viszont itt nem érintkezik a talajjal.

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 szögtartományban t_s ideig forog aktív üzemmódban, $2\pi - \Psi_s$ szögtartományon belül pedig $t_p - t_s$ ideig szabadon forog körbe. [11]

Szabadon forog



1.0.2. ábra: Buehler órájának felépítése bal oldalt és a motorok pozíciójának időbeli függvénye jobb oldalt [15]

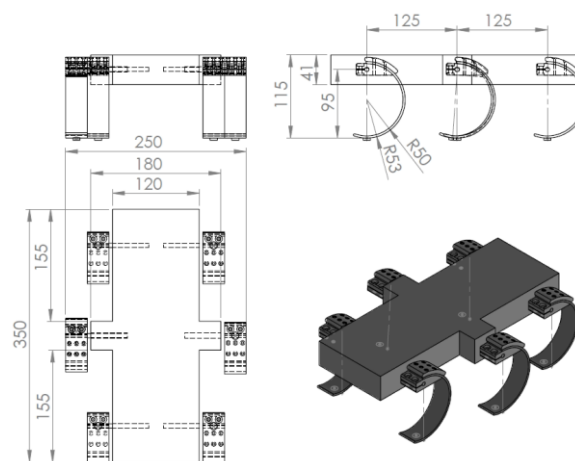
A robot tömegközéppont trajektóriáját figyelve járás közben, a lábak hatását egy virtuális rugós lábbal lehet helyettesíteni. A virtuális bal láb jelével a hexapod bal első, jobb középső és bal hátsó lábat irányítjuk, a virtuális jobb láb jelével pedig a jobb első, bal középső és a jobb hátsó lábat.

A dinamikus mozgások végzéséhez, mint például a futás, a hexapod lábainak a robot testtömege alapján méretezett rugóállanddal kell rendelkezniük, adott sajátfrekvenciával és csillapítással. A robot lábán ébredő mechanikai feszültség nem haladhatja meg az anyagra jellemző folyáshatárt, ugyanis akkor az anyagban plasztikus alakváltozás keletkezik. A láb kivitelezéséhez több fajta gyártási technológia közül választhatunk, mint a 3D nyomtatás, kézi laminálás, fröccsentés vagy forgácsolás. A gyártásitechnológiák több tulajdonságát érdemes párhuzamosan vizsgálni, mint például az ár, elérhetőség, összetettség, pontosság, elkészítési idő és megbízhatóság. A CAD modell és anyag mechanikai paraméterei 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.

2 RHex-szerű robot modellezése

Első lépésben egy próba CAD modell rajzoltam SolidWorks programmal. A test kialakításához a stabil mozgás érdekében fontos, hogy a súlypont a váz középpontjában legyen.

A SolidWorks környezetben egy assembly-ben a robot testéhez hozzárendeltem a tengelyeket, majd ezekhez a lábtartókat és a lábat. Az alkatrészekhez a tömegüket, vagy az anyagukat rendeltem hozzá. A második esetben a test térfogata és az anyag sűrűsége alapján a program automatikusan számította ki a tömeget. A lábak aljára elhelyeztem egy kis hengert, amely a talajkontaktus helyét adja meg. A tömeg és a dimenziók alapján meghatározom a robotláb optimális rugóállandóját, dimenzióinak tartományát.

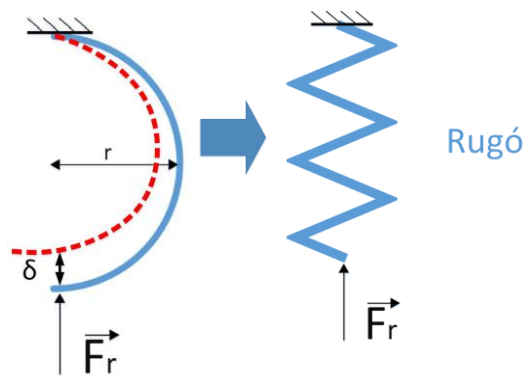


2.0.1.ábra: A CAD modell ortogonális vetületei és izometrikus nézete

A robot magassága 115.5 mm, hossza 350 mm és szélessége 250 mm. Össztömegét maximálisan 3.3 kg-ra becsülöm akkumulátorok és más tartozékok figyelembevételével. Az erőkar hossza ami a robot csuklója és talajkontaktus között helyezkedik el 95 mm, a CAD modell lábának belső átmérője 100 mm, külső pedig 106 mm.

2.1 Statikus rugómodellek

A robot megfelelő dinamikus viselkedéséhez elengedhetetlenül fontos a láb statikus illetve dinamikus tulajdonságainak hangolása. Statikus esetben a legegyszerűbb a lineáris rugómodell. 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.



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

$$F_r = -k \cdot \delta \quad (2.1.1.)$$

A végeelemes 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:

$$F_r = -k \cdot \delta^2 \quad (2.1.2.)$$

A rugóállandókat a mért vagy szimulált eredményhez illeszthetjük hozzá. Az illesztésnél 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.

$$Y = \begin{pmatrix} y(1) \\ \vdots \\ y(n) \end{pmatrix}, \Phi = \begin{pmatrix} \varphi(1) \\ \vdots \\ \varphi(n) \end{pmatrix} \quad (2.1.3.)$$

$$\hat{g} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (2.1.4.)$$

2.2 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. [9]

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 [17].

$$m\ddot{\chi} + b\dot{\chi} + k\chi = 0 \quad (2.2.1.)$$

A rendszer sajátfrekvenciája: [4]

$$f_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.2.2.)$$

$$\omega_k = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

A kritikus csillapítási tényező, ahol a rendszer megszűnik rezegni: [4]

$$b_k = 2\sqrt{km} \quad (2.2.3.)$$

A rendszer csillapítási viszonya: [4]

$$\zeta_r = \frac{b}{2\sqrt{km}} \quad (2.2.4.)$$

A csillapított rendszer differenciaegyenletének megoldása, ahol ϑ_r a fázisszöge, X pedig a kezdeti kitérés: [9]

$$\chi(t) = X e^{-\zeta \omega_k t} \cos\left(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_k t - \vartheta_r\right) \quad (2.2.5.)$$

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.

$$f_{cs} = 2\sqrt{1-\zeta^2} f_k \quad (2.2.6.)$$

Az oszcillátor kinetikus energiája T_e , potenciális energiája V_e , összenergiája pedig η_{HO} .

$$\begin{aligned} T_e(\dot{\chi}) &= \frac{1}{2} m \dot{\chi}^2 \\ V_e(\chi) &= \frac{1}{2} k \chi^2 \\ \eta_{HO} &= T_e(\dot{\chi}) + V_e(\chi) \end{aligned} \quad (2.2.7.)$$

A [17] levezetés alapján meghatározható, hogy az oszcillátor teljes energiájának csökkenése az idő függvényében:

$$\dot{\eta}_{HO} = -b \dot{\chi}(t)^2 \quad (2.2.8.)$$

A csillapított rezgéseknél a viszkózus súrlódás csak pozitív lehet, vagyis $b > 0$, ezért az egyenletből megállapítható, hogy az oszcillátor energiája az időben csak csökkenhet. [17] 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 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. [9] A 9 fajta láb elkészítését ismertetem a dolgozatban, melyeket először végeelem módszerrel szimuláltam, azután pedig a Test Bench nevű mérőműszerrel validáltam [9]. Az elvégzett mérések és a szimulációs eredmények alapján kiválasztottam az optimális anyagú és kialakítású lábat, mellyel a robot a leghatékonyabban tud haladni.

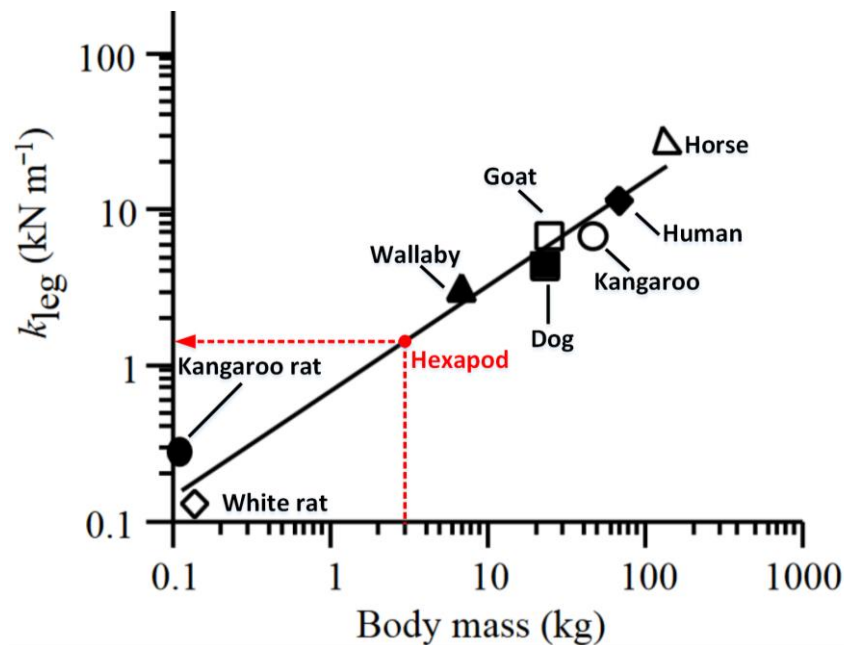
A láb kialakításakor kitűzött általános célok:

- 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 fogyasztás 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. [9]

A robotláb modellezését célszerű az emlősök lábai alapján végezni, mivel az emlősök a természetben nagy energiahatékonysággal mozognak és kiváló alkalmazkodóképességgel rendelkeznek. Az állatok futás közben lábukat rugóként használják. 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 3.0.1. ábrán láthatunk. [11] A hexapod maximális tömege 3,3 kg, ez alapján a kisebb emlősökhöz hasonlatos. 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, e tény a mechanikai szimuláció is alátámasztja.



3.0.1. 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:

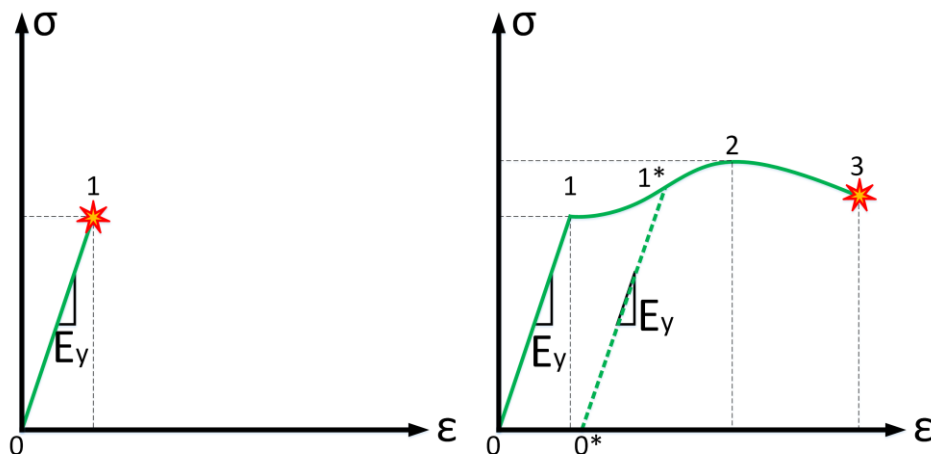
- A lineáris rugóállandót a robot tömegéhez kell hangolni. Az állatok mérete és a lábukban található inak aránya alapján meghatározható, hogy a robotláb függőleges rugóállandójának minimális értéke 250 N/m, míg a maximális értéke 750 N/m.
- Tudnia kell folyamatosan továbbítani a motor áttételén megjelenő 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.

3.1 A láb anyaga

A láb alapanyaga nagymértékben befolyásolja a szerkezetének tulajdonságait. Egyik fő cél a megfelelő teherbírás mellett a láb rugalmasságának optimalizálása. A rugalmassági modulus (Young's vagy tensile modulus) írja le az anyag merevségét. Kizárólag a szakító diagram 1-es pontjáig érvényes, ahol az egyenes meredekségének felel meg. Jele E_y , a mechanikai feszültség (σ) megnyúlás (ϵ) szerinti deriváltjaként kapható meg. [9] Az anyag annál rugalmasabb minél kisebb a rugalmassági modulusa.

$$E_y = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (3.1.1)$$



3.1.1. ábra: Egy rideg anyag szakító diagramja bal oldalt és egy hajlítható anyagé jobb oldalt [5] A töréspont a csillaggal jelölt részben jelentkezik

Az anyagokat deformálódásuk szempontjából alapvetően rideg vagy képlékeny (hajlítható) anyagokra oszthatjuk fel. A folyáshatár (Yield strength) az a mechanikai

feszültség, amely után az anyagban plasztikus deformáció¹ jön létre, amely a szakító diagramon az 1-es pontnak felel meg. A rideg anyagok mint az üveg vagy a kő, nem rendelkeznek folyáshatárral, hanem csak törőszilárdsággal, amely a mechanikai feszültségnél eltörik. A képlékeny anyagoknál a felső folyáshatárnál plasztikus deformáció lép fel, majd utána a Young modulustól eltérő nemlineáris alakváltoztatási szakasz lép fel, ami az 1* és a 2-es pont között van. Ha a képlékeny anyagot tovább terheljük 2-es és a 3-as pont közötti szakasz, kontrakciós alakváltozás lép fel. Ha tovább növeljük akkor pedig a 3-as pontban eltörik az anyag. [12]

Bevezethetjük az anyagok fajlagos rugalmassági energiáját, amely szemlélteti, hogy azok hogyan használhatók rugóként. A lábnál cél a jó terhelhetőség és a nagyfokú rugalmasság elérése. A terhelhetőség egyenesen arányos a folyáshatár nagyságával, az anyag rugalmassága pedig a rugalmassági modulussal fordítottan arányos. [11]

$$U = \frac{1000 \cdot S_y}{E_y} \quad (3.1.2.)$$

Anyag	E_y [Gpa]	S_y [MPa]	$U=(S_y/E_y) \times 1000$
Acél, AISI 1045	205.00	585.00	2.85
Epoxy	3.50	69.00	19.71
E-Glass üvegszál (73.3%) epoxy	56.00	1640.00	29.29
ABS	2.00	48.26	24.13
PLA	2.21	57.80	26.15
Sika Biresin G27	1.30	32.00	24.62
PVC	3.20	47.00	14.69

3.1.1. táblázat: A rugalmassági modulust és a folyáshatárt összegző táblázat[8]

A dolgozat egyik célja, hogy összehasonlítsuk az anyagokat mechanikai tulajdonságai, megmunkálási technológiájuk és belső szerkezetük szerint. A cél az optimális tulajdonságú és megmunkálási technikájú anyag kiválasztása a láb részére.

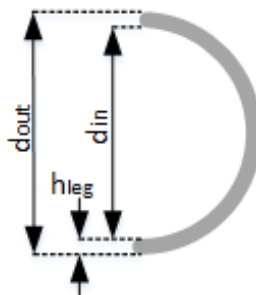
3.2 Megvalósított robotlábak

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

¹ Maradandó alakváltozás

folyamatának idejét, összetettségét és költségét. A szimulációnál azzal is kell számolni, hogy nem minden esetben tekinthető a 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. A lábnév első fele az anyagját írja le (PLA, PVCU, COMP), a második fele pedig a vastagságát (1p7 láb vastagsága 1.7 mm).



3.2.1. ábra: A láb dimenziói

	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	1.90	17.3	Üvegszál kompozit
9	COMP3p7	6 réteg	E-glass	110.0	117.4	3.70	33.8	Üvegszál kompozit

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

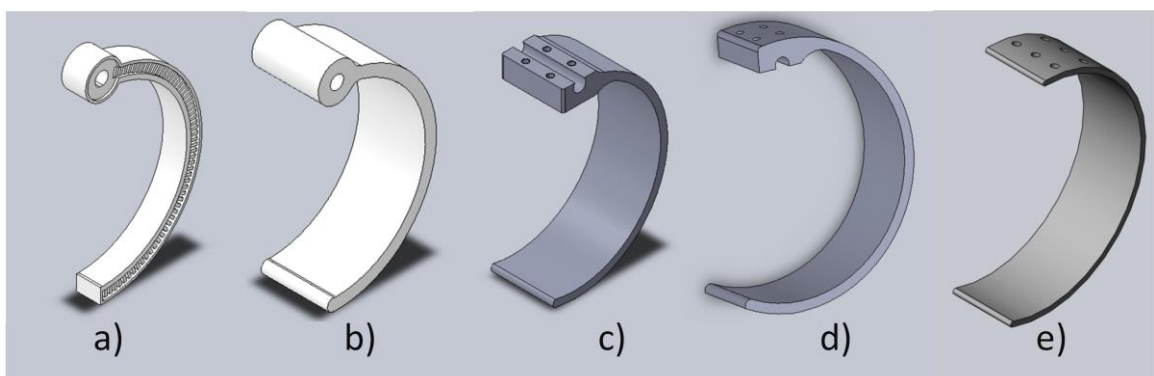
A lábakhoz tervezett lábrögzítőt PLA-ból nyomtattam. Megtervezésekor fontos szempont volt, hogy mindegyik lábbal kompatibilis legyen. Összesen két lábrögzítőt terveztem. Az egyik a robot testéhez, a másik pedig a Test Bench lábütő készülékhez készült. A lábrögzítő össztömege csavarokkal együtt 45,4 gramm.

3D nyomtatott lábak PLA anyagból

Napjainkban a legelterjedtebb példája az additív megmunkálásnak a 3D nyomtatás, amely során a 3D modellt egymásra épülő rétegekből alakítják ki. Legtöbb esetben a munkadarab külső rétegei tömöttek, belseje pedig egy bizonyos minta szerint üreges. A kivitelezés fő előnyei, hogy rövidebb ideig tart a nyomtatás, kevesebb anyag

fogy, kisebb tömegű a tárgy. Hátránya, hogy ilyen esetben a munkadarab mechanikai tulajdonságai nagymértékben eltérnek a tömör anyagtól, és a mechanikai terhelés nem oszlik el olyan jó az anyag belsejében. A 3D nyomtatás segítségével a költséghatékonyság mellett az összetett munkadarabok is egyszerűen megvalósíthatók. A nyomtatásnál figyelembe kell venni a nyomtatófej átmérőjét. Kisebb átmérőjű nyomtatófejjel (0,25 mm) pontosabban lehet dolgozni, viszont a nagyobb átmérőjű fejjel (0,6 mm-től 1,0 mm-ig) nagyobb munkadarabok esetén gyorsabb a nyomtatás. Leginkább ABS és PLA termoplasztikus műanyagokat alkalmaznak 3D nyomtatásra mivel könnyű velük dolgozni és az árak is elérhető. Hátrányuk, hogy magas környezeti vagy felületi hőmérséklet mellett könnyen deformálódhatnak az alacsony olvadáspontjuk miatt.

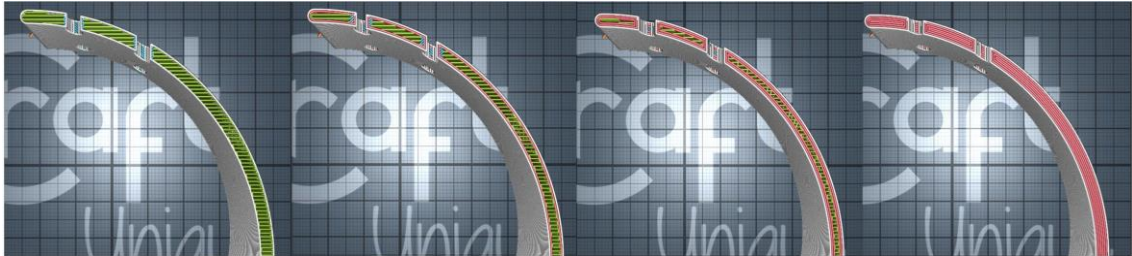
Több fajta felépítésű lábat próbáltam szimulálni. Fő célom az volt, hogy 3D nyomtatásához egy olyan lábat tervezek meg, mely minél kisebb rugóállandó mellett, minél jobb a mechanikai terhelhetősége. Első próbálkozásként a 3D nyomtató kitöltési tényezőjét akartam úgy befolyásolni, hogy egy általam megrajzolt rács szerkezet legyen a láb belsejében. Itt küllő és más íves struktúrákkal is próbálkoztam. A láb külső rétegének vékonyításával és szélességének növelésével növeltem a mechanikai terhelhetőségét és csökkentettem a rugóállandóját. A harmadik modellnél a rácsszerkezet helyett tömör anyagot alkalmaztam, mivel azt végeeselemes szimulációval megállapítottam, hogy az jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint az üreges. Mivel több fajta anyagból készült lábat vizsgálok, ezért célszerű volt az utolsó modellnél a láb fejét úgy kialakítani, hogy kompatibilis legyen a PVC-U és az üvegszálalás lábak alakjával.



3.2.2. ábra: Lábgeometria változatai

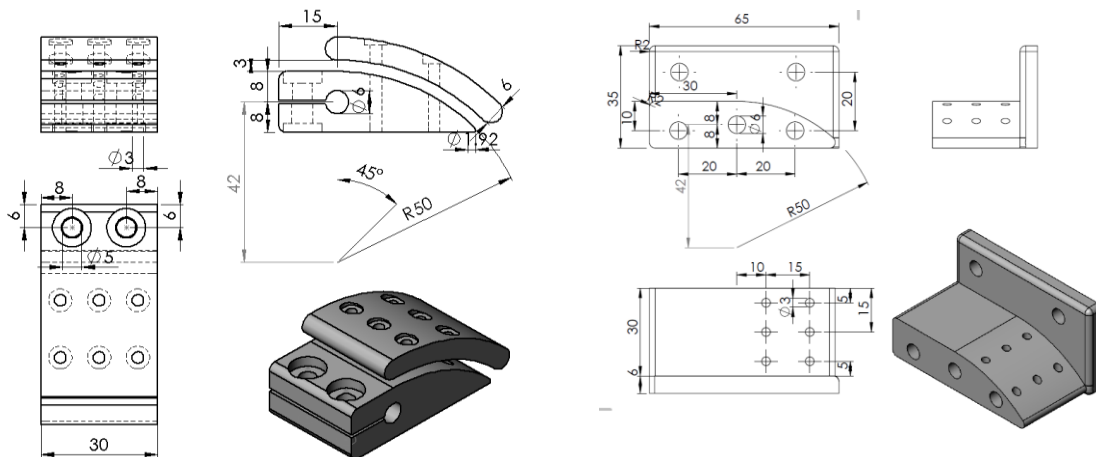
Végeselemes szimuláció alapján arra a megállapításra jutottam, hogy a tömör anyagú láb jobb terhelhetőségi és hajlékonysági aránnyal rendelkezik mint az általam tervezett üreges lábak. A CraftWare szoftverben lehetőség van arra, hogy a külső rétegek számának megnövelésével a láb rétegei között ne legyen üreg.

Az 1,7 és az 2,48 mm vastagságú PLA lábak CraftBot 3D nyomtatóval lettek kinyomtatva, a 2,0 és a 3,0 PLA lábak pedig RepRap Prusa i3-mal. A CAD modellező programban 1,6 és 2,4 mm vastag lábakat terveztem, a realizáció során a nyomtatók eltérő pontossággal nyomtatják ugyanazt modellt. További tervezést már a validálás eredménye után érdemes elkészíteni, mivel akkor már ismerjük a szimuláció és a valós adatok közötti eltérést.



3.2.3. ábra: Az alap rácsszerkezettel rendelkező láb keresztmetszete és az egyre megnövelt külső átmérő balról jobbra haladva

A 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 lábrögzítő össztömege csavarokkal együtt 45.4 gramm.



3.2.4. ábra: A robot és a Test Bench lábtartója

PVC-U láb nyomócsőből

A PVC-U lábakat méretre vágtam egy nyomócsőből. A PVC hátránya, hogy nem lehet egyértelműen megállapítani a plasztikus deformáció létrejöttét, ellentétben a PLA anyaggal. A másik hátránya, hogy a cső dimenziói adottak, így nem alakítható ki belőle tetszőleges átmérőjű láb. Előnye, hogy tömör, kis költséggel sok láb kialakítható.

Üvegszálás kompozit láb elkészítése kézi laminálással

A kompozit elkészítéséhez először egy szerszámot kell készíteni, melynek a kompozit felveszi majd az alakját. Esetemben ez egy PVC cső, melynek poliészter lábai vannak. A kompozit elkészítése a következő lépésekből áll:

- a) A szerszámra a formaleválasztó anyag felvitele,
- b) A megszáradt formaleválasztóra katalizált gyanta felkenése.
- c) A felkent gyantára az üvegszál belefektetése.
- d) A szálal anyag gyantával történő átkenése.
- e) A kompozit térhálósítása
- f) A térhálósodott kompozit méretre szabása

Az a, b, c lépések ismétlésével lehet több réteget létrehozni. Utolsó lépésként érdemes egy bordázott légtelenítő hengerrel összetömöríteni a rétegeket a levegő és a fölös gyantamennyiség kinyomása. A vágás után érdemes betenni a darabokat pár órára utótérhálósodni, ami javítja a kompozit merevségét, hőállóságát és csökkenti az esetleges szaghatást.

Az üvegszál első előnye, hogy nagy fajlagos rugalmassági energiával rendelkezik. A második, hogy a rétegszerkezete változtatásával befolyásolni tudjuk a láb rugóállandóját és a laterális szilárdságát. Esetemben hat réteget vittünk fel és a rétegek szögei megegyeztek, ezért a rétegszerkezete: $[0, 0, 0, 0, 0, 0]$. Szimmetrikus rétegszerkezet esetén mint a $[0, -45, 45, 0, 45, -45, 0]$, nagyobb laterális szilárdsággal rendelkezik a kompozit. Az üvegszálak hátránya, hogy rétegszerkezetük miatt azokat sikerült végeleges módszerrel modellezni.



3.2.5. ábra: A legyártott robotlábak

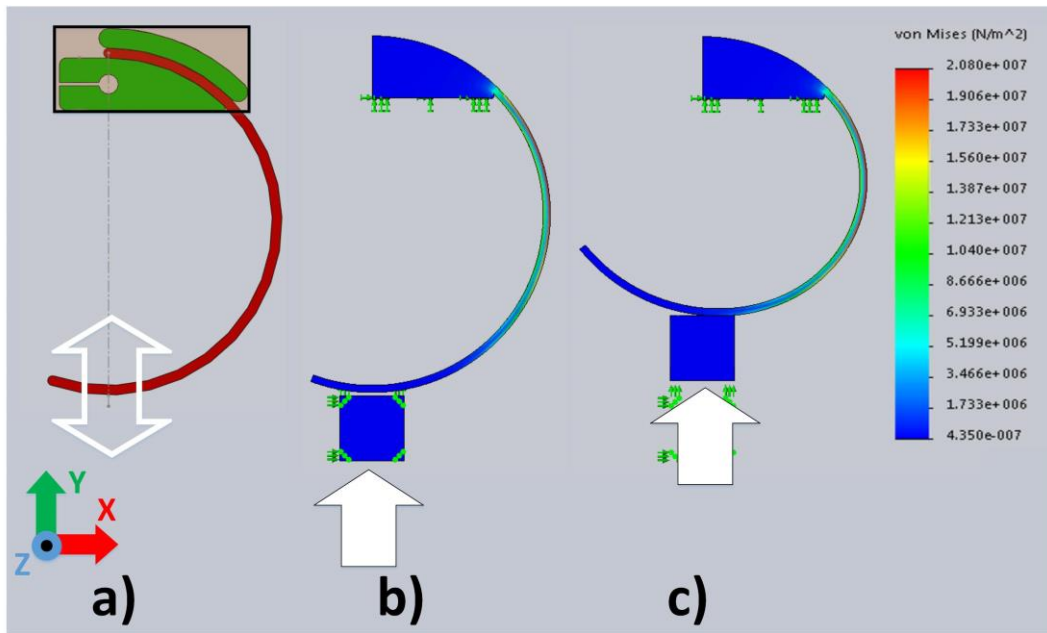
3.3 A láb szimulálása végesselemes módszerrel

A legyártás előtt a megtervezett láb CAD modellje és anyagának mechanikai tulajdonságai alapján, végesselemes módszerrel meghatároztam a láb rugóállandóját, sajátfrekvenciáját és mechanikai terhelhetőségét. Jellegüket tekintve, a szimulációkat feloszthatjuk statikus és dinamikus szimulációkra. Statikus szimulációnál 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 validáltam.

Statikus nemlineáris szimuláció

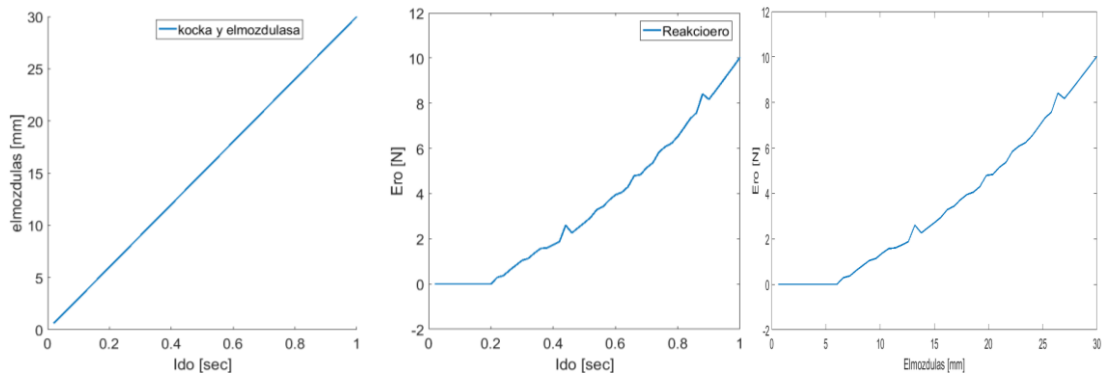
Statikus esetben a láb geometriájából adódóan a deformáció nemlineáris, ezért a SolidWorks-ben nemlineáris szimulációt kellett alkalmaznom. A szimulációk során egy leegyszerűsített modellt használtam, melynek tartó részét lerögzítettem. Az

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.



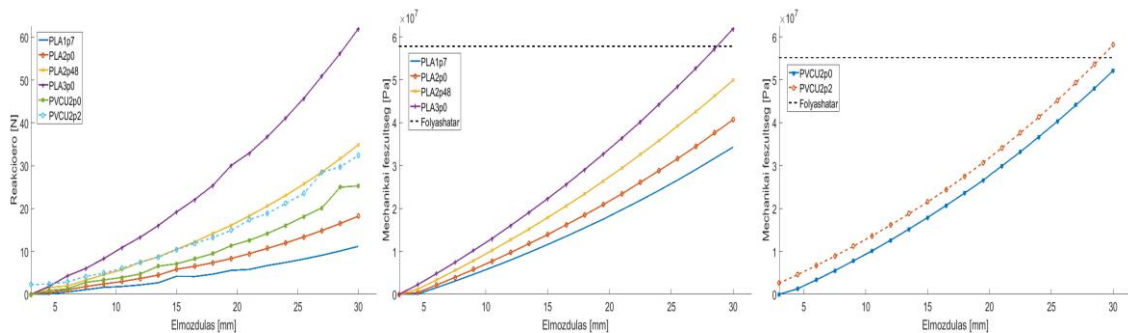
3.3.1. ábra: A lábtartó és a láb CAD modellje (a ábra), a nemlineáris szimuláció alap- (b ábra) és végállapota

A szimuláció a Test Bench által végzett statikus mérésfolyamat 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.



3.3.2. ábra: A kocka y szerinti elmozdulása az idő függvényében bal oldalt; 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.



3.3.3. ábra: A PLA és PVCU lábak erő-elmozdulás grafikonja nemlineáris szimulációval bal oldalt, a PLA lábak belső mechanikai feszültsége az elmozdulás függvényében középen és a PVCU lábak belső mechanikai feszültsége az elmozdulás függvényében jobb oldalt

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.

	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]	f_4 [Hz]	f_5 [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

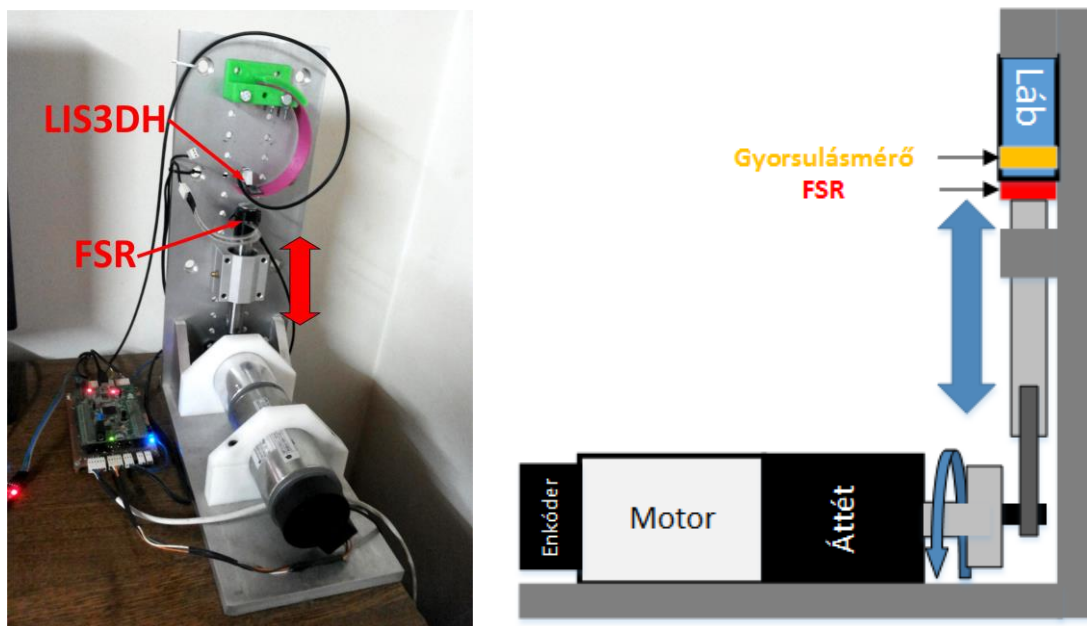
3.3.1. táblázat: a PVC-U láb sajátfrekvenciái

4 Test Bench

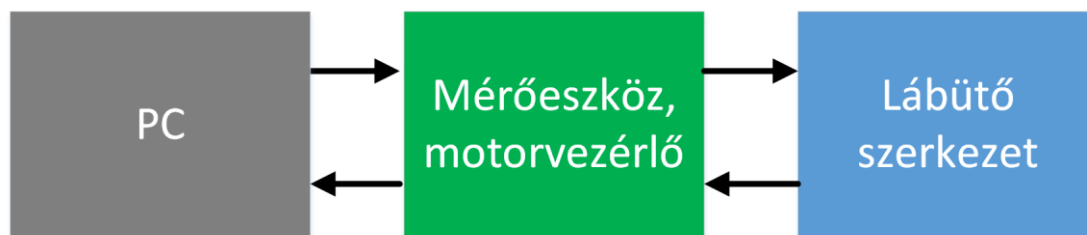
A láb modellének validálásához meg kellett terveznünk és építenünk egy Test Bench eszközt. Az elkészült szerkezet a 4.0.1. ábrán látható. A Test Bench feladata hogy hardveresen szimulálja a járás közben illetve az eséskor jelentkező erőhatásokat, illetve, hogy mérje a jelentkező reakciókat. A következő feladatokat kell ellátnia:

- A robot lábra a megfelelő erővel és sebességgel kell hatnia, valamint megadott pozícióba kell összenyomni a lábat.
- Mérnie kell az erőbehatás helyén (a talaj és a talp érintkezésénél) keletkező erőket és vibrációkat (gyorsulásokat).
- Mérnie kell a láb, test felőli oldalán keletkező erőket és vibrációkat.
- A robotlábát lehet terhelni különböző súlyokkal, melyek a robot egy lábra eső tömegét reprezentálják.

Jellegüket tekintve, a méréseket feloszthatjuk statikus és dinamikus mérésekre. Statikus mérésekkel a láb terhelhetőségét és rugóállandóit tudjuk meghatározni az összenyomás hatására jelentkező erők alapján. Dinamikus mérésnél a lábra impulzus jellegű erőhatást fejtünk ki és az ebből eredő gyorsulás tranzienseket vizsgálhatjuk. A gyorsulás adatokból a rendszer csillapítását illetve sajátfrekvenciáját számíthatjuk.



4.0.1. ábra: A megvalósított láb Test Bench bal oldalt és a lábütő szerkezet felépítése jobb oldalt



4.0.2. ábra: a Test Bench felépítése

4.1 A Test Bench szerkezete

A Test Bench eszközt egy DC motor hajtja meg, egy forgattyús mechanizmuson keresztül. A forgattyús mechanizmus egy a csúszkán keresztül fejt ki a kívánt hatást a lábra.

A motor szabályzását és meghajtását valamint a jelek elő-feldolgozását illetve digitalizálását egy erre a célra kialakított ARM Cortex-M4 mikrovezérlővel rendelkező beágyazott felület végzi. A vezérlés és a jelek megjelenítése egy számítógépes szoftverrel történik. A szerkezete a 4.3.1. ábrán látható.

A forgattyú meghajtáshoz egy Dunkermotoren GR63X55 DC motor és egy PLG 63 Planetary Gearbox választottunk. A motor és a reduktor fontos paramétereit az 1. táblázatban tartalmazza [9].

Motor GR 63x55	
Üresjárat fordulatszám:	3350 rpm,
Folyamatos nyomaték:	$M = 0.27 Nm$
Indítónyomaték:	2.11 Nm
PLG 63	
Áttét:	$n = 10$
Hatásfok:	$\eta = 0.9$

4.1.1. táblázat: a GR63x55 DC motor paramétereit és a PLG63 áttételnek paramétereit

A forgattyúra több pontban lehet csatlakoztatni a hajtókart ($r = 20-30$ mm tartományban). A forgattyú csatlakozásától függően választhatunk nagyobb nyomaték, illetve nagyobb lineáris sebesség között. A csúszka maximális sebességét az 4.1.1. képlettel számíthatjuk ki:

$$v_{\max} = \frac{f}{n} \cdot 2\pi \cdot r_{\max} = \frac{56}{10} \cdot 2\pi \cdot 0.03 \approx 1 \frac{m}{s} \quad (4.1.1.)$$

A maximálisan elérhető nyomatékot az 4.1.2. képlettel számíthatjuk ki:

$$F_{\max} = \frac{M \cdot n \cdot \eta}{r_{\min}} = \frac{0.27 \cdot 10 \cdot 0.9}{0.02} \approx 120N \quad (4.1.2.)$$

4.2 A Test Bench számítógépes kezelőfelülete

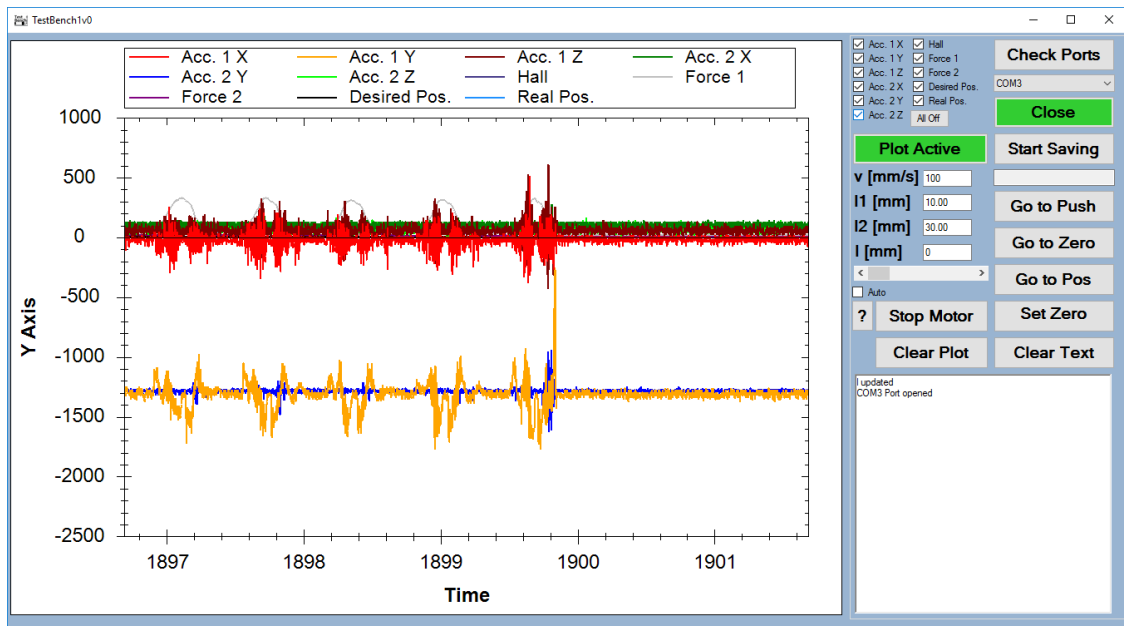
A vezérlést és az adatgyűjtést végző számítógépes alkalmazás a következő funkciókat tudja ellátni:

- adatokat fogad a mikrovezérlőtől és vizuálisan megjeleníteni azokat,
- a felhasználó kiválaszthatja, hogy a beérkező jelek közül melyek legyenek megjelenítve, illetve tetszőlegesen pozícionálhatja és nagyíthatja a jeleket.
- a motort mozgatni lehet a kívánt pozícióba a kiválasztott sebességgel (adott időfüggvény szerint),
- az adatokat menteni lehet CSV formátumban további feldolgozásra,

A mikrovezérlőtől származó adatsomagok felépítése a 4.2.1. táblázatban látható.

Sorszám	Mért érték	Mérési tartomány	Felbontás
1	1. gyorsulásmérő X tengelye	±16G	int16
2	1. gyorsulásmérő Y tengelye	±16G	int16
3	1. gyorsulásmérő Z tengelye	±16G	int16
4	2. gyorsulásmérő X tengelye	±16G	int16
5	2. gyorsulásmérő Y tengelye	±16G	int16
6	2. gyorsulásmérő Z tengelye	±16G	int16
7	Hall szenzor		int16
8	1. Erő szenzor	[0 111] N	uint16
9	2. Erő szenzor	[0 111] N	uint16
10	Motor kívánt pozíciója	±10000	int16
11	Motor valós pozíciója	±10000	int16

4.2.1. táblázat: A mikrovezérlő által küldött csomag tartalma



4.2.1. ábra: Mérőfelület a mért adatok vizuális megjelenítésére

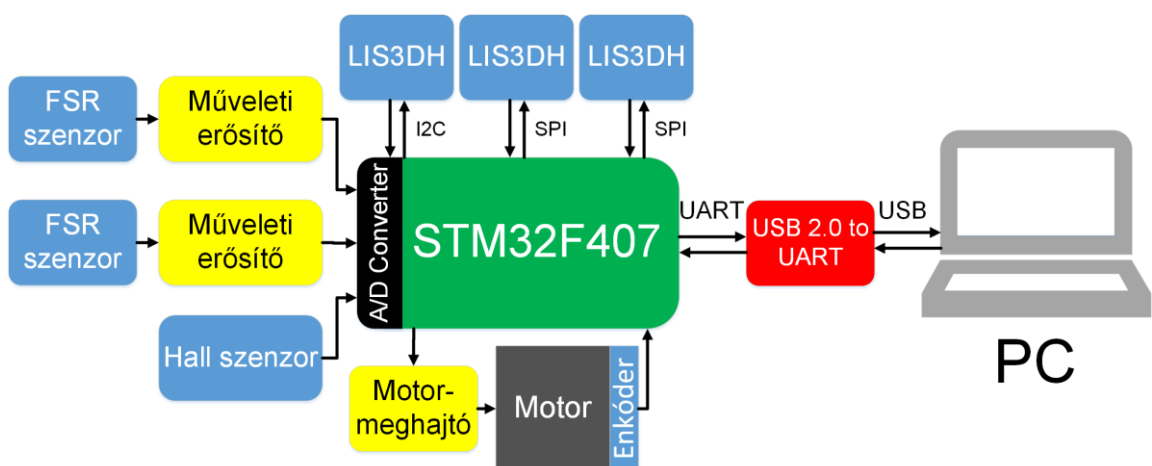
A felhasználó a csúszka mozgására vonatkozó parancsokat tud küldeni a mikrovezérlőnek. Ezek a parancsok:

- Go to Push - A csúszka mozgása konstans sebességgel. A csúszka a kezdőpozíciótól l_1 pozícióig lineárisan felgyorsul, l_1 pozíciótól l_2 pozícióig v konstans sebességgel mozog (ezen a szakaszon hatunk a lábra), majd l_2 pozíciótól a végpozícióig lineárisan lelassul, majd megáll.
- Go to Zero – Ezzel a paranccsal az általunk meghatározott null pontba (alapértelmezett pontba) mozdul a csúszka. A pozíció adott lépésközzel csökkentjük a null pontig.
- Go to Pos – Ezzel a paranccsal a csúszkat egy megadott pozícióba küldhetjük állandó sebességgel.
- Set Zero – A csúszka nullpontjának beállítása.

4.3 A Test Bench beágyazott felülete

A beágyazott rendszer alapja egy STM32F4DISCOVERY fejlesztő lap, melyen egy STM32F407VG mikrovezérlő található. Ez egy ARM Cortex-M4-es maggal rendelkezik. Memóriája 1 MB Flash/192+4 kB RAM, három 12-bit-es ADC-vel és két általános célú multi DMA vezérlővel is rendelkezik. Az áramkör 168 MHz-es órajelen fut DMA-val és 14 timerrel rendelkezik, melyből jelenleg 4 darabot használ a rendszer. Mérésnél a gyors működés és a pontos mintavételezési frekvencia fontos szempont, ha valós időben akarunk mérni. A fejlesztő lap mellé a mentorommal építettünk egy illesztő áramkört, a következő elemekkel (4.3.1. ábra):

- két FSR szenzor - előerősítővel - erő mérésére,
- egy Hall szenzor - kísérleti, elmozduláson alapuló erőmérésre,
- egy enkóder - a motor pozíciójának meghatározására,
- két gyorsulásmérő, SPI interfészen keresztül,
- egy gyorsulásmérő, I2C interfészen keresztül,
- számítógép, UART interfészen keresztül,
- motormeghajtó áramkör,
- státusz LED-ek és felhasználói gombok.
- USB 2.0 to UART modul az adattovábbításhoz.



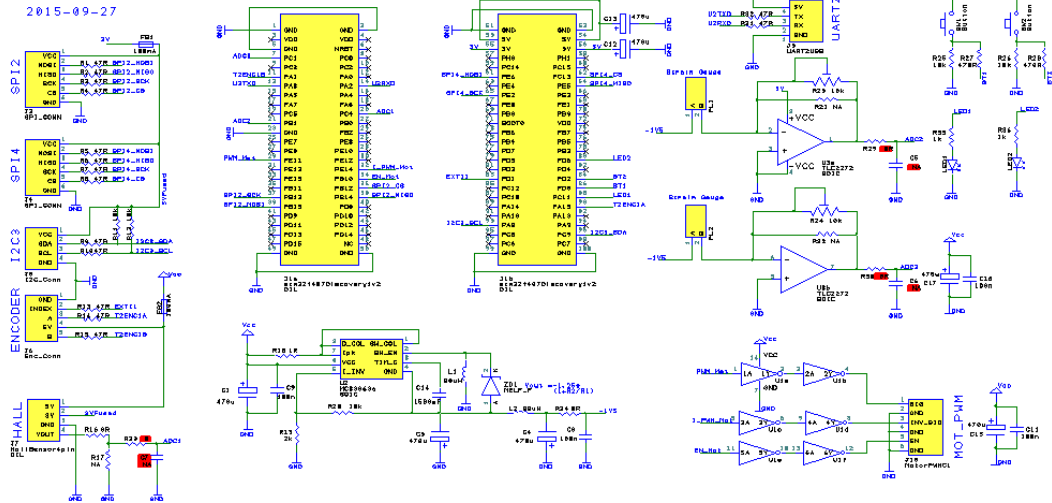
4.3.1. ábra: A mérőáramkör felépítése

A mikrovezérlővel három analóg (FSR, Hall), három digitális jelet (enkóder) mérek a gyorsulásmérők jelét pedig I2C illetve SPI buszokon keresztül kérdezem le. Az

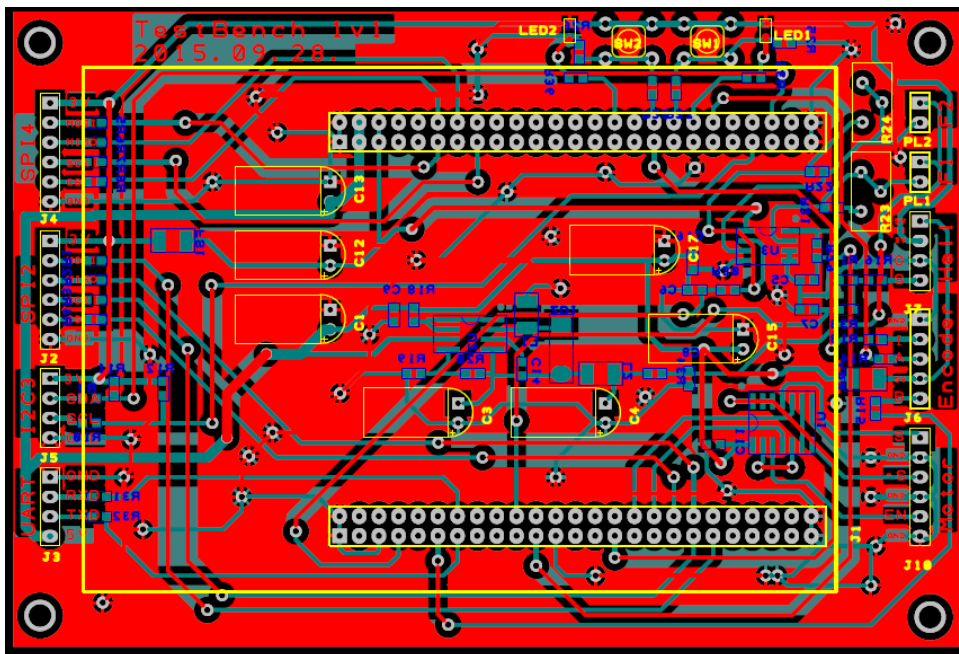
FSR szenzor egyik kivezetése -1.5 V-os potenciálon van melyet egy MC33063a boost átalakítóval állítok elő. A másik kivezetése pedig egy invertáló erősítő bemenetén van, mely az erőhatásokkal egyenesen arányos feszültséget állít elő. A kapcsolás kimenetén egy RC szűrő található. Az STM32f407 timer-ei rendelkeznek beépített enkóder interfésszel amely lekezezi az A/B csatorna által generált négyzögjelet. Minden mintavételezésnél a mikrovezérlő leméri a 3 analóg bemenetét és az enkóder által generált négyzögek számát, az I2C és SPI buszon pedig lekérdezi a szenzorok regisztereit.

TestBench1v1

2015-09-27



4.3.2. ábra: Az illesztőkártya kapcsolási rajza



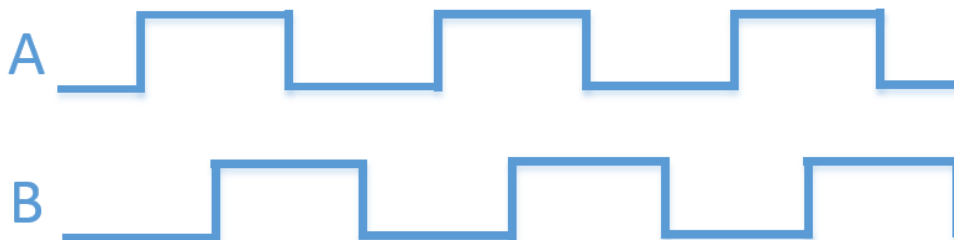
4.3.3. ábra: Az illesztőkártya NYÁK terve

Kvadratúra enkóder

A kvadratúra enkóderek két csatornával rendelkeznek melyek A és B jelet generálják. Az A és a B jelek 50% kitöltési tényezővel rendelkező négyszögjelek, melyek között 90 fokos fáziskülönbség van. A két jel fázisából tudjuk meghatározni az enkóder forgás irányát. Ezt a fajta jeladót azért hívják inkrementálisnak, mert a tengely elfordulásával arányos jel (impulzus sorozat) a tengely helyzetéhez relatív. Ez azt jelenti, hogy az álló enkóder abszolút szöghelyzetéről maga az enkóder nem ad információt. Ahhoz, hogy tudjuk a pontos helyeztet, nyilván kell tartanunk az előző megszakítások számát. Ha a fel és lefutó éleket egyaránt számoljuk, négyszeres felbontást kapunk. A motor sebességét a négyszögek frekvenciájából lehet meghatározni.

Adat	Érték
Neve:	RE56-3-1000+TI
Üzemi feszültsége:	5 V
Felbontása:	1000
Csatornái:	A, B, Index
A motor áttéte	10:1

4.3.2. táblázat: A motor enkóderének adatai



4.3.3. ábra: A kvadratúra enkóder A és B csatornájának jele

Az STM32F4 nagy előnye, hogy rendelkezik olyan timerekkel, melyek képesek az enkóder jelének kezelésére. A timer enkóder módjának konfigurálásánál megadhatjuk, hogy mekkora értéknél törölje az timer számlálójának tartalmát és ez mellett, hogy az A és B csatornán a timer csak a fel vagy lefutó éleket, vagy mindkettőt számolja. A mikrovezérlőbe a TIM2-es timert használtam, melynek 32 bites a felbontása. A timer ürítésének tartalmát 0xFFFF FFFF-re állítottuk, így ha ellentétes irányba forog a motor negatív értéket kapunk, mely a motor szabályozásnál fontos.

LIS3DH

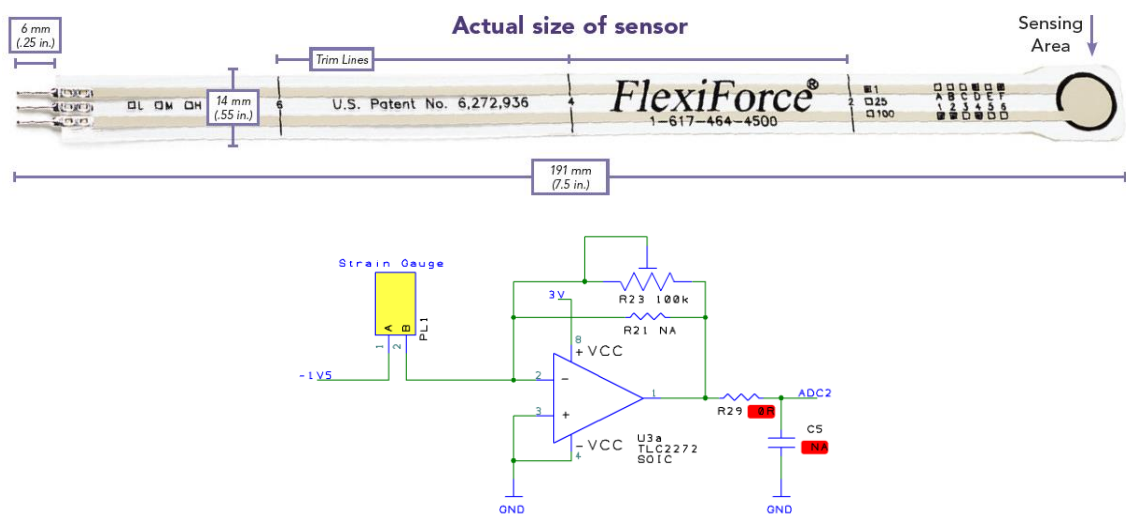
A LIS3DH IC egy kis fogyasztású, nagyteljesítményű nano gyorsulásmérő. Mintavételezési frekvenciája 1 Hz és 5 kHz között változtatható $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$ érzékenység mellett. I²C és SPI kommunikációt alkalmazhatunk. Lehetőséget nyújt, hogy beépített felüláteresztő szűrővel megsűrjünk az gyorsulásmérő jeleit. Beépített 10 bites A/D átalakítóval és FIFO memóriával is rendelkezik. [14] A szenzor normal üzemmódban 1,25 kHz mintavételezési frekvenciával 12 bit-es a jele, low power üzemmódban pedig 5 kHz mintavételezési frekvencia mellett 8 bit-es a felbontás.

Flexi force - FSR

A henger által összenyomott lábban fellépő reakcióerőt FSR erőmérő szenzorokkal mérjük. Az A201-25-AD5 FSR ellenállásának változását egy TLC2272 invertáló erősítő segítségével alakítjuk át 0-3 V tartományra, melyet a mikrovezérlő 12 bites A/D átalakítója dolgoz fel. A helyes működéshez negatív feszültségre van szükség, melyet MC33063a integrált áramkör invertáló kapcsolásának segítségével állítunk elő. Az FSR ellenállás változása a kapcsolat erősítését változtatja a következő képlet alapján:

$$U_{ADC} = -\frac{R_{23}}{R_{FSR}} \cdot U_{be} = \frac{1.5 \cdot R_{23}}{R_{FSR}} \quad (4.3.1.)$$

Az R₂₃-as ellenállás helitrim tokozású mely segítségével utólag precízen változtatni tudunk. Az kapcsolat kimenetére mentorommal egy aluláteresztő szűrőt terveztünk mely törési frekvenciája 1 kHz. Az R₂₁-es ellenállás nem lett bekötve. Az FSR típusa: A201 - 25 - AD5, mérési tartománya: 111 N ami megközelítőleg 10 kg.



4.3.2. ábra: FSR érzékelő (felső ábra), a kiegészítő kapcsolás (alsó ábra)

Az FSR szenzort pontos súlyokkal kalibráltuk. Először az adatlapon található utasítások alapján, a maximális súly 110%-ával terheltük. Ezt követően különböző súlyokra megnéztük a mikrovezérlő által mért feszültséget. A mért értékekre egy egyenes illeszthető, mely által visszaszámolhatjuk a megadott erőt. Mivel az adatlap alapján az erő és a feszültség lineárisan függenek egymástól, ezért egyenest illesztünk rá, melynek meredekségét és tengely metszéspontját a legkisebb négyzetek módszerével határozhatjuk meg.

Az U_{ADCi} a mikrovezérlővel mért feszültség értékek vektora, Az F_i pedig az FSR szenzoron megjelenő erő, a k_{FSR} az illesztett tengely meredeksége, b pedig a tengely metszéspontja.

$$\begin{bmatrix} U_{ADC1} \\ U_{ADC2} \\ \vdots \\ U_{ADCi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & 1 \\ F_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ F_i & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{FSR} \\ b \end{bmatrix} \quad (4.3.2.)$$

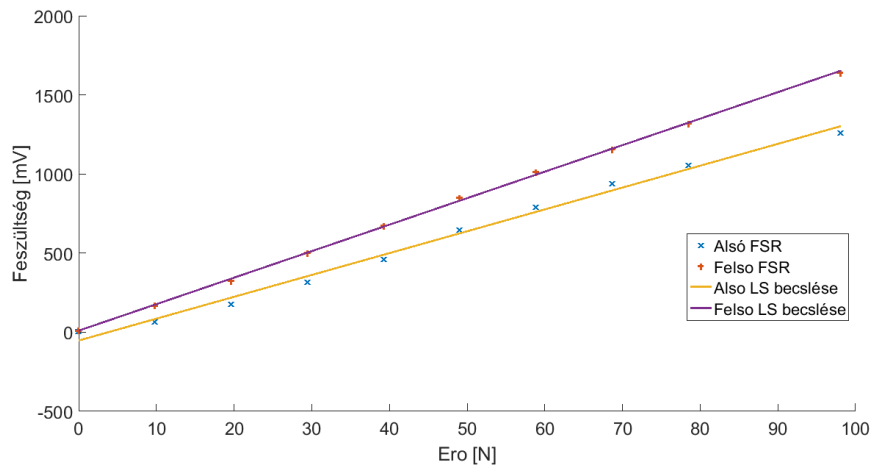
$$U_{ADC} = A_m \cdot \begin{bmatrix} k_{FSR} \\ b \end{bmatrix}$$

Az egyenes paramétereit pszeudoinverz segítségével lehet kiszámítani:

$$\begin{bmatrix} k_{FSR} \\ b \end{bmatrix} = (A_m^T \cdot A_m)^{-1} \cdot A_m \cdot U_{ADC} \quad (4.3.3.)$$

A műveleti erősítő kimeneti feszültsége adott erőből a következőképpen számolható:

$$U_{ADCi} = [F_i \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} k_{FSR} \\ b \end{bmatrix} \quad (4.3.4.)$$



4.3.3. ábra: FSR érzékelő és csatoló áramkörének feszültsége-erő egyenese

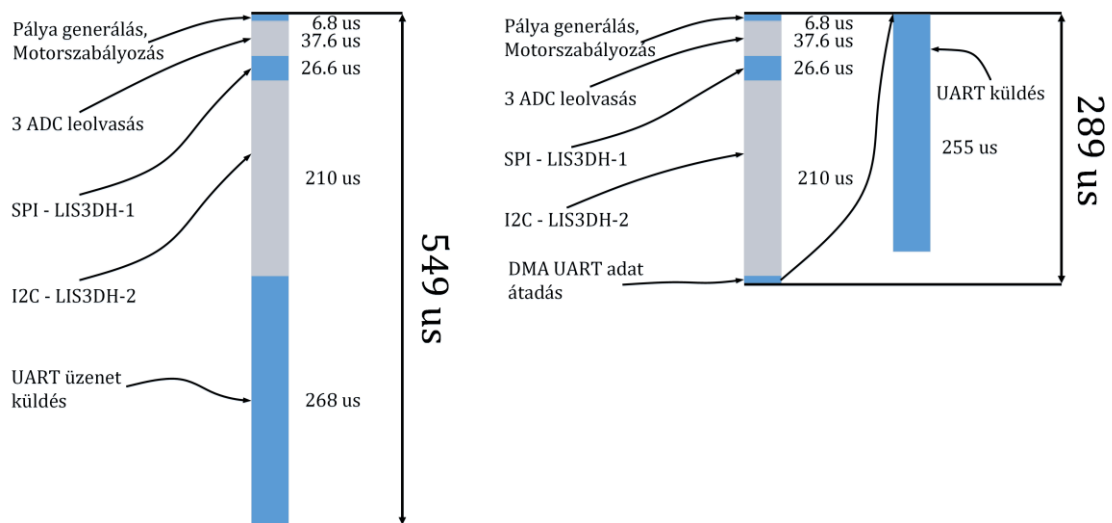
4.4 Mérés folyamata

A mérés folyamata öt szakaszból áll:

- pályagenerálás,
- motorszabályozás,
- analóg bemenetek beolvasása (2 FSR és 1 Hall),
- digitális szenzorok leolvasása (2 LIS3DH gyorsulásmérő)
- mért adatok továbbítása a számítógépnek.

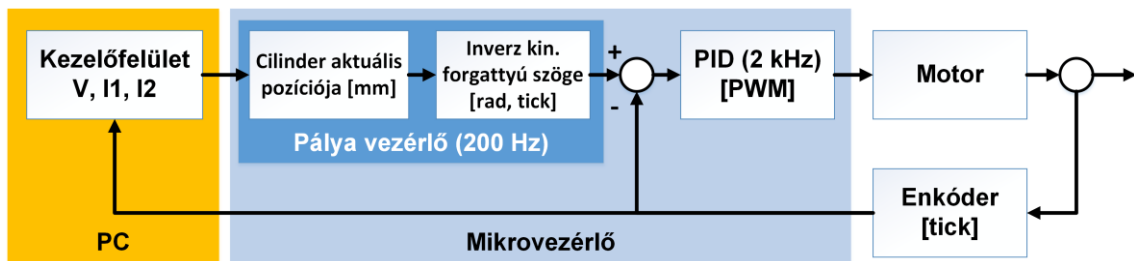
A pályagenerálás módját a kezelőfelületen keresztül lehet beállítani. A beérkező utasítás alapján a mikrovezérlő meghatározza a csúszka elvárt pozícióját, majd ebből inverz geometriával a tengely szögét. A motorszabályzás meghatározza a hibát a tengely elvárt szöge és az enkóderek által mért valós szög között, majd pedig PID szabályozóval jelet ad a motormeghajtóknak. A két FSR szenzor és a Hall szenzor analóg jelét az integrált 12 biteles ADC-k digitalizálják. A gyorsulásmérők jele I2C és/vagy SPI buszokon keresztül kerül beolvasásra. Végül, a mikrovezérlő UART-on keresztül, 960000 bps sebességgel küldi a GUI-nak a mért értékeket.

A 4.4.1. ábrán láthatjuk, hogy a mérési folyamatban az I2C és az UART kommunikáció tart a leghosszabb ideig. Ha az UART kommunikáció során DMA vezérlőt használunk, a mérési folyamat idejét közel a felére csökkenthetjük. Ilyen esetben a mérési ciklus végén átadjuk a DMA vezérlőnek a mért adatokat, és a mikrovezérlővel párhuzamosan dolgozik.



4.4.1. ábra: A mérési folyamat lefutásának ideje

4.5 Pályagenerálás



4.5.1. ábra: A motorvezérlés folyamatának blokk diagramja

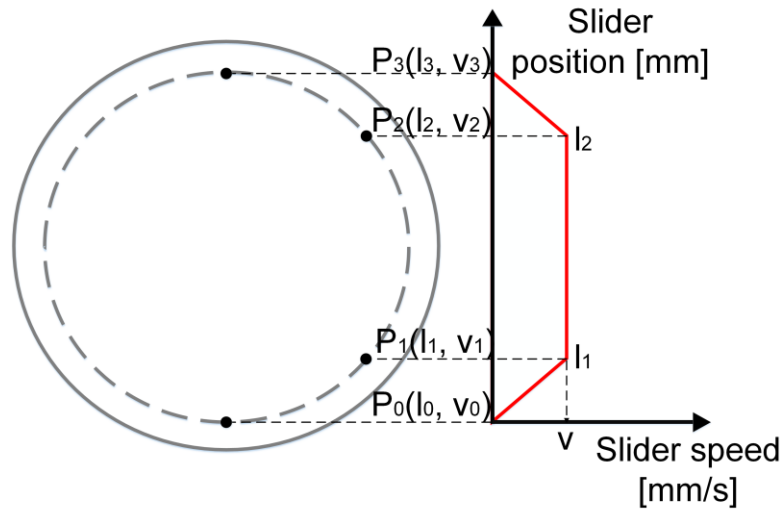
A motorvezérlés folyamatát több blokkra lehet felbontani (4.5.1. ábra). A felhasználó a számítógépes kezelőfelületen választhatja ki, hogy milyen pályát szeretne generálni. A pályagenerálás egy állapotgéppel történik melynek állapotai a már említett négy parancs lehet: *Go to Push*, *Go To Zero*, *Go to Pos*, *Set Zero* vagy *Ready* lehet. A csúszka valós pozíciójából trigonometriai számítások segítségével történik a forgattyú szögpozíciójának visszaszámolása. A szabályozó beavatkozásának frekvenciája 2 kHz a pályavezérlésé pedig 200 Hz. A mikrovezérlő szenzorok jelei mellett a tengely valós és kívánt pozícióját is elküldi a kezelőfelületnek.

A parancsok közül a *Go to Push* parancs végrehajtása igényel összetettebb számításokat. A *Go to Push* parancs esetén a felhasználó a kezelőfelületen három paramétert kell, hogy megadjon. Ezek a csúszka l_1 és l_2 pozíciói és a csúszka v sebessége. A három paraméter alapján a pályavezérlő meghatározza a csúszka elvárt pozíciójának változását az idő függvényében (3. táblázat). A csúszka sebességének változása a pozíció függvényében az 4.5.4.5.2. ábrán látható.

Időpillanat	A henger elmozdulása $P(t)$
t_0^*	0
t_1^*	l_1
t_2^*	l_2
t_3^*	$2 \cdot r$

4.5.1. táblázat: A henger pozíciója az időpillanatokban

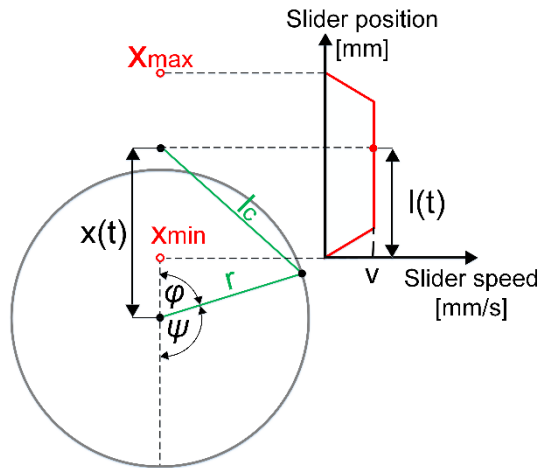
A csúszka $[0, l_1]$ pozíciók között $v_0=0$ kezdősebességről v sebességre gyorsul egyenletesen t_1^* idő alatt. Az $[l_1, l_2]$ pozíciók között állandó v sebességgel mozog t_2^* időpontig, $[l_2, 2 \cdot r]$ között pedig v kezdősebességről 0 sebességre lassul egyenletesen. A csúszka elmozdulása t_3^* pillanatban a forgattyú sugarának kétszerese. Ezek az adatok alapján kiszámíthatók az időpillanatok, és a pozíció az idő függvényében (4.5.1. képlet):



4.5.2. ábra: A csúszka sebességének változása a pozíció függvényében

$$\begin{aligned}
 t_1^* &= \frac{2 \cdot l_1}{v} \\
 t_2^* &= \frac{(l_2 - l_1)}{v} + t_1^* \\
 t_3^* &= \frac{2 \cdot (2 \cdot r - l_2)}{v} + t_2^*
 \end{aligned}
 \quad
 l(t) = \begin{cases}
 \frac{v \cdot t^2}{2 \cdot t_1^*} & , \text{ha } t \in [0, t_1^*] \\
 v \cdot (t - t_1^*) + l_1 & , \text{ha } t \in (t_1^*, t_2^*] \\
 v \cdot t - \frac{v \cdot (t - t_2^*)^2}{2 \cdot (t_3^* - t_2^*)} + l_2 & , \text{ha } t \in (t_2^*, t_3^*] \\
 2 \cdot r & , \text{ha } t = t_3^*
 \end{cases}
 \quad (4.5.1)$$

A forgattyú szögpozícióját a csúszka pillanatnyi elmozdulásából a 4.5.3. ábra alapján az 4.5.2. képlettel számíthatjuk,

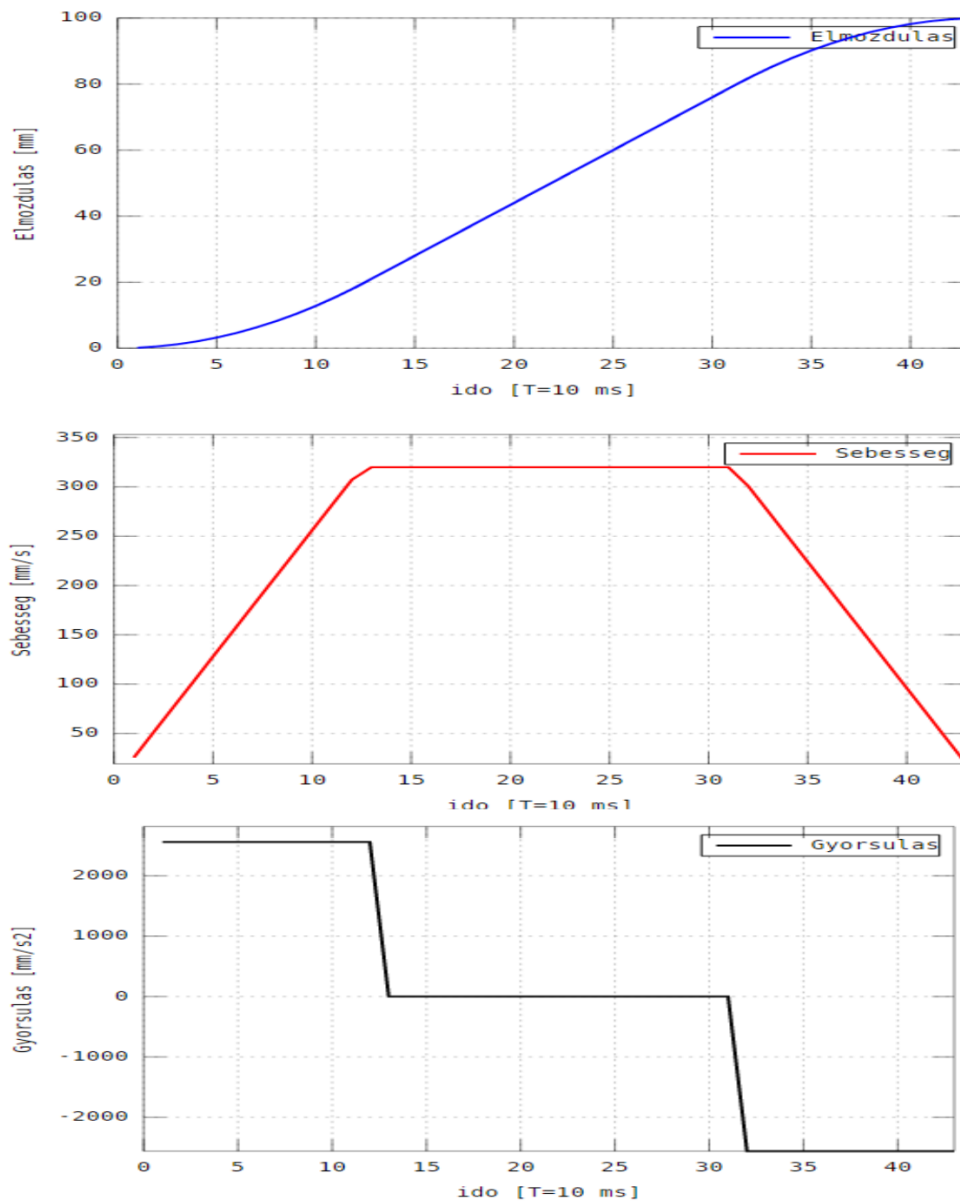


4.5.3. ábra: A forgattyú aktuális pozíciójának számítása

$$\begin{aligned}
 x(t) &= l(t) + l_c - r \\
 \varphi(t) &= \arccos \left(\frac{r^2 + x^2(t) - l_c^2}{2 \cdot r \cdot x(t)} \right) \\
 \psi(t) &= \pi - \varphi(t)
 \end{aligned}
 \quad (4.5.2)$$

Ahol ψ a forgattyú elvárt szöge, l a csuszka elvárt pozíciója, r a forgattyú rádiusza, és l_c a hajtórúd hossza. A ψ szög ezen elmozdulás során $[0 \pi]$ tartományban vesz fel értékeket. A szabályozó bemenetét képező enkóder pozíciót pedig az 4.5.3. képlettel lehet meghatározni, ahol $n_{encoder}$ az enkóder elvárt pozíciója impulzusokban mérve, $res_{encoder}$ az enkóder felbontása, n_{gear} pedig a gearhead redukciója.

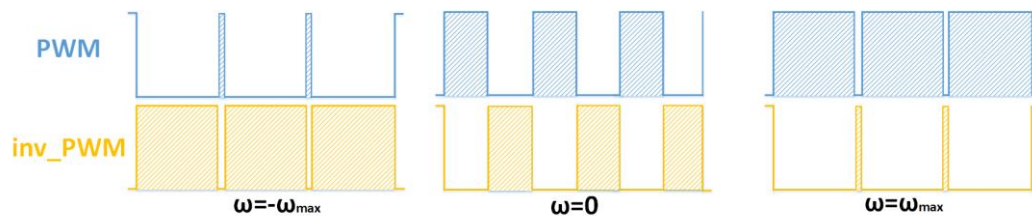
$$n_{encoder} = \psi \frac{res_{encoder} \cdot n_{gear}}{2\pi} \quad (4.5.3.)$$



4.5.4. ábra: A forgattyú pozíciója, sebessége és gyorsulása az idő függvényében

4.6 Szabályozó

A motort 2 kHz-es mintavételezési frekvenciájú szabályozóval szabályozzuk, mely bemenete a kívánt és a valós rotor szög hibajele. A kimenet PWM jel és ezen jel negáltja. Felbontásuk 13 bit, és frekvenciájuk pedig 20 kHz. A szabályozó által meghatározott kitöltési jel maximális értékét lekorlátoztuk a kitöltési tényező 99,5%-ára a motormeghajtó áramkör miatt. A motor ω_{max} szögsebességgel forog ha PWM jel 99,5%, a negált PWM jel kitöltési tényezője pedig 0,5%. A $-\omega_{max}$ szögsebesség ennek az ellentétének felel meg, PWM 0,5%, inverz PWM kitöltési tényezője pedig 99,5%. Ha mindkét jel kitöltési tényezője 50-50% akkor a motor áll.



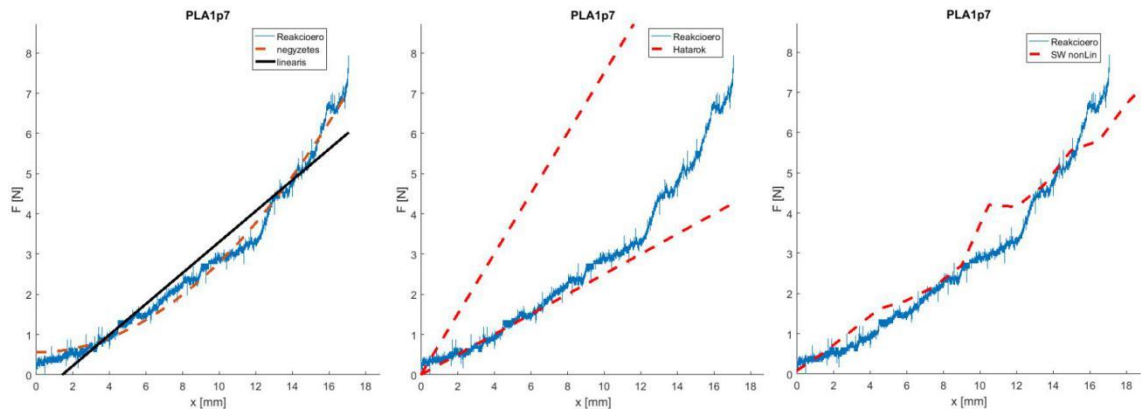
4.6.1. ábra: A forgattyú sebességének (ω) változása a PWM és az inverz PWM jel függvényében

4.7 Statikus mérés, validációs eredmények és rugóállandók meghatározása

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

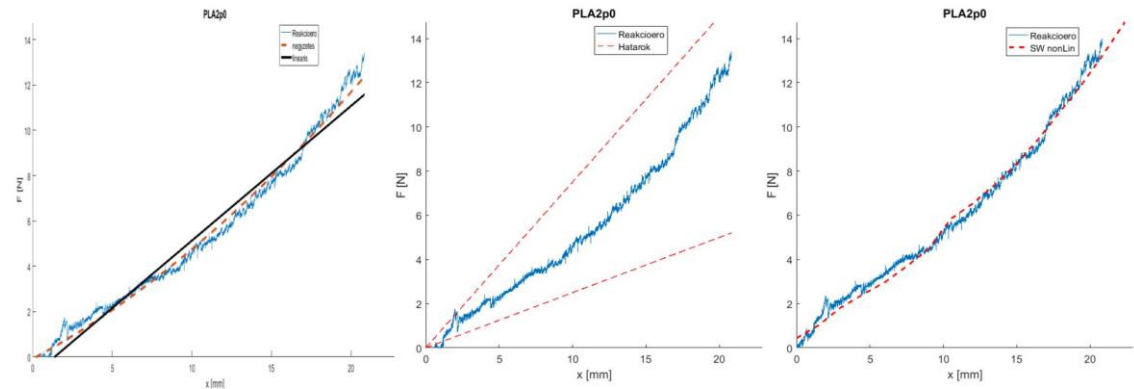
A 4.7.1.-4.7.9. ábrák bal oldalán az erő-elmozdulás görbe approximációja látható lineáris és négyzetes rugómodellel. A szimulált és az approximált módszerek pontosságát mindhárom esetben hibanégyzet átlag (RMSE) szerint hasonlítom össze a 4.3.1. táblázatban. A 4.7.1.-4.7.9. ábrák közepén az erő-elmozdulás grafikonon a láb reakcióerejét és a 250 és a 750 [N/m] lineáris rugóállandó határait hasonlítom össze. A 4.7.1.-4.7.6. ábrákon jobb oldalt a nemlineáris szimuláció eredménye látható. Az anyagtulajdonságokat is validálni kell, mivel eltérhet az adatlapon feltüntetett paraméterektől.

PLA1p7



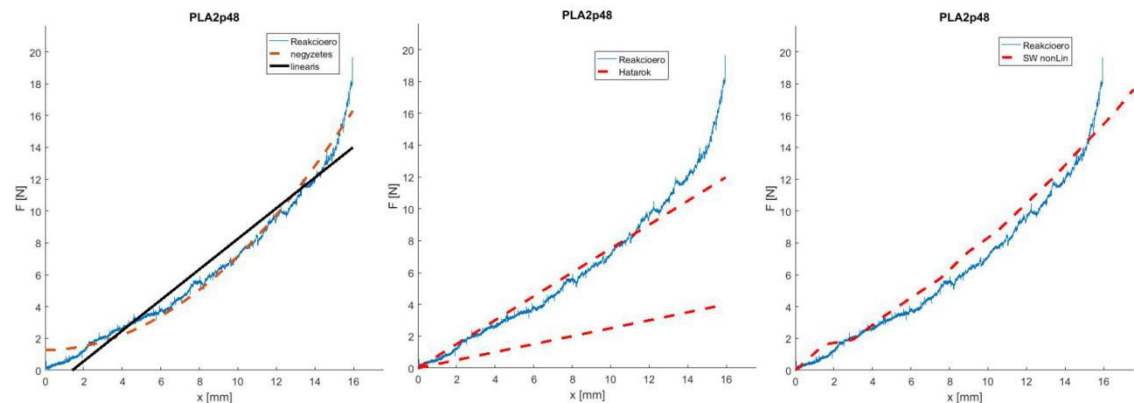
4.7.1. ábra: A PLA1p7 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

PLA2p0



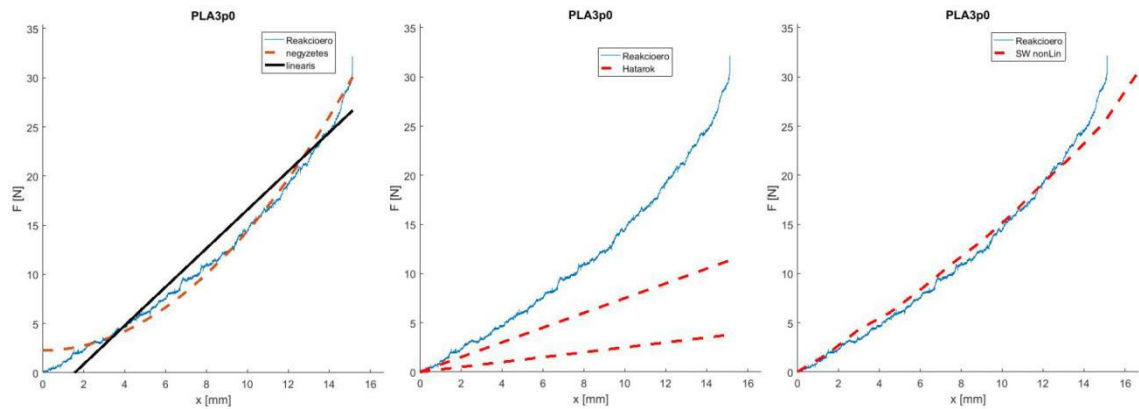
4.7.2. ábra: A PLA2p0 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

PLA2p48



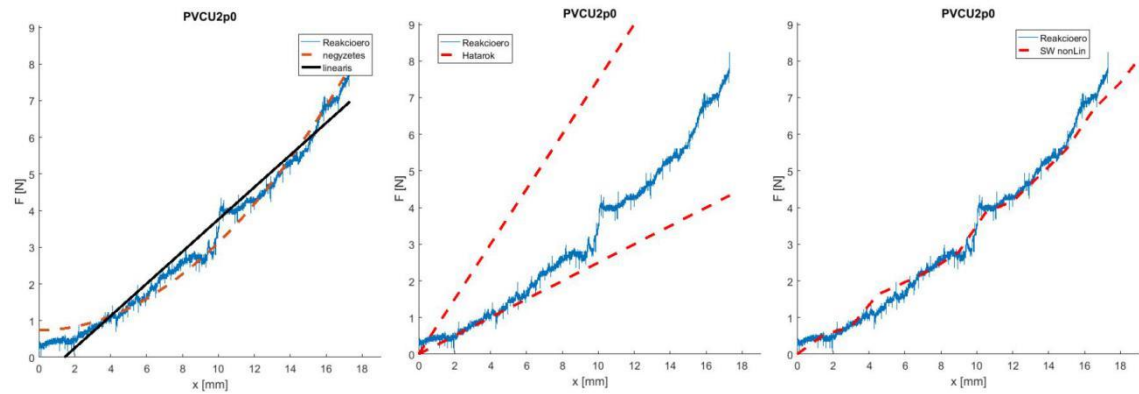
4.7.3. ábra: A PLA2p48 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

PLA3p0



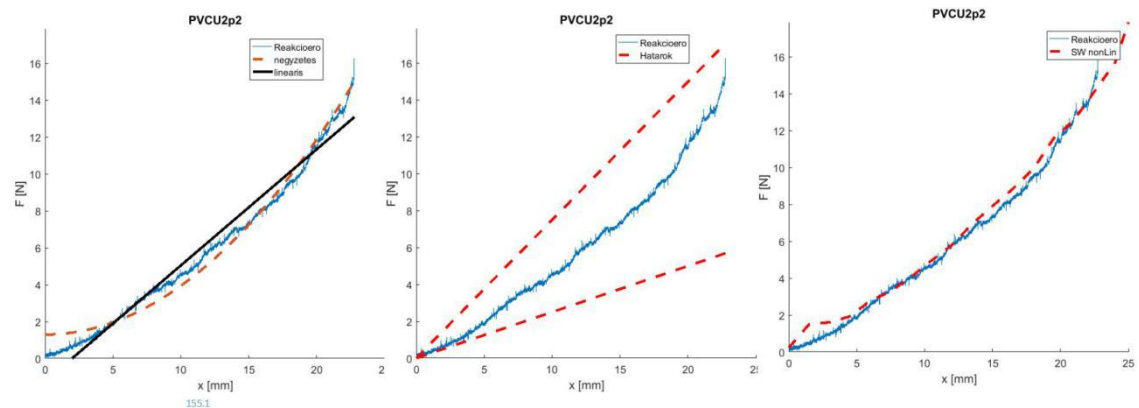
4.7.4. ábra: A PLA3p0 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

PVCU2p0



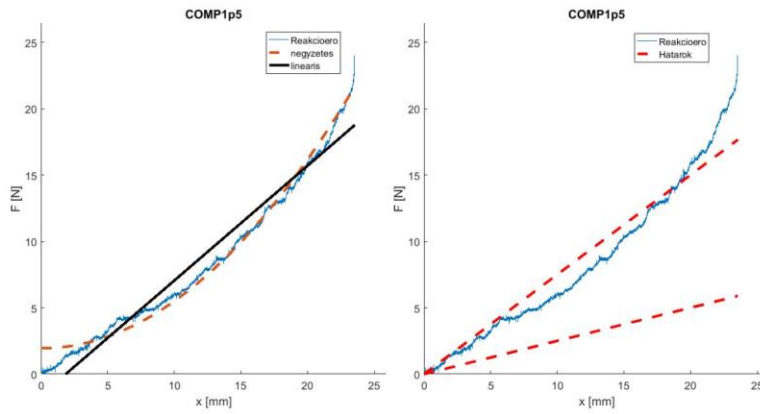
4.7.5. ábra: A PVCU2p0 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

PVCU2p2



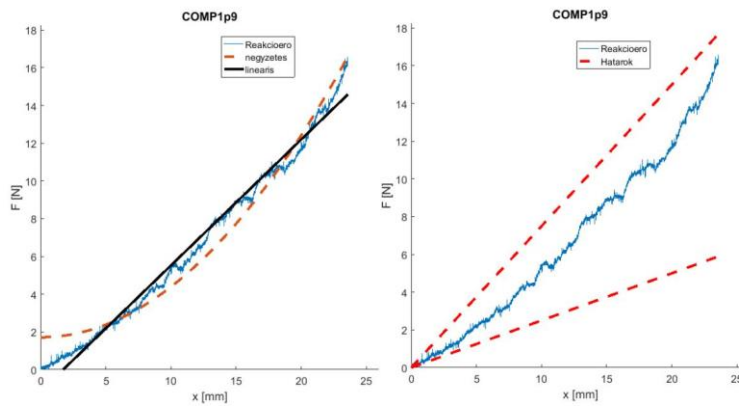
4.7.6. ábra: A PVCU2p2 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

COMP1p5



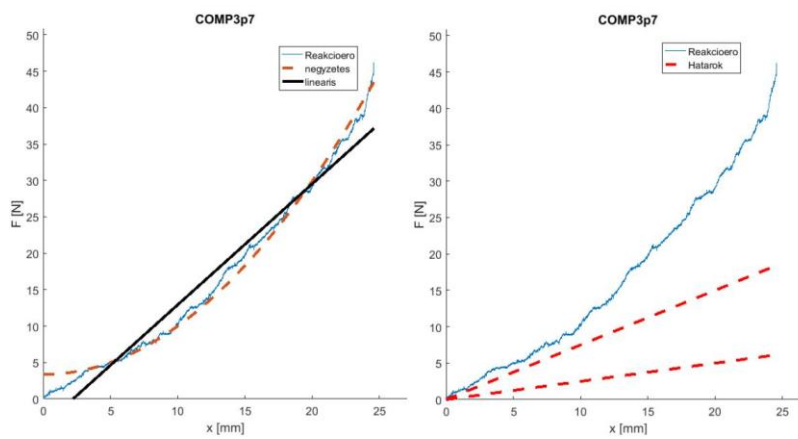
4.7.7. ábra: A COMP1p5 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

COMP1p9



4.7.8. 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



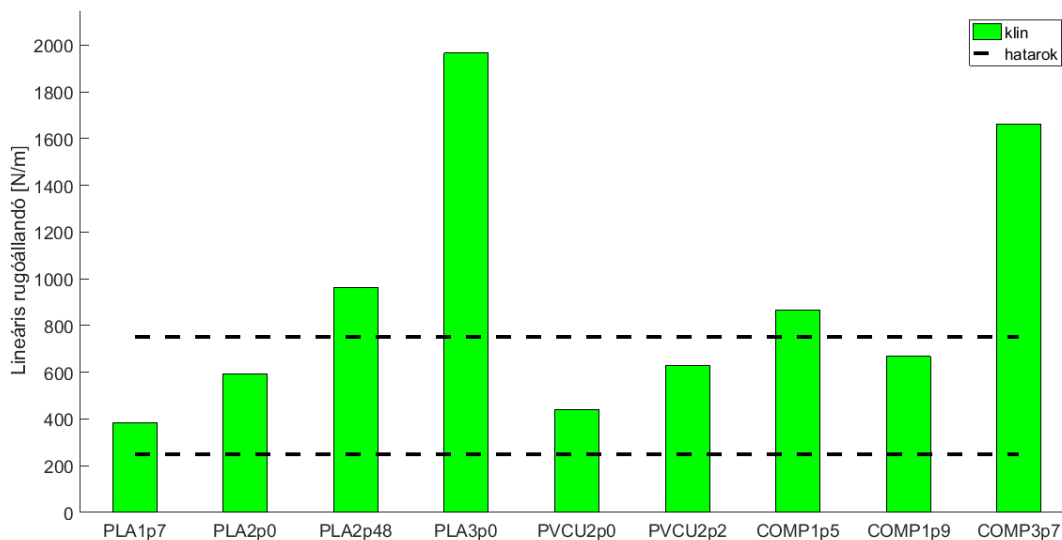
4.7.9. ábra: A COMP3p7 láb erő-elmozdulás görbéjének approximációja (bal oldalt), a mért értékek összehasonlítása a 250 és 750 N/m-es rugóállandóhatárokkal (középen) és a nemlineáris szimulációs eredmény görbéje (jobb oldalt)

	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	

4.7.1. 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. A PLA1p7, PLA2p0, PVCU2p0, PVCU2p2 és a COMP1p9 lábak rugóállandója van az adott korlátok között. Ezek 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.



4.7.10. ábra: A legyártott robotlábak mérésel megállapított lineáris rugóállandója

4.8 Dinamikus mérés

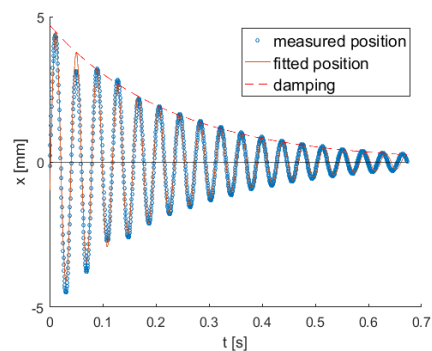
A dinamikus mérés során a lábat egy előre meghatározott pozícióig feszítettem, majd elengedtem. Ezután a rugó csillapított szabad lengést végzett. Az 4.8.1. ábrán a rugó időben változó pozíciója látható, melyet a gyorsulásmérő adatainak kétszeres integrálásával kaptam meg.

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

$$\chi(t) = X e^{-\zeta \omega_k t} \cdot \cos\left(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_k t - \vartheta_r\right), \quad f = 2\pi f \quad (4.8.1.)$$

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 $f = 25,8 \text{ Hz}$ és $\zeta = 0,027$. A gyorsulásmérő modul meghibásodása miatt nem sikerült több mérést végezni.



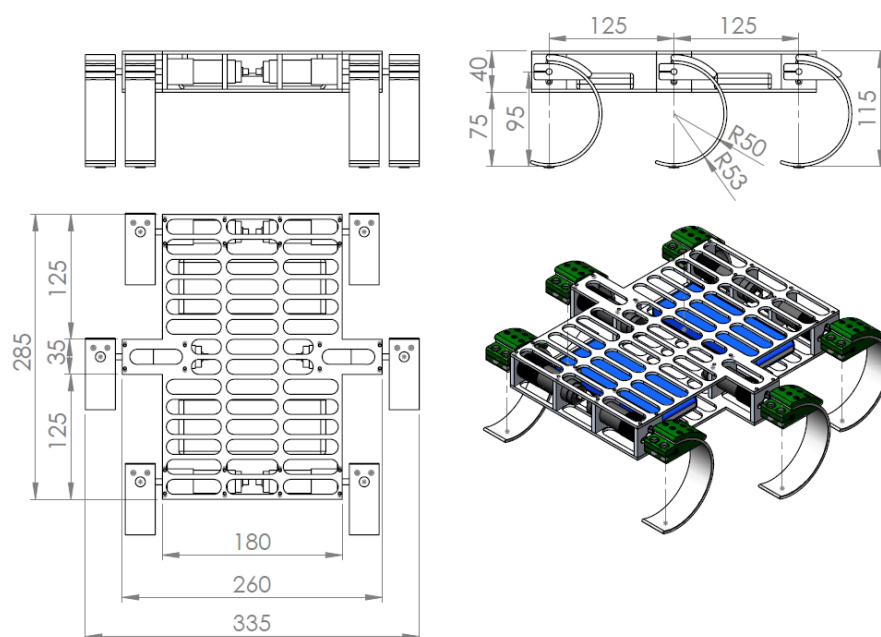
4.8.1. ábra: A láb elmozdulása az idő függvényében

5 A CAD modell kibővítése és a rugóálló optimalizálása

A CAD modellt kibővíttem a motorméretezés fejezetben kiválasztott *Faulhaber 2342S006* BDC motorral a *Series 26A 1:64* 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 ugyanilyen 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 végeselemes 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 robotalváz geometriai középpontjában kell lennie. A robot kialakításakor törekedtem a szimmetriára.

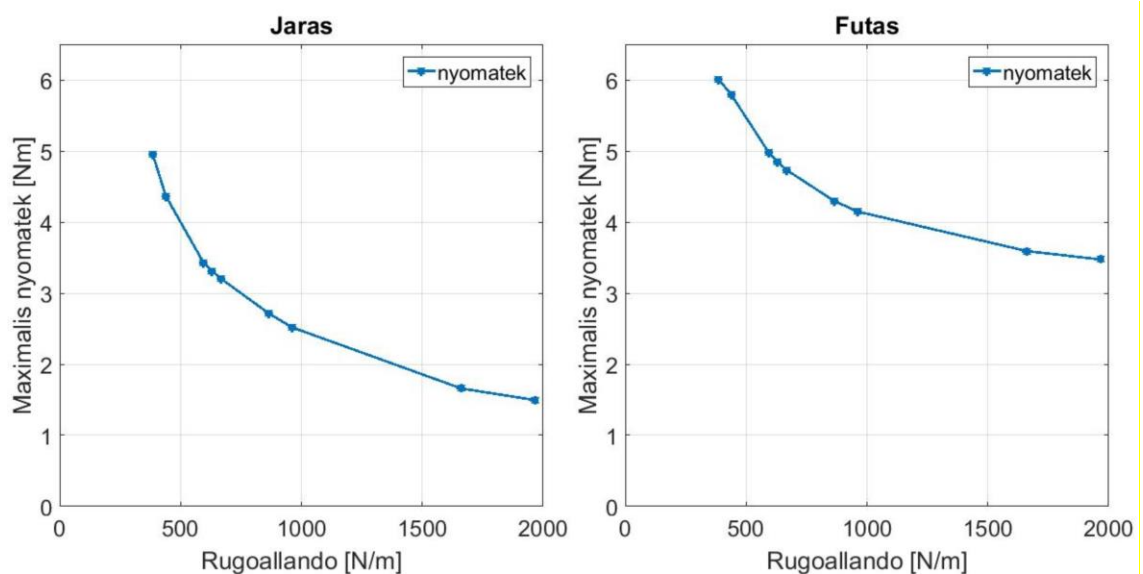


4.8.1.ábra: A CAD modell ortogonális vetületei és izometrikus nézete

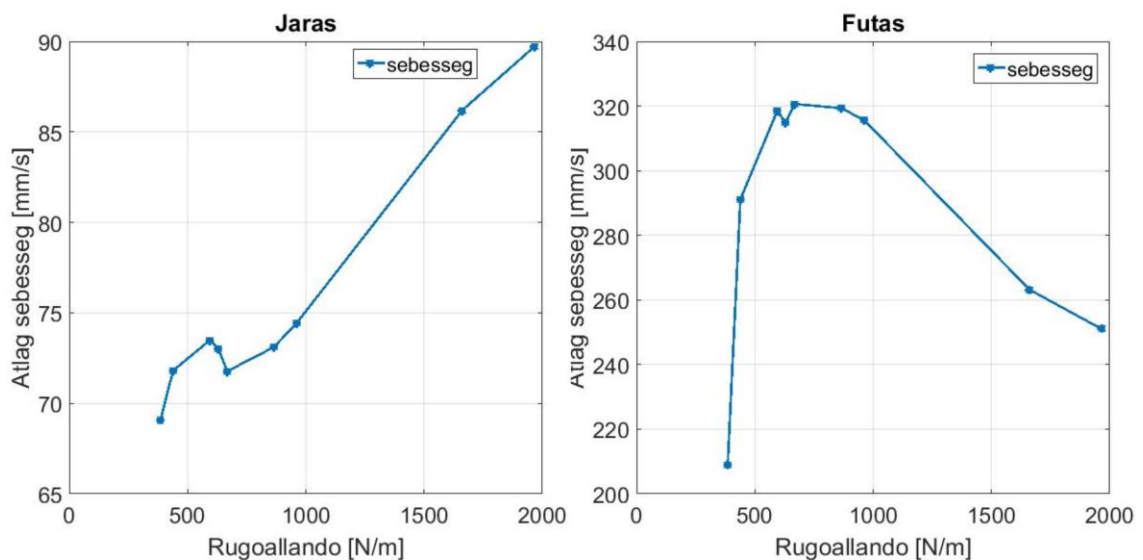
Az átlagos nyomaték értékével (τ_{atl}) a mozgás hatékonyságát fejeztem ki. A pályagenerálási paraméterek hangolásánál a fő cél a nagy sebesség elérése, nem túllépve a 5,12 Nm nyomatékot, amely a motor indítónyomatéka és üresjárat fordulatszámát amely 120 RPM. A mozgás maximális költsége arányos a τ_{max}/v_{atl} 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	[°/s ²]	2000	2500

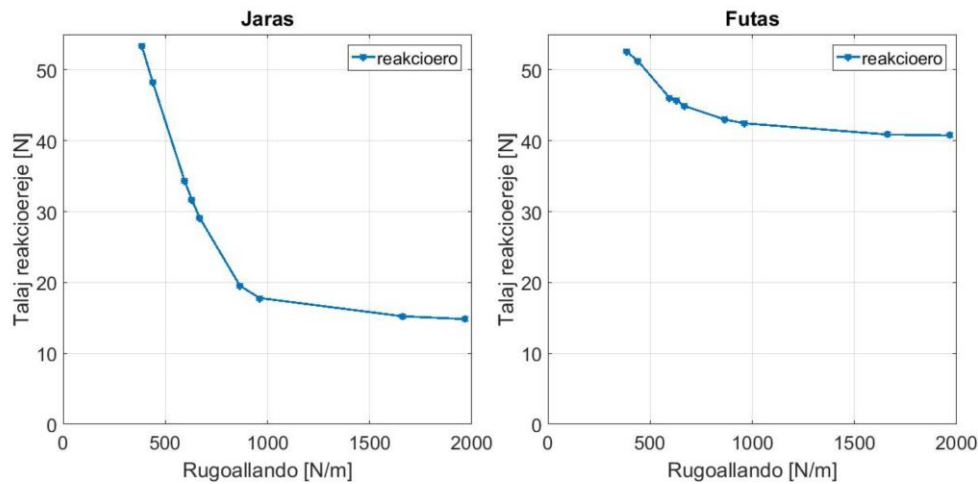
5.0.1. ábra: A járásalgoritmus paraméterei



5.0.5. ábra: A mozgás közben fellépő nyomatékok a rugóállando függvényében



5.0.6. ábra: A mozgás átlagsebessége a rugóállando függvényében



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

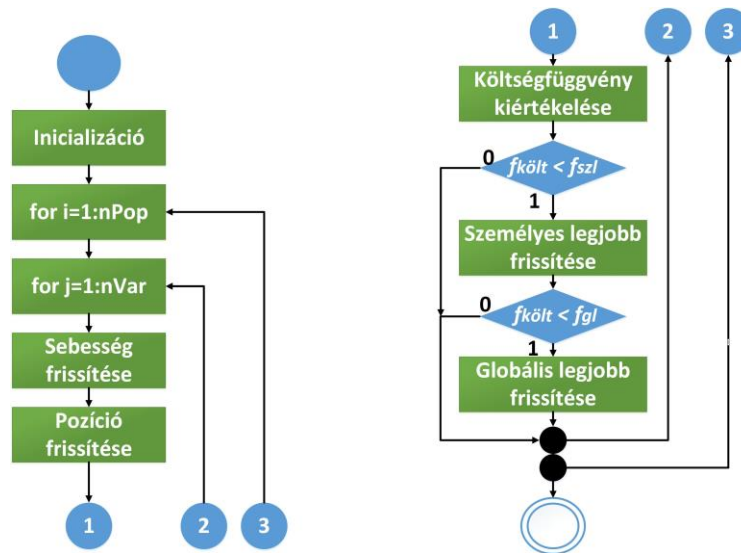
A szimulációk során belátható hogy kis sebességeknél a láb rugóállandó csökkenésével nagyobb nyomatékok jelentkeznek a csuklókon. Fontos megjegyezni, hogy a haladási sebesség és a nyomatékok között nincs egyértelmű arányosság.

Lassú mozgások esetén előnyösebb a merev láb, viszont nagyobb sebességű mozgásoknál a rugós láb az előnyösebb. A 5.0.6. ábrán megfigyelhető, hogyan függ a láb rugóállandójától az átlagsebesség. 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 szimulációs eredményekből meghatározható, hogy a lábak rugóállandó értéke nagy kihatással van a mozgás maximális sebességére és a mozgás során fellépő nyomatékok nagyságára. Az optimális járási paraméterek meghatározására részecske-raj optimalizációt alkalmazok.

5.1 Részecske-raj optimalizáció (PSO)

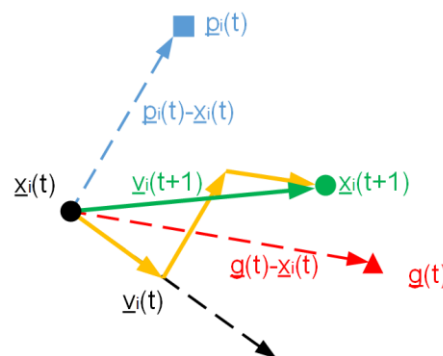
A részecske-raj optimalizáció egy intelligens eljárás, mely iterációk segítségével közelíti meg az adott költségfüggvény minimumát vagy maximumát. Az algoritmus az állatpopuláció rajban történő viselkedését modellezi. Egyszerűsége ellenére több dimenziós térben is jól közelíti a költségfüggvény optimumát. A populáció i -edik egyede ismeri a saját pozícióvektorát ($\underline{x}_i(t)$) és sebességét ($\underline{v}_i(t)$), az iterációk során elért személyes legjobb költségfüggvény értékét, a hozzá tartozó pozícióvektort ($\underline{p}_i(t)$), az iterációk során elért globális legjobb költségfüggvény értékét és a hozzá tartozó pozícióvektort ($\underline{g}(t)$). A pozícióvektorok dimenziója az állapottér dimenziója alapján határozható meg.



5.1.1. ábra: A részecske-raj optimalizáció folyamatábrája

Az inicializáció első lépésében meghatározzuk az iterációk és a populációban levő egyedek számát, ezen egyedek pozíciójának és sebességének határait. Az második lépésben pedig feltöltjük a populációt a generált egyedekkel és a hozzá tartozó költségfüggvényekkel.

A j -edik iterációban az i -edik részecske következő sebességét a t időpillanathoz képest az 5.1.1.-es egyenlettel határozzuk meg. Az egyenlet *inverciális* részében a részecske aktuális sebessége egy w súllyal szorzódik, mely értéke esetemben 1. Az egyenlet kognitív részében a személyes legjobb eredményhez tartozó pozíció vektor és a jelenlegi pozícióvektor különbsége egy 0 és 1 közötti véletlen számmal (r_1) és egy konstanssal (c_1) szorzódik, melynek értéke 2. A szociális részben a globális legjobb eredményhez tartozó pozícióvektor és a jelenlegi pozícióvektor különbsége egy 0 és 1 közötti véletlen számmal (r_2) és egy konstanssal (c_2) szorzódik, melynek értéke 2. Ezen paraméterek mellett a sebességet minden ciklus végén egy csillapító tényezővel szorzom, melynek értéke 0,9.



5.1.1. ábra: A részecske-raj optimalizáció egy iterációja az i -edik részecskére

$$\begin{aligned}
\underline{v}_{ij}(t+1) &= \boxed{w\underline{v}_{ij}(t)} + \boxed{r_1 c_1 (\underline{p}_{ij}(t) - \underline{x}_{ij}(t))} + \boxed{r_2 c_2 (\underline{g}_{ij}(t) - \underline{x}_{ij}(t))} \\
\underline{x}_{ij}(t+1) &= \underline{x}_{ij}(t) + \underline{v}_{ij}(t+1) \\
r_1, r_2 &\in [0 \quad 1]
\end{aligned} \tag{5.1.1.}$$

Az aktuális pozíció frissítése után figyelembe vesszük a pozíció felső és alsó korlátait.

Ha az egyed aktuális költségfüggvénye jobb mint a személyes legjobb akkor felülírja az eredeti értéket és a hozzá tartozó pozícióvektort, ha pedig a globális legjobb értéktől is jobb az érték, akkor azt is felülírja. Minimalizálás esetén a kisebb költségfüggvény a jobb, maximalizálás esetén pedig a nagyobb.

5.2 Járásalgorithmus paramétereinek és a rugóállandó optimalizálása

A populáció egy egyedének pozíciója 5 paramétert tartalmaz, amely alapvetően meghatározza az RHex-szerű robot járási algoritmusát. Ezek a lépés periódusának ideje (t_p), az aktív állapot és az egész periódus aránya (t_s/t_p), az aktív állapot szögtartománya (Ψ_s), a gyorsulás a sebességváltások között (α), és a láb lineáris rugóállandója (k).

$$x = \begin{bmatrix} t_p \\ t_s/t_p \\ \Psi_s \\ \alpha \\ k \end{bmatrix} \tag{5.2.1.}$$

A paraméterek korlátait az 5.2.1. táblázat tartalmazza. A t_p minimális értékét a Ψ_s , és a t_s értékei alapján a motor maximális üresjáratú fordulatszámához (n_0) hangoltam (5.1.3. képlet). A cél, hogy a maximális forgási sebesség ne lépje túl a motor üresjáratú fordulatszámát. Az α gyorsulás felső határát a motor adatlapja által megadott maximális szöggyorsulásból számítottam.

$$t_{pmin} = \frac{360^\circ - \Psi_s}{6n_0(1-t_s)} \tag{5.2.2.}$$

Paraméterek		Alsó határ	Felső határ
t_p	[s]	0.77	3
t_s/t_p		0.35	0.55
Ψ_s	[°]	0.1	30
α	[°/s ²]	1000	112801
k	[N/m]	300	2000

5.2.1. táblázat: A részecske-raj optimalizáció paramétereinek korlátai

Szimulációs eredményként szintén öt paramétert mértem, amelyek a τ_{max} , $\tau_{\text{átl}}$, ω_{max} , $v_{\text{átl}}$, F_{zmax} . A költségfüggvényt ezen paraméterekből számolom. Első alkalommal (f_{k1}) a cél a legnagyobb haladási sebesség elérése volt a motor paramétereit nem túllépve, melyek az indítónyomaték (τ_{start}) és üresjárat fordulatszám (n_0). Második alkalommal (f_{k2}) a minimális nyomaték befektetéssel a legnagyobb sebességű mozgás megvalósítása volt a cél.

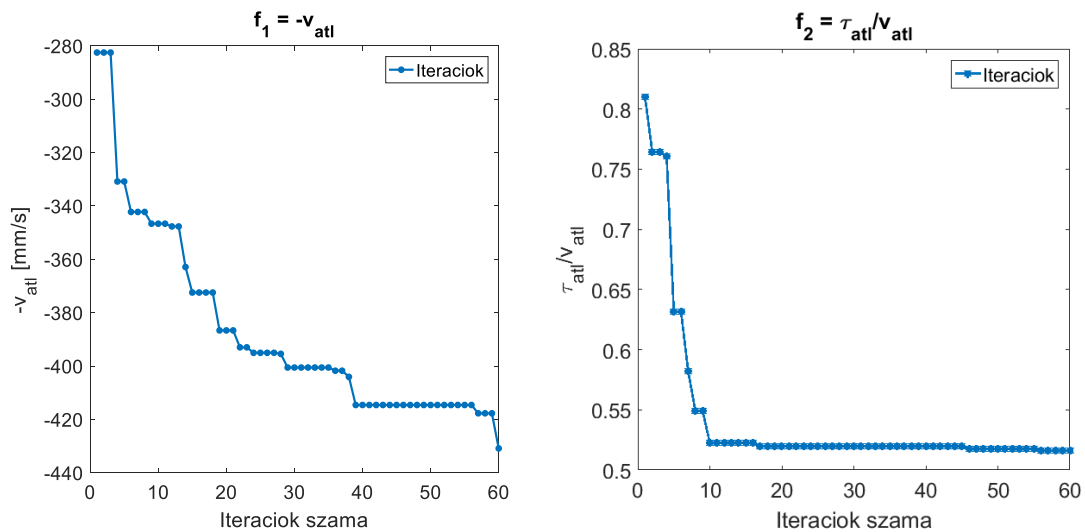
$$f_{k1} = \begin{cases} -v_{\text{átl}} & , ha |\tau_{max}| < \tau_{start} \wedge |\omega_{max}| < n_0 \\ \infty & , amúgy \end{cases} \quad (5.2.3.)$$

$$f_{k2} = \begin{cases} \frac{\tau_{\text{átl}}}{v_{\text{átl}}} & , ha |\tau_{max}| < \tau_{start} \wedge |\omega_{max}| < n_0 \\ \infty & , amúgy \end{cases}$$

Az optimális paraméterek 15 egyeddel rendelkező populáció és 60 iteráció után:

Paraméterek		f_{k1}	f_{k2}
t_p	[s]	1.597	3
t_s/t_p		0.45	0.45
Ψ_s	[°]	0.1	0.1
α	[°/s ²]	5337	112801
k	[N/m]	580.8	2000
τ_{max}	[Nm]	4.9	1.017
$\tau_{\text{átl}}$	[Nm]	0.524	0.059
ω_{max}	[RPM]	89.388	42.477
$v_{\text{átl}}$	[mm/s]	430.575	155.120
F_{zmax}	[N]	41.703	19.520
f_{min}		-430.575	0.516

5.2.2. táblázat: A részecske-raj optimalizáció eredményei



5.2.2. ábra: A részecske-raj optimalizáció globális legjobb eredményének változása a iterációk függvényében

A robot a legnagyobb haladási sebességet 430,575 mm/s-ot a 580,8 N/m-es rugóállandóval érte el, amely 1,51 testhossz/másodpercnek felel meg. A legkisebb átlag nyomaték és sebesség arány pedig 0,516 melyet a 2000 N/m-es rugóállandójú lábbal ért el. Az optimális láb a robot részére a COMP1p5, mely lineáris rugóállandója 865.1 N/m. Ha erre a lábra optimalizáljuk az átlag haladási sebességet, maximálisan 392.7 mm/s-ot kapunk. Ezzel a lábbal a robot 0,32 m/s sebességgel képes haladni, ami körülbelül 1 testhossz/s felel meg. A mozgás során fellépő maximális nyomaték 4,295 Nm amely kisebb az általam kiválasztott motoráttét páros indítónyomatékától.

6 Konklúzió

A dolgozat bemutatja egy RHex szerű robot lábának tervezési folyamatát, megvalósítását, valamint ezen lábak szimulációjának eredményeit. Bemutatja továbbá a Test Bench lábparamétert mérő műszer megépítését és az általa validált eredményeket valamint a járási algoritmus paramétereinek optimalizálását.

A munka széleskörű ismereteket kívánt. A **gépészeti ismeretek** nélkülözhetetlenek voltak a robot CAD modellezésénél (váz terve, a lábak modellezése, kialakítása, legyártása, mechanikai rendszer illesztése), és a vége-selemes módszer ismerete nagyon fontosnak bizonyult a lábak statikus és dinamikus szimulálásakor. **Elektronika ismeretek** kellettek az áramkörök illesztéséhez, nyomtatott áramkör megtervezéséhez, alkatrészek felforrasztásához. Az **informatikai ismeretek** nélkülözhetetlenek voltak a mikrovezérlő programozásánál, a mért eredményeinek továbbításánál a számítógépnek, a .NET alapú felhasználói alkalmazás elkészítésénél, a kapott eredmények megjelenítésénél, mentésénél, a validált eredmények feldolgozásánál és a járási paraméterek optimalizálásánál. **Irányítástechnikai ismeretek** kellettek a motor szabályozásánál, irányításánál. **Matematikai ismeretek** kellettek a görbék illesztésénél, inverz kinematikai feladat megoldásánál és az eredmények feldolgozásánál.

Első lépésben a robot CAD modellje készült el, ami alapján meg lett határozva a robot össztömege és lábának dimenziói.

A második lépésben megtervezett láb CAD modellje és anyagának mechanikai tulajdonságai alapján, vége-selemes módszerrel lett meghatározva a rugóállandója, sajátfrekvenciája és mechanikai terhelhetősége. A robotláb geometriáját tekintve félkör formájú. A dolgozatban 4 darab PLA, 2 darab PVCU és 3 darab üvegszál kompozit anyagú láb tulajdonságai és legyártási folyamata van ismertetve.

A saját fejlesztésű Test Bench mérőműszer négy fő részből áll: lábütő készülék, motormeghajtó, mérőáramkör és számítógépes kezelőfelület. Definiáltuk az eszközzel szemben támasztott követelményeket és részletesen elemeztük a vezérlés és a mérés folyamatát. Méréseket végeztem egy egyszerűbb tömeg-rugó szerkezetű lábon, és identifikáltuk annak paramétereit.

Az ARM Cortex-M4 mikrovezérlő sebessége és 960000 bps mellett alapból egy mérési ciklus UART DMA használata nélkül 549 μ s-ig tart, UART DMA használatával pedig 289 μ s-ig. Az első esetben a maximális mintavételezési sebesség 1,8 kHz, a másodikon pedig 3,46 kHz. A motor szabályozására elegendő a 13 bites PWM és 20kHz.

A validációs eredményekhez lineáris és négyzetes rugómodellt illesztettem. Az eredmények azt bizonyítják, hogy a négyzetes rugómodell jobban jellemzi a lábat a lineáristól. A lineáris rugóállandó a PVCU2p0 lábat közelítette legjobban, 0,4328 átlagos hibanégyzettel, a négyzetes pedig a PLA1p7-et 0,2156 átlagos hibanégyzettel. A nemlineáris szimuláció jól közelítette a mért eredményeket. A PLA lábak a felhasznált kitöltési tényező mellett, a szimuláció során tömörnek tekinthetők. A PVCU anyag szimulálásánál az eredményeket a PVCU2p0-nál 1,7-el, PVCU2p2-nél pedig 1,5 kell elosztani a valós eredmény elérése érdekében.

A CAD modell alapján a SimMechanics segítségével a járásalgoritmus, a motorszabályozás és a mechanika együttes szimulációját is elvégeztem. A szimuláció segítségével optimalizáltam a járásalgoritmust, az energiaveszteségeket.

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 SimMechanics szimulációs eredményei alapján megállapítható, hogy a láb rugóállandója kihat a robot maximális mozgási sebességére. A járási paraméterek Raj-részecske optimalizációval lettek hangolva. A robot a legnagyobb haladási sebességet 430,575 mm/s-ot a 580,8 N/m-es rugóállandóval érte el, amely 1,51 testhossz/s-nek felel meg. A legkisebb nyomatékátlag és sebesség hányados pedig 0,516 melyet a 2000 N/m-es rugóállandójú lábbal ért el.

Az eredmények összességét tekintve a COMP1p5-ös láb a legkiválóbb az üvegszál anyag, a magas folyáshatára miatt. A robot 392.7 mm/s átlagsebességgel tud vele haladni.

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, Gép- és Terméktervezés Tanszéknek, akik SolidWorks licenst biztosították, Az Irányítástechnika és Informatika Tanszéknek akik a 3D nyomtatásban segítettek és biztosítottak egy virtuális gépet.

Irodalomjegyzék

- [1] www.szabadka-robot.com letöltve: 2016.11.14
- [2] www.dunkermotor.com
- [3] FOBOT, a hatlábú lépegető robot - Balázs András, Molnár András, Pécskai Balázs, Supola Balázs, Vámosy Zoltán
- [4] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Rezg%C3%A9s> letöltve:2016.10.02.
- [5] <https://www.coursera.org/learn/robotics-mobility/lecture/kQwnC/2-2-2-materials-manufacturing-and-assembly> letöltve: 2016.09.14.
- [6] <http://cdn.phys.org/newman/gfx/news/hires/2013/therhextakes.jpg> letöltve:2016.10.17.
- [7] http://www.engineeringtoolbox.com/engineering-materials-properties-d_1225.html letöltve: 2015.12.07.
- [8] https://hu.wikipedia.org/wiki/Rugalmass%C3%A1gi_modulus letöltve: 2015.12.07.
- [9] 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
- [10] <https://www.coursera.org/learn/robotics-mobility/home/week/2> letöltve:2016.09.28.
- [11] Dynamic locomotion with a Hexapod Robot - Uluc. Saranl 2002
- [12] http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0012_szerkezeti_anyagok/ch04s02.html
- [13] Edward Z. Moore - *“Leg Design and Stair Climbing Control for the RHex Robotic Hexapod”* Department of Mechanical Engineering McGill University, Montreal, Canada January 2002
- [14] http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0012_szerkezeti_anyagok/ch04s02.html letöltve: 2015.12.09.
- [15] <https://www.coursera.org/learn/robotics-mobility/home/week/4> letöltve:2016.09.13.
- [16] <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00274221.pdf> letöltve: 2015.12.10
- [17] <https://www.coursera.org/learn/robotics-mobility/home/week/1> letöltve:2016.09.13.