



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Műszaki Mechanikai Tanszék

Alulaktuált helyváltoztató robot tervezése

Készítette: Gögh László OW1IUJ
Gépészmérnök Msc. I.évf.
Mohácsi Bálint H0HL11
Gépészmérnök Msc. I.évf.

Konzulens: Dr. Kovács László, tudományos
főmunkatárs, Műszaki Mechanikai
Tanszék

2013, Budapest

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
1 Bevezetés	4
2 Feladat ismertetése	5
2.1 A motiváció	5
2.2 Alulaktuált, teljesen aktuált rendszerek	6
2.3 Az Acrobot	7
2.4 A brachiation robot.....	7
2.5 A brachiation robot mozgásszabályozása	8
3 Mozgásstratégiák	9
3.1 Az acrobot mozgásegyenlete.....	9
3.2 Paraméteres gerjesztés.....	11
3.3 Részleges linearizáció állapot visszacsatolással	12
3.4 Súlypont áthelyezési módszer	13
3.5 Energiaszint alapú szabályozás	14
4 Mechanikai Tervezés	16
4.1 A feladatmegfogalmazás, követelményjegyzék	16
4.2 Konceptióképzés	17
4.3 Tervezés	20
4.4 Gyártás, összeszerelés	22
5 Elektronikai és szabályozás tervezés	24
5.1 Az áramkör tervezése	25
5.2 A szabályozást megvalósító program.....	27
6 Mozgásstratégiák szimulációja.....	28
6.1 Paraméteres gerjesztés.....	28

6.1	Részleges linearizáció állapot visszacsatolással	31
6.2	Súlypontáthelyezéssel stratégia	32
6.3	Energiaszint alapú szabályozás	35
6.4	Teljes fellendülési stratégia	35
7	Kísérletek bemutatása	37
7.1	A motor csillapító hatásának kiküszöbölése	38
7.2	A paraméteres gerjesztés	39
7.3	A relatív szöghelyzet szabályozása	40
7.4	Energiaszint alapú szabályozás	43
7.5	A teljes fellendülési stratégia	44
8	Összefoglalás	45
9	Irodalomjegyzék	46
10	Függelék	48
10.1	Műszaki rajzok	48
10.2	Mathematica brachiation	48
10.3	MATLAB - Partial Feedback Linearization	48
10.4	MATLAB – Súlypontáthelyezéssel módszerhez tartozó szimulációk	48
10.5	MATLAB – Energiaszint alapú szabályozás	48
10.6	MATLAB – Teljes fellendülési stratégia	48
10.7	PIC program	48
10.8	Simulink – Motor hatását kiküszöbölő szabályozás	48
10.9	Simulink – PD szabályozás PFL nélkül	48
10.10	Simulink – Energiaszint alapú szabályozás	48
10.11	Simulink – Paraméteres gerjesztés	48
10.12	Simulink – Teljes fellendülési stratégia	48
10.13	Alkatrészek adatai	48
11	Ábrajegyzék	49

1 Bevezetés

A dolgozatunkban egy alulaktuált helyváltoztató robot tervezésével foglalkoztunk, amely fán élő majmok jellegzetes, ágról-ágra lendülő mozgását utánozza (1. ábra). Ezt a mozgást a latin kar (*brachium*) szó alapján az irodalom *brachiation*-nek nevezi. Mérnöki szempontból a mozgás váltakozó felfüggesztési pontú kettős ingaként modellezhető. Az ismert gyakorlati megvalósítások, kísérleti berendezések [1] gyakran két karból és egy a karokat összekapcsoló aktuátorból álló rendszerek. Az ilyen *brachiation robotok* a karok végén levő megfogók, különböző oldható rögzítőelemek váltogatásával képesek a helyváltoztató mozgásra. A vizsgált mozgásforma jellemzően alulaktuált. A *brachiation robotok* mozgástervezése, a rendszer alulaktuált felépítéséből adódóan, összetett feladat. Dolgozatunkban ezzel a problémakörrel foglalkozunk részletesen.

A feladat kezdeti, első szakaszában irodalomkutatót végeztünk. Megvizsgáltuk az alulaktuált rendszerek sajátosságait, az azok által felvetett legfőbb problémákat. Korábbi eredmények alapján, problémakezelési módszereket kerestünk, valamint a később megvalósított robotunkhoz hasonló rendszerekkel foglalkozó szakirodalmat mélyebben tanulmányoztuk.

Megalkottuk a *brachiation robot* dinamikai modelljét valamint meghatároztuk a mozgását leíró egyenleteit. A robot helyváltoztató mozgásához mozgásstratégiákat dolgoztunk ki, melyeket MATLAB és Mathematica szimulációkkal igazoltunk. A szimulációs eredmények alapján finomítottuk a kidolgozott mozgásstratégiákat.

Ezután megterveztük a robot prototípusát, mely feladat magába foglalta a rendszer mechanikai, elektronikai tervezését és a szükséges programok megírását. A tervek alapján megépítettük a robotot.

Teszteket végeztünk a szimulációs eredményeink igazolására, valamint magyarázatot adtunk a mérések során tapasztalt eltérések okaira.

Ezek alapján a dolgozat, egy bonyolult mechatronikai rendszer teljes szimulációját, tervezését, és megvalósítását foglalja magába, melyek célja, az adott alulaktuált rendszer szabályozásának létrehozása és az így kapott eredmények igazolása.



1. ábra Brachiation mozgás [2]

2 Feladat ismertetése

Egy rendszer alulaktuált, amennyiben beavatkozóinak száma kisebb, mint a szabadságfokainak száma. Az ilyen szerkezet mozgásához, megkívánt pozícióba való juttatásához mozgásstratégiák kidolgozása szükséges. Az így kidolgozott metódusok megismerése, alkalmazása, és továbbfejlesztése, a robotika fejlődéséhez vezethet, a témával való foglalkozásunkat ez motiválta.

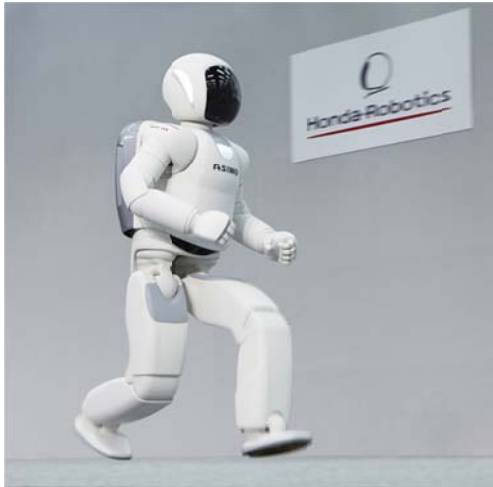
2.1 A motiváció

A mai robotok nagy része teljesen aktuált manipulátor. Ezek a rendszerek a felépítésük által megengedett térbeli pozíciókat gyakorlatilag megkötések nélkül képesek felvenni. A létrehozott mozgás során a rendszer tetszőlegesen előírt térbeli mozgását alkalmasan választott szabályozás biztosítja. Azonban sok esetben a megvalósított szabályzók nem használják ki a rendszer dinamikai tulajdonságait és az ilyen robotok nagy részének energiafelhasználása nem optimális.

Az alulaktuált rendszerek térbeli helyzetét ezzel szemben nem tudjuk teljesen előírni a beavatkozók segítségével. Így ahelyett hogy olyan szabályzókat alkotunk, amelyek az aktuátorokkal gyakorlatilag felülírják a rendszer dinamikáját, azt felhasználva kell szabályozási stratégiát készítenünk a kívánt cél eléréséhez. Ez más jellegű tervezési folyamatot eredményez, amelynél figyelembe kell vennünk, hogy a rendszert szükségszerűen olyan állapotokon vezetjük keresztül, amelyekben nem rendelkezünk teljes kontrollal a szerkezet fölött. Ugyanakkor az alulaktuált szerkezetek tömege általában kisebb, melynek következtében sok esetben gyorsabb mozgások és energiahatékonyabb működés valósítható meg.

A teljesen aktuált és az alulaktuált szerkezetek energiafelhasználásbeli különbségét jól szemléltetik a passzív, valamint az aktív járórobotok. A mai humanoid robotok közül a Honda cég által tervezett ASIMO robot [3] (2. ábra) nagymértékben megközelíti az emberi mozgást, többek között járni és lépcsőzni is képes. A robot mozgása teljesen aktuált. A lábak mozgását úgy tervezik meg, hogy azok talajjal érintkezve teljes felületükön támaszt biztosítsanak. A bokaízületben a lábfejre átadódó dinamikus erők és a reakció erők egyensúlyt tartanak. Az alkalmazott módszert (Zero Moment Point control) bővebben a [4] hivatkozott irodalom részletezi. Emellett a járáshoz szükséges energiaigénye az emberi

mozgáshoz arányosítva nagyjából húszszorosa [5] Ezzel szemben a passzív járórobotok [6] (3. ábra), amelyek csak a felépítésük dinamikai tulajdonságait használják ki, ennél sokkal alacsonyabb energiafelhasználás mellett képesek az emberi járásához hasonló mozgást megvalósítani. Működésüknek teljes energiáját egy kis dőlésszögű rámpa (kismértékű potenciális energia változás) fedezi.



2. ábra ASIMO [3]



3. ábra Passzív járórobot [6]

Az ipar az energiafelhasználás és gyártási idő minimalizálására törekszik, a megfelelő szintű biztonság és minőség megőrzése mellett. Fentiekben leírtak rávilágítanak, hogy alulaktuált robotok vizsgálata egy lehetséges út alacsonyabb energiaigényű, gyors mozgású szerkezetek tervezéséhez és így az ipar igényeinek kielégítéséhez.

2.2 Alulaktuált, teljesen aktuált rendszerek

Legyen adott egy rendszer, mely minimális koordinátás leírásmódjában szereplő általános koordináták vektora legyen $\mathbf{q}$. A mozgásegyenletek felírásával és azok megfelelő rendezésével a következő mozgásegyenleteket kapjuk:

$$\ddot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{f}_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{u}, t) = \mathbf{f}_{i,1}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + \mathbf{f}_{i,2}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)\mathbf{u},$$

ahol $\mathbf{u}$ a szabályzó bemenetek vektorát jelöli.

Amennyiben teljesül, hogy:

$$\text{Rank}[\mathbf{f}_{i,2}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)] = \dim[\mathbf{q}]$$

A rendszer teljesen aktuált.

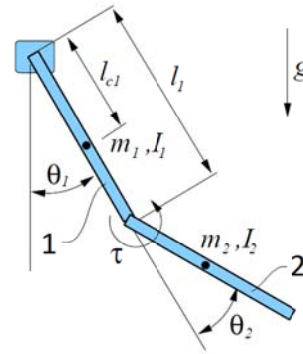
Amennyiben:

$$\text{Rank}[\mathbf{f}_{i,2}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)] < \dim[\mathbf{q}]$$

A mozgásegyenletek alapján leírt rendszer alulaktuált. [7]

2.3 Az Acrobot

Az Acrobot (4. ábra) egy kettő szabadsági fokú alulaktuált szerkezet. Felépítését tekintve két karból áll, amelyek csuklóban kapcsolódnak egymáshoz, valamint az egyik rúd végpontja a tér egy pontjához rögzített. A két rúd között aktuátor működik. A robot alsó stabil egyensúlyi helyzetéből, a felső instabil egyensúlyi helyzetébe juttatását megfelelő fellendülési stratégia segítségével



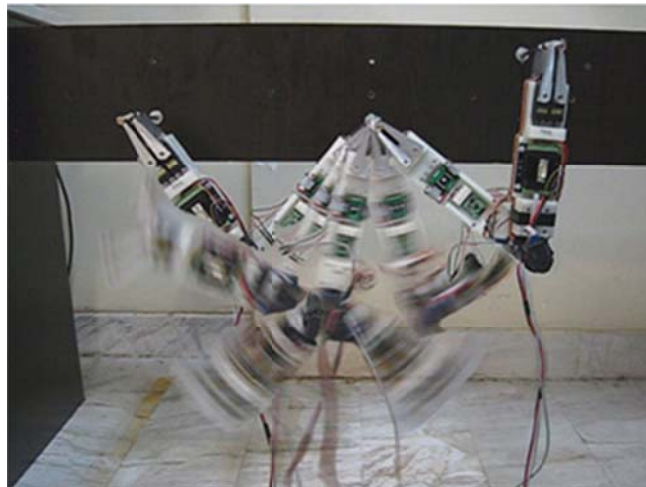
4. ábra Az Acrobot [15]

érhetjük el [8]. További tipikusan vizsgált feladat az instabil egyensúlyi helyzet körüli egyensúlyozás [8].

2.4 A brachiation robot

Az Acrobot felépítéséhez nagyon hasonló, brachiation robot tanulmányozása a célunk. Legfőbb különbség a két szerkezet között, hogy az ugyanúgy két karból és egy aktuátorból álló brachiation karjainak szabad végein oldható csuklók találhatók, így képes váltogatni a felfüggesztési pontját.

Abban az esetben, amikor a szerkezet csak egyik karján függeszkezik, dinamikájában semmi különbséget nem mutat az Acrobot-tal szemben. Szabadon lengő karjával (4. ábra, 2-es számmal jellemzett rúdja), továbbiakban szabad kar, azonban képes átfogni a tér egy másik pontjára. Ez lehetőséget ad olyan szabályzó létrehozására, amely nem csak a szerkezet instabil egyensúlyi helyzetébe képes eljuttatni azt, hanem a robot mérete által meghatározott tartományon belüli egyéb pontokat is képes elérni. Ekkor a két kar, azaz a függesztő és a szabad kar szerepét felcserélve, a robot helyváltoztató mozgásra képes (5. ábra).



5. ábra Brachiation robot mozgás közben [9]

2.5 A brachiation robot mozgásszabályozása

A robot szabad karjának megfelelő pontba való juttatását mozgásstratégiák megvalósításával érhetjük el. A különböző technikák közül részletesebben foglalkoztunk a szerkezet *hintáztatáson* alapuló belengetésével [10], a visszacsatolással történő részleges linearizálás (*partial feedback linearization*) technikájával [8], valamint egy energia alapú fellendülési stratégiával [11]. A hintázó mozgást több módszerrel is megvalósítottuk. Az aktuált csukló pontos szögre való beállítását a *partial feedback linearization* technika felhasználásával és PD szabályozóval végeztük.

3 Mozgásstratégiák

Mivel a brachiation robot alulaktuált, előírt átfogások megvalósításához mozgásstratégia létrehozása szükséges. Ezen stratégia célja a szabad kar végpontjának egy adott pontba való juttatása úgy, hogy a célpont elérésekor a szerkezet kinetikus energiája zérus legyen.

Ennek érdekében, első lépésként, a célállapot leírását végezzük el. Az előírt célpont koordináták és a geometria alapján meghatározzuk a szükséges konfigurációt. A két lehetséges konfiguráció közül a kisebb potenciális energiához tartozót választjuk. Ezzel meghatározzuk a szükséges energiaszintet, valamint definiáljuk a célállapotot.

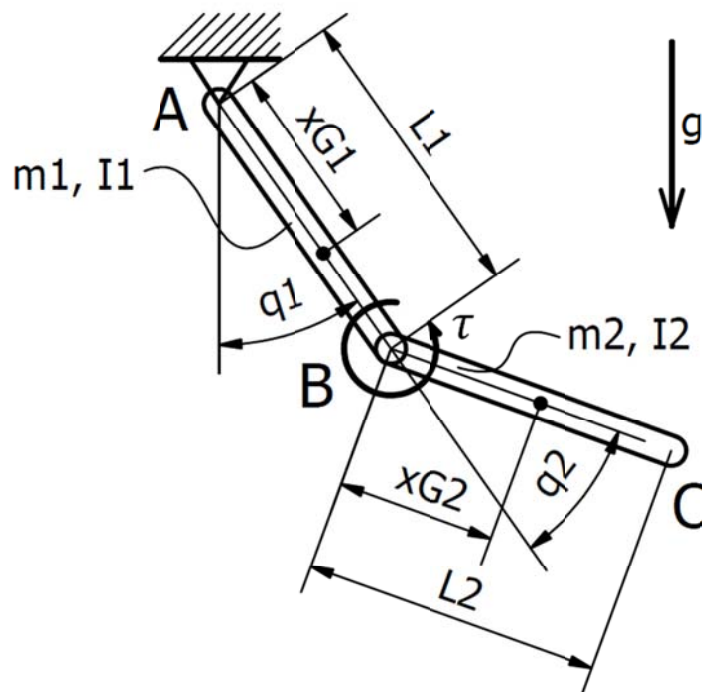
A mozgásstratégiánk célja tehát a szerkezet szükséges energiaszintjének elérése a karok egymáshoz képesti szöghelyzetének beállítása mellett. Erre különböző megoldásokat dolgoztunk ki, amelyeket az alábbiakban ismertetünk.

3.1 Az acrobot mozgásegyenlete

A rendszer dinamikai leírására több módszer létezik. A hasonló rendszerek leírására két célszerű módszer adódik, a minimális számú általános koordinátát használó-, valamint a természetes koordinátás leírásmód [12]. Ezen módszerek előnyei és hátrányai a következők:

- a természetes koordinátás leírásmód előnye, hogy a leíró egyenletek komplexitása a szabadsági fokok számának növelésével nem változik, a dinamikai modell könnyen kiterjeszthető, valamint szimuláció esetén kis számításigényű, könnyen programozható modellt kapunk. Azonban az így definiált modellhez kényszeregyenletek definiálása szükséges, ami DAE (Differencial Algebrai Egyenlet) rendszer megoldását teszik szükségessé, a kényszerek teljesülését biztosító integrálási módszer szükséges (pl. Baumgarte stabilizáció [12])
- a minimum koordinátás leírásmód előnye szimulációk esetén a stabilitás, azonban sok szabadságfokú rendszerek esetén a mozgásegyenlet jelentősen bonyolódik, ezzel nagymértékben növelve a futási időt.

A korábban említett *partial feedback linearization* (PFL) technika tervezett alkalmazása miatt, a rendszerünk leírására minimum számú általános koordinátás leírásmódot használtuk, ahol a robotkarok relatív szöghelyzeteit a q_1 , q_2 általános koordináták jellemzik. A τ nyomaték a közös csuklópontban elhelyezett motor nyomatéka. (6. ábra)



6. ábra Brachiation

Az acrobat mozgásegyenleteit a másodfajú Lagrange egyenlet alapján vezetjük le [13]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial U}{\partial q_k} = Q_k, \quad (1)$$

ahol t az időt jelöli, T a rendszer kinetikus energiáját, U a rendszer potenciális energiáját, q_k a k -adik általános koordinátát, valamint Q_k a k -adik általános erő komponensét jelöli

A potenciál függvényből nem számítható általános erők virtuális teljesítményük alapján számíthatók [12], amely a csuklónyomatékok esetében most megegyezik a $P = \mathbf{Q}^T \dot{\mathbf{q}} = \dot{q}_2 \tau$ teljesítménnyel.

Ezek alapján az Acrobot mozgásegyenlete:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix}, \quad (2)$$

ahol $\mathbf{M}(\mathbf{q}) = [m_{ij}]$ szimmetrikus, pozitív definit tömeg mátrix, $\mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = [c_1 \ c_2]^T$ a Coriolis és centrifugális erőkből származó tagokat tartalmazó vektor $\boldsymbol{\phi}(\mathbf{q}) = [\phi_1 \ \phi_2]^T$ a gravitációs erőből származó tagokat tartalmazó általános erő vektor. A (3) egyenletben szereplő skalár kifejezések részletesen:

$$m_{11} = I_1 + I_2 + L_1^2 m_2 + 2L_1 m_2 x_{G_2} \cos(q_2),$$

$$m_{12} = M_{21} = I_2 + L_1 m_2 x_{G_2} \cos(q_2),$$

$$m_{22} = I_2,$$

$$c_1 = -L_1 m_2 x_{G_2} \dot{q}_2 \sin(q_2) (2\dot{q}_1 + q_2),$$

$$c_2 = L_1 m_2 x_{G_2} \sin(q_2) \dot{q}_1^2,$$

$$\phi_1 = g((L_1 m_2 + m_1 x_{G_1}) \sin(q_1) + m_2 x_{G_2} \sin(q_1 + q_2)),$$

$$\phi_2 = g m_2 x_{G_2} \sin(q_1 + q_2),$$

ahol a 6. ábra alapján; m_1, m_2 a karok tömege, L_1, L_2 a karok hossza, x_{G_1}, x_{G_2} súlypontjainak távolsága, I_1 az A pontra vett tehetetlenségi nyomatéka a függeszkedő karnak, I_2 a B pontra vett tehetetlenségi nyomatéka a szabad karnak, valamint g a nehézségi gyorsulás.

3.2 Paraméteres gerjesztés

Paraméteres gerjesztésűnek nevezzük az olyan lengőrendszert melynek paraméterei (mozgásegyenletének együtthatói) időben periódikusan változnak. Ennek egyik legismertebb példája a hintázó mozgást harmonikusan változó kötélszámú matematikai ingával leíró modell, melynek kis kitérésekre érvényes mozgásegyenlete a Mathieu egyenlet [14]. Az inga esetén az irodalomból ismert, hogy a leghatékonyabb fellendülés akkor érhető el, ha a hosszát (a súlypont helyét) a gerjesztetlen inga sajátkörüffrekvenciájának kétszeresével harmonikusan változtatjuk [14].

A dolgozatban vizsgált Acrobat modell esetén külső (a hintát hajtó embernek megfelelő) gerjesztő hatás a robot aktuátorának megfelelő szabályozásával érhető el. Ehhez tekintsük a (2) mozgásegyenlet skalár alakban

$$m_{11} \ddot{q}_1 + m_{12} \ddot{q}_2 + c_1 + \phi_1 = 0, \quad (3)$$

$$m_{21} \ddot{q}_1 + m_{22} \ddot{q}_2 + c_2 + \phi_2 = \tau, \quad (4)$$

és alkalmazzuk a

$$q_{2d} = q_{20} + A \sin(\omega t), \quad (5)$$

útgerjesztést, ahol q_{20} jelöli azt a szöget, amely körül A amplitúdóval és ω frekvenciával rezeg az Acrobat szabad karja. Az ezt megvalósító τ_{par} nyomatékgerjesztést a (3) és (4) egyenletek alapján határozhatjuk meg. A $q_2 = q_{2d}$, $\dot{q}_2 = \dot{q}_{2d}$ és $\ddot{q}_2 = \ddot{q}_{2d}$ helyettesítésekkel a $\ddot{q}_1$ -szöggyorsulást az (3) egyenletből kifejezhető és (4) egyenletbe visszaírható és innen τ_{par} számítható. Feltételezve, hogy az előírt (5) útgerjesztés tökéletesen megvalósul elegendő az (4) egyenletet vizsgálni, ahol az előírt útgerjesztés felel meg a paraméteres (periódikusan változó) gerjesztésnek [10], [14].

Ahhoz, hogy a paraméteres gerjesztés növelje a q_1 általános koordináta rezgési amplitúdóját, a q_{20} , A és ω paraméterek megfelelő beállítása szükséges. Ezen paraméterek megfelelő megválasztásáról részletesen a 6.1 fejezetben írunk.

3.3 Részleges linearizáció állapot visszacsatolással

Az Acrobatra jellemző, hogy nem lehet egyszerre mindkét általános koordináta pozícióját és sebességét változtatni a beavatkozó segítségével. A részleges linearizáció állapot visszacsatolással (partial feedback linearization) módszerrel azt akarjuk elérni, hogy a q_2 általános koordináta és annak változása előírható legyen.

Első lépésként a $\ddot{q}_1$ -t kifejezzük a (3) egyenletből, majd behelyettesítjük az (4) egyenletbe. Így az alábbi kifejezést kapjuk:

$$\tau = \left(m_{22} - \frac{m_{12}m_{21}}{m_{11}} \right) \ddot{q}_2 + c_2 + \phi_2 - \frac{m_{21}}{m_{11}} (c_1 + \phi_1). \quad (6)$$

Ha most a *partial feedback linearization* [8] kontrollert az alábbi módon definiáljuk:

$$\tau_{PFL} = \left(m_{22} - \frac{m_{12}m_{21}}{m_{11}} \right) u + c_2 + \phi_2 - \frac{m_{21}}{m_{11}} (c_1 + \phi_1), \quad (7)$$

A (7)-es egyenletben u egy változtatható szabályozási bemenet, amelyet az adott szabályozási cél ismeretében pontosan definiálhatunk, akkor az alábbi mozgásegyenletet kapjuk eredményül:

$$M_{11} \ddot{q}_1 + c_1 + \phi_1 = -M_{12} u, \quad (8)$$

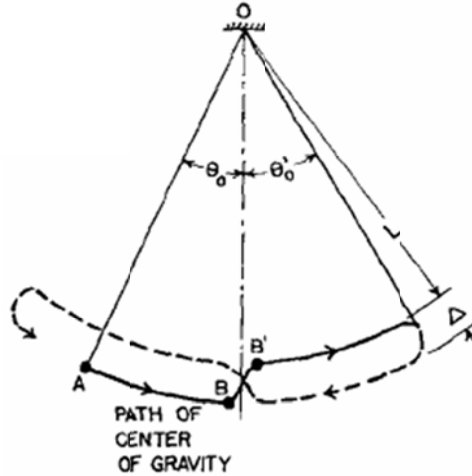
$$\ddot{q}_2 = u. \quad (9)$$

Ezek alapján látható, hogy az u bemenet és a $\ddot{q}_2$ kimenet egy másodrendű lineáris rendszert alkot. Az így megvalósított szabályzó teljesíti a követelményeket, tehát az u szabályozási bemenettel a szabadon mozgó karnak a függesztő karhoz viszonyított szöghelyzete (mozgása) tetszőlegesen előírható és megvalósítható. A végrehajtott részleges linearizálást egybeeső (collocated) esetnek is nevezik, mivel az alkalmazott nyomaték és a szabályozni kívánt szög között direkt kapcsolat van. Ellenkező (non-collocated) esetben, a q_1 koordináta szabályozásának feltétele az (3) és (4) egyenletek tömegmátrix keresztül vett csatoltsága.

3.4 Súlypont áthelyezési módszer

Adott egy mechanikai rendszer, amely egy tömegpontból és egy tömeggel nem rendelkező rúdból áll. A rúd egyik végét csuklósan megfogjuk, míg a másik végének egy kis kiterjedésű tartományban a tömegpont helyét rúdirányban változtatjuk. Az így kapott ingát tekinthetjük egy hintán álló ember egyszerű modelljének, amiben a tömegpont változása, a modellben szereplő ember leguggolása illetve felállása hatására kialakuló tömegpont-változást modellezi [10]. Ez a módszer szintén paraméteres gerjesztést alkalmaz azzal a különbséggel, hogy az itt alkalmazott gerjesztés nem harmonikus, a súlypont áthelyezést a 3.2 fejezetben leírtakkal ellentétben nem a kiszámított nyomaték módszerével hanem PD szabályozó segítségével valósítottuk meg.

Amennyiben a tömegpont helyének változását leíró függvényt megfelelően választjuk, a rendszer rövid idő alatt belengethető. Definiáljunk két különböző távolságot, amely a csukló és a tömegpont két lehetséges távolságát írja elő. Amennyiben a két definiált helyzet között a 7. ábrán látható módon váltunk, azaz a szélső szöghelyzetekben a kisebbről a nagyobbra, az alsó holtpontban pedig épp ellentétesen, és a rendszert $\theta \neq 0$ kezdeti állapotból indítjuk, a lengés amplitúdója nő [10]. Ez a *súlypont áthelyezési módszer*.



7. ábra Súlypont áthelyezési stratégia sematikus szemléltetése

A brachiation robot szabad karjának, és így az egész rendszernek a súlypontját változtathatjuk a q_2 általános koordináta $q_2 = 0$ körüli adott két szögértékre való beállítással. Ezt a mozgást megvalósíthatjuk a 3.3 fejezetben leírt módszer segítségével, hiszen amennyiben az u szabályzó erő megegyezik egy PD szabályzóval, a rendszer egy előre definiált szükséges szöghelyzetre (q_{2d}) fog beállni. Legyen a következő függvénnyel előírva a mozgás:

$$\text{ha } \dot{q}_1 > 0 \text{ és } q_1 > 0: q_{2d} = q_{2d}^*,$$

$$\text{ha } \dot{q}_1 < 0 \text{ és } q_1 > 0: q_{2d} = 0,$$

$$\text{ha } \dot{q}_1 < 0 \text{ és } q_1 < 0: q_{2d} = -q_{2d}^*,$$

$$\text{ha } \dot{q}_1 > 0 \text{ és } q_1 < 0: q_{2d} = 0,$$

ahol q_{2d}^* egy alkalmasan választott szög.

Az alulaktuált kettős ingánk így belengethető.

3.5 Energiaszint alapú szabályozás

A robot megfelelő energiaszintre juttatásának egyik módszere, a robot aktuális és cél energiaszintjének különbsége alapján működő szabályozó tervezése. Ennek megvalósítása akkor lehetséges, ha a robot aktuális energiaszintjét számoljuk, valamint képesek vagyunk annak megfelelő irányú módosítására. Ennek egyik módszere az, hogy a τ nyomatékkal $\dot{q}_1$ -nak megfelelő fázisban és irányban avatkozunk be [11].

Az előbbi módszerrel párhuzamosan PD szabályozást alkalmazunk q_2 általános koordinátára, így elérjük, hogy egy előre definiált szöghelyzet körüli lengéssel valósuljon meg az célenergiaszint beállítása. Ha ezt a szöget a célállapotban szükséges két kar közötti

szögre állítjuk, akkor úgy közelítjük meg célenergiaszintet, hogy közben a célállapotot is túréren belül elérjük. Ezek alapján a szükséges u szabályozási bemenet:

$$u = -P(q_2 - q_{2d}) - D\dot{q}_2 + \text{sat}(E(W - W_{\text{nec}})\text{sign}(\dot{q}_1)), \quad (10)$$

ahol P és D paraméterek rendre a q_2 koordinátára alkalmazott PD szabályzó proporcionális és differenciális tagja, q_{2d} a két kar közötti megkívánt szöghelyzet, E az energiaszint különbség erősítési tényezője, W az aktuális energiaszint, W_{nec} a szükséges energiaszint, $\text{sat}(x)$ egy szaturáló függvény, valamint $\text{sign}(x)$ az előjel függvény [11]. A [11] hivatkozásban említett szabályozáson annyit változtattunk, hogy az energiaszint különbséget nem a $\dot{q}_1$ -tal arányosítotjuk, hanem a $\text{sign}(\dot{q}_1)$ -tal. Ezt a módosítást azért találtuk szükségesnek, hogy a szabályozó enegriaszint különbségtől függő tagja kis $\dot{q}_1$ szögsebességeknél is kellő mértékben beavatkozhasson.

Ebben a fejezetben szereplő levezetések Mathematica fájlja a Függelék 10.2 pontjában található.

4 Mechanikai Tervezés

A célunk egy, a fentiekben bemutatott brachiation robot megtervezése valamint megépítése, melynek segítségével igazolni tudjuk az elméleti, valamint szimulációs eredményeinket. Ebben a fejezetben a szerkezet mechanikai tervezésének folyamatát mutatjuk be.

A tervezési folyamat első lépéseként pontosan megfogalmaztuk a feladatot. Ezt követte a koncepcióképzés, melynek során elkészített koncepcióvázlatok közül a legmegfelelőbb alapján megterveztük a szerkezetet. A véglegesített tervek alapján az alkatrészek beszerzése, legyártása, illetve az összeszerelés következett.

4.1 A feladatmegfogalmazás, követelményjegyzék

A cél tehát egy két karból álló robot tervezése, melynek karjai aktuált csuklóban kapcsolódnak, míg a karok szabad végei képesek a szerkezet és a tér egy rögzített pontja között oldható csuklós kapcsolatot létesíteni. Az így megalkotott szerkezet alkalmassá válik egy meghatározott függőleges síkban való mozgásra. A tervezés részét alkotja a robot megépítése mellett, az adott mozgástér megfelelő kiképzése is.

Ezek alapján, a következő követelményeket fogalmaztuk meg:

- A két kar között, csuklós kapcsolat megvalósítása
- Aktuátor beépítése a két kar közös csuklópontjába, amely képes nyomaték létrehozására a két kar között. A nyomaték legyen legalább az egy kar tömege által a karhosszon ébredő nyomaték tízszerese.
- Oldható csuklós kapcsolat létesítésére alkalmas szerkezet tervezése a karok szabad végeire
- A robottal való csatlakoztathatóságot biztosító mozgástér kialakítása
- Egy karon elhelyezkedő csuklópontok távolsága legyen 200-300mm
- Minél alacsonyabb tömegű szerkezet létrehozása
- A két kar egymáshoz képesti szöghelyzetének érzékelése
- Az aktuálisan csuklóponttal rögzített kar függőlegessel bezárt szögének érzékelése
- Az elektronikai eszközök kábeleinek elvezethetőségének biztosítása
- Egyszerűen legyártható alkatrészek tervezése
- A két kar közötti szimmetriára való törekvés

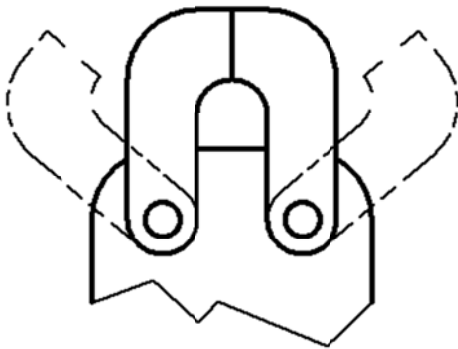
4.2 Konceptióképzés

A szükséges funkciók megalkotására többféle fizikai hatást kihasználó, valamint különböző elvi kialakítású megoldások lehetségesek. Az alábbiakban a robot három fő funkciójának megvalósítási lehetőségei közül, az általunk legalkalmasabbnak ítéltet mutatjuk be.

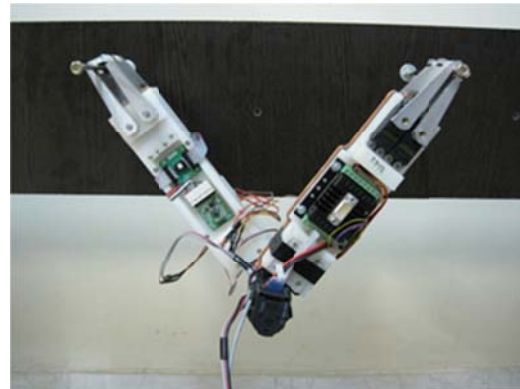
4.2.1 A karok szabad végein elhelyezkedő oldható csuklós mechanizmus

A probléma egyik lehetséges megoldása, az 8. ábrán bemutatott két egymással szembe elhelyezkedő körmös nyitható kar kialakítása. Az így létrehozott szerkezet képes a térben, vízszintesen elhelyezkedő rudakhoz való csatlakozásra, valamint a körülöttük való elfordulásra (9. ábra).

A körmös karok egymáshoz képesti mozgását megoldhatjuk szervomotor, segítségével, mágneses elven működő aktuátorral, hidraulikus, vagy pneumatikus munkahengerrel is.



8. ábra A karos megfogó mechanizmus



9. ábra A CERDA robot [9]

Az ilyen kialakítás előnye az alacsony tömeg, valamint hogy sokféle működtetővel lehetséges a kivitelezése, így nagy tervezési szabadságot biztosít. Emellett nem korlátozza a robot, mozgási síkjára merőleges méretét.

Hátránya, hogy a vízszintes rudakon elforgó csukott kampók nemcsak hogy súrlódnak, de emellett kotyognak is. A térben csak adott pontokhoz képes így átfogni a szerkezet, oda, ahova elhelyezzük a fogódzkodókat. Emellett az karok összecusulásának időigényét figyelembe kell vennünk a mozgástervezésnél.

A funkció másik lehetséges megoldása, elektromágnes alkalmazása. Ebben az esetben a mozgásteret egy függőleges acéllap biztosíthatja, amihez való csatlakozást így a mágnes

bekapcsolásával érhetjük el. A csuklós mozgást a mágnes, valamint a kar közé épített csapágy segítségével valósíthatjuk meg.

Az így megalkotott oldható csukló előnye, hogy a kapcsolat létrehozásának, azaz a mágneses tér felépülésének időigénye gyakorlati szempontból elhanyagolható, valamint az acéllap bármely pontjához képes csatlakozni az elektromágnes.

Hátrányai a következők: A megfelelő rögzítő erőt létrehozó elektromágnesek relatív nagy tömegűek. Emellett ezen megoldás esetén a szerkezet mozgási síkjára merőleges kiterjedése korlátozott, hiszen ha a tömegközéppont az acéllaptól túlságosan távol helyezkedik el, létrejöhetnek olyan üzemállapotok, amikor a kialakuló lefejtő erő miatt megcsúszik, vagy esetleg leesik, a robot.

4.2.2 A két kar között elhelyezkedő aktuátor kialakítása

A funkciót igen hatékonyan megvalósíthatjuk egyenáramú motor alkalmazásával mivel ezek a motorok nagy nyomaték/tömeg aránnyal rendelkeznek, valamint széles fordulatszám tartományban üzemeltethetők. Hátrányként jelenik meg, hogy a megfelelő mértékű nyomaték eléréséhez áttételt kell alkalmaznunk.

A beépítési lehetőségek közül a legegyszerűbb, ha a motor tengelye egybeesik a csuklópont forgástengelyével. Ez a kialakítás nagyfokú szimmetriát eredményez a két kar között, azonban így a robot mozgássíkra merőleges irányú kiterjedése jelentősen megnő.

Az imént említett megoldás hátrányát kiküszöbölhetjük, ha a motor tengelye merőleges az csukló forgástengelyére. Így azonban a két kar erősen aszimmetrikussá válik, valamint a kialakítás is tovább bonyolódik, hiszen a nyomaték megfelelő tengelyre való átviteléhez kúpfogaskerék pár alkalmazása szükséges.

4.2.3 A karok szöghelyzetének mérése

A szöghelyzetek mérésére alkalmazhatunk encoderkeket, amennyiben a két egymáshoz képest elforduló szerkezeti egységet ehhez alkalmasan ki tudjuk alakítani. Előnyük a nagy működési gyorsaság, és a nagy felbontás. Lehetőség adódik többszöri körülfordulás megvalósítására is. Hátrányt jelent a nagy felbontású eszközök magas ára.

A funkciót elláthatjuk potenciométer segítségével is. Ekkor az analóg jel mintavételezése után kaphatunk eredményt az aktuális szöghelyzetről. A problémát ebben az esetben a pontatlanság jelenti, emellett a szerkezet használata során a kopás miatt változtatja karakterisztikáját is. Emellett a mérési tartomány is korlátozott, hiszen egy potenciométert csak adott számú körülfordulást enged meg a saját tengelye körül.

Amennyiben nincs lehetőség a karok valamint a függőleges irány közti fizikai kapcsolat kialakítására, a szöghelyzet mérése megoldható gyorsulásérzékelőkkel. Itt a legnagyobb problémát az adatok feldolgozása majd ebből a szükséges információ meghatározása jelenti. Problémát jelent az integrálás okozta nullponteltolódás kiküszöbölése, valamint a szükséges szűréssel járó időkéésés szabályozást destabilizáló hatása.

További lehetőséget nyújt, kamerás rendszer kialakítása, mely képének digitális feldolgozása után megkaphatjuk a szükséges értékeket. A legnagyobb hátránya ennek a megvalósításnak is a bonyolultsága, valamint a lassú működés, és pontatlanság.

4.2.4 A karok egymáshoz képesti teljes körülfordulásának lehetősége

A karok egymáshoz képest való teljes elfordulásának feltétele, hogy a karok hossza különböző legyen, valamint hogy kialakításukat úgy oldjuk meg, hogy a karok fizikailag elférjenek egymás mellett. Azért van ekkor szükség különböző karhosszakra, mert a javasolt kapaszkodó szerkezetek csak így működőképesek. Körmös megfogó mechanizmus alkalmazása esetén az két különböző síkban mozgó kar azt eredményezi, hogy a karoknak a rúdírányú csavaró nyomatéknak is ellen kell tartani, amely nemcsak a súrlódásokat növeli, de a kotyogás miatt kialakuló játék is nő.

Ezek alapján amennyiben lehetővé tesszük a teljes körbeforgathatóságot a szerkezet aszimmetrikussá válik, mozgássíkra merőleges irányú méretének növekedése, pedig mindenképpen megnehezíti a fogódzkodók, valamint a tejes szerkezet tervezését.

A fentiekben leírtak alapján ezt a lehetőséget elvetettük. Ez részben korlátozza ugyan a mozgást, azonban a jelenlegi alkalmazás szempontjából nem okoz komoly problémát.

4.2.5 Az elvi megoldások kombinációja

A fentiekben megvalósítási lehetőségek logikai, valamint fizikai összeférhetőségének vizsgálatát Zwicky-féle morfológiai mátrix [15] segítségével végezzük el. Így létrehozunk több lehetséges koncepciót.

Funkciók		Megoldások			
		1	2	3	4
1	Aktuátor kialakítása	Egytengelyű megoldás	Kúpfogas-kerékkel		
2	Oldható csukló	Elektromágnessel	Körmös karok segítségével		
3	Szöghelyzet mérés	Encoderrel	Potenciométerrel	Gyorsulás-érzékelővel	Digitális kamerával

1. elvkombináció

2. Elvkombináció

10. ábra Megoldási elvek kombinálása

Az így kapott elvkombinációk közül az 1-est választottunk, mivel ez a modell majdnem minden szempontból jobb, mint a 2-es számmal jelölt:

- Gyors átfogást biztosít
- Egyszerű a mozgástér kialakítása, mivel csak egy acéllapra van szükségünk
- Egyszerű szöghelyzet mérés
- A két kar egymáshoz képest nagymértékű szimmetriát mutat

Hátrányai, és az ezekből adódó további követelmények a megtervezett szerkezettel szemben:

- Az elektromágneses megoldás viszonylag nagy tömegű szerkezetet eredményez
- A fentiekben említett lefejtő erő minimalizálása érdekében, törekednünk kell arra, hogy a robot mozgássíkjának és súlypontjának távolsága minél kisebb legyen.

4.3 Tervezés

A kiválasztott funkció kialakítások alapján a tervezés első lépéseként a megfelelő alkatrészek kiválasztását végeztük el. Így kiválasztottuk az elektromágnest, az encodereket, valamint az egyenáramú motort és a hozzá tartozó áttételt.

Az elektromágnes kiválasztása során a fő szempontunk volt, hogy olyan szerkezeti egységet válasszunk, amely képes megcsúszás mentesen megtartani a robotot működés közben. A kiválasztott alkatrész megfelelőségét Matlab szimulációk segítségével igazoltuk.

A motor kiválasztásának fő szempontjai, a megfelelő nyomatékú, valamint fordulatszámú motor kiválasztása, amely esetén lehetőség nyílik a motor forgásának encoderrel való érzékelésére.

A karok végein elhelyezkedő encoderek legfőbb paramétere a térbeli felbontás, amellyel szembeni elvárásunk $0,1^\circ$ -os érték volt.

A fenti szempontok alapján kiválasztott eszközök valamint azok felhasználás szempontjából lényegesebb paraméterei az 1-4 táblázatokban láthatóak. További adatok a CD mellékletben találhatóak.

Típuszám	Tömeg [kg]	Rögzítő erő (megfelelő acéllapra merőleges irányban) [N]	Feszültség [V]
E1AS0511	0,3	750	24

1. táblázat Selos E1AS típusú rögzítő elektromágnes paraméterei

Motor típuszáma	Motor névleges feszültsége [V]	Az áttétel mértéke	Maximális nyomaték (az áttételezés figyelembevételével) [Nm]	Maximális fordulatszám (az áttételezés figyelembevételével) [rad/s]
2342L012CR	12	1:64	5,12	13,25

2. táblázat A Faulhaber DC motor, és hozzá csatlakozó áttételezés paraméterei

Feszültség [V]	Az enkóder-tárcsa osztásszáma	A csatornák száma
5	12	2

3. táblázat A Faulhaber DC motor encoderének paraméterei

Típuszáma	Feszültség [V]	Az enkóder-tárcsa osztásszáma	A csatornák száma
HEDM-5500#B13	5	1000	2

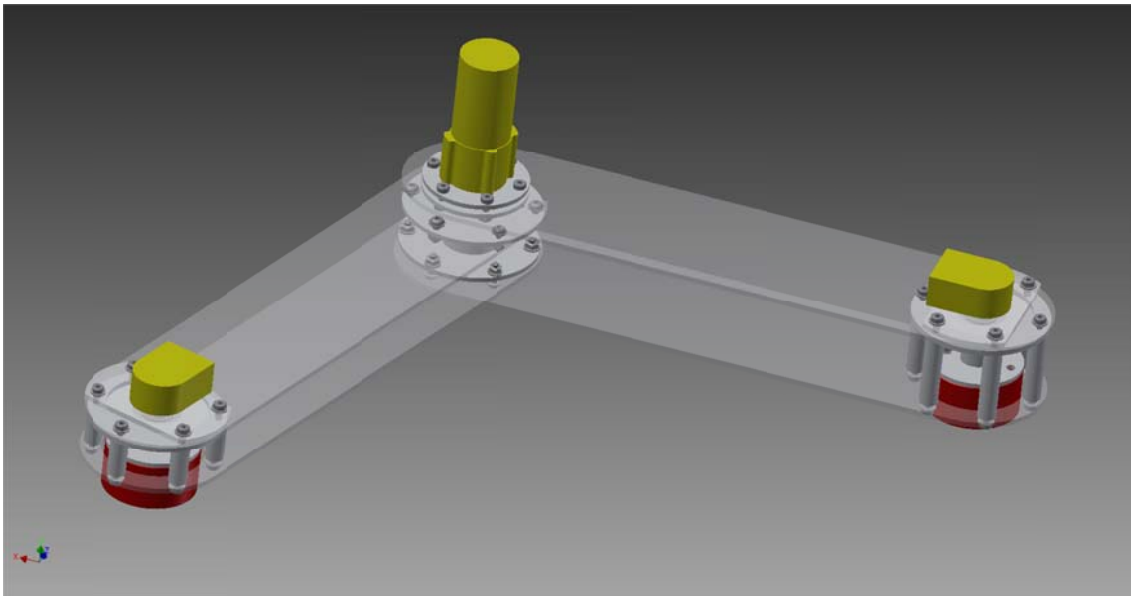
4. táblázat Avago Technologies encoder adatai

A robot terveit, valamint az azokból készített műszaki rajzokat Autodesk Inventor segítségével készítettük el.

A tervek megalkotásánál a fő szempont a kiválasztott alkatrészek tulajdonságainak, méreteinek, rögzítési pontjainak figyelembevétele, azonban próbáltunk a könnyebb gyárthatóság érdekében rendelkezésre álló alapanyagokat felhasználni. Emiatt készültek a szerkezet karjai 3mm vastagságú plexiből.

Fontos volt az egyszerű gyárthatóság, emiatt törekedtünk arra, hogy az alkatrészek megmunkálása elvégezhető legyen esztergálással, vagy a Műszaki Mechanikai tanszéken található (típuszám: BZT-PF-750-P) háromtengelyű megmunkáló gép segítségével. Törekedtünk az egyszerű szerelhetőségre, emiatt a csuklós kapcsolatokat mélyhornyú golyóscsapágyakkal, a kötéseket csavarok segítségével valósítottuk meg.

Az így felépített tervezési szakasz eredményeként kapott modell, a 11. ábrán látható.

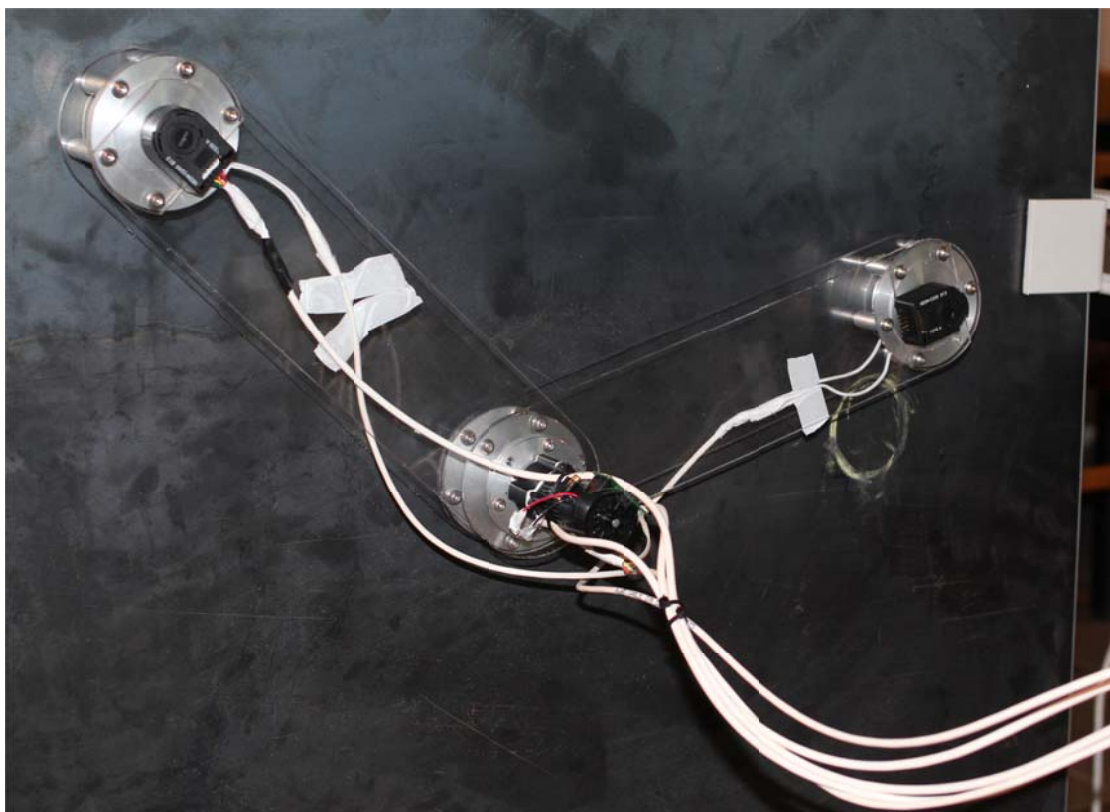


11. ábra A brachiation robot modellje

4.4 Gyártás, összeszerelés

A véglegesített tervek alapján elkészítettük az alkatrészek műszaki rajzait a függelék 10.1 pontjában találhatóak. Az alumínium alkatrészek esztergálását a Gyártástudomány és – technológia Tanszéken készítették el a számunkra. Az így létrejött majdnem kész alkatrészek furatolását, valamint a karokat alkotó plexi alkatrészek elkészítéséhez, a fentiekben említett háromtengelyű marógépet használtuk. A furatolást manuális üzemmódban, készítettük el, míg a plexi alkatrészeket G kódban megírt program segítségével.

Az összes alkatrész beszerzése után a szerkezet összeszerelése következett. Az összeszerelt robot, a 12. ábrán látható.



12. ábra A megépített brachiation

5 Elektronikai és szabályozás tervezés

A robot vezérlésének megvalósításához a Matlab környezetben futó Simulink programot választottuk, amely alkalmas valós idejű futásra, külső egységgel való kommunikációra, valamint a Matlab környezetben elkészített szimulációk számításai könnyen beilleszthetők a Simulink programba.

Az elektronikai tervezés célja, egy olyan rendszer tervezése, amely képes számítógéppel való kommunikációra, ellátja az encoder jelek feldolgozását, valamint képes a motor vezérlésére és a mágnesek be- illetve kikapcsolására.

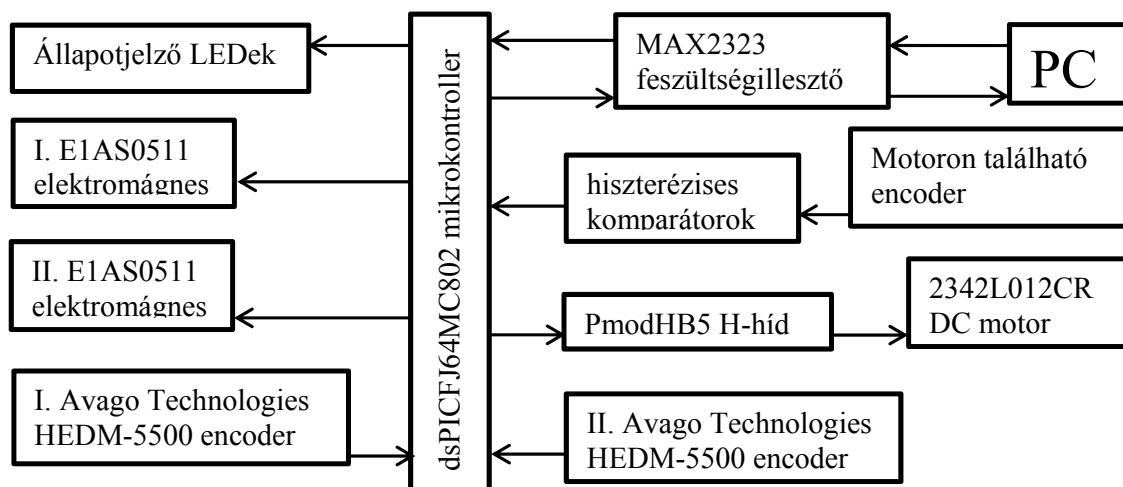
A jelfeldolgozó, vezérlő egység fő eleme egy dsPIC (Digital Signal Processors) mikrokontroller, amely termékcsaládot kifejezetten digitális jelfeldolgozási és vezérlési feladatok megvalósítására alkották, így jellemző rájuk a gyors működés, illetve a beépített kommunikációs, jelfeldolgozó és vezérlő modulok széles választéka.

Az elektronikai tervezés során, olyan mikrokontrollert választottunk, amely képes digitális encoder jelek feldolgozására QEI (Quadrature Encoder Interface) modul segítségével, rendelkezik PWM (Pulse Width Modulation) interfésszel, amely az egyenáramú motor vezérléséhez szükséges, valamint tartalmaz UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) modult, amely számítógép és dsPIC közötti soros porti kommunikáció megvalósításáért felelős. Fontos szempont volt, az egyszerű programozhatóság és könnyen megvalósítható tesztelhetőség (nyomkövetés) a program megírásának egyszerűsítésére, a hibakeresés megkönnyítésére.

A fent leírt szempontrendszer alapján dsPIC33FJ64MC802 mikrokontrollert választottuk a feladat megvalósításához. Az eszköz programozását, és nyomkövetését Microstick II fejlesztői hardveres környezetben végeztük.

5.1 Az áramkör tervezése

A fent ismertetett követelményrendszert kielégítő áramköri kapcsolások logikai felépítést a 13. ábra szemlélteti. A nyilak az információáramlás irányát jelzik.



13. ábra Elektronika sematikus felépítése

A különböző szenzorok, aktuátorok valamint a mikrokontroller szükséges kiegészítő áramköreinek részletesebb bemutatását az alábbiakban ismertetjük.

A karok végein elhelyezkedő Avago Technologies HEDM-5500 encoderek kimenő jelei digitális, 0-5 V-os jelek. A stabil működés érdekében felhúzó ellenállásokat alkalmaztunk. Az így létrejövő jeleket közvetlenül képes feldolgozni a PIC QEI modulja, így az ellenállások bekötése mellett csak a megfelelő lábbal történő összeköttetés szükséges.

A Faulhauber motoron levő encoder nincs ellátva feldolgozó egységgel, a kimeneti analóg jeleit nem képes a mikroprocesszor közvetlenül feldolgozni. Ahhoz hogy digitális jelekké alakítsuk a kijövő jelalakot, hiszterézises komparátor tervezése szükséges. Ezt a feladatot CHN-LM311N típusú komparátor megfelelő ellenállásokkal való ellátásával és bekötésével valósítottuk meg.

A motor vezérlését, megfelelő feszültség kivezérlésével oldottuk meg. Ezt Digilent PmodHB5 típusú H-hídkapcsolással ellátott áramkörrel végeztük, amely egység a dsPIC PWM jeleit megfelelő feszültségszintre emeli, valamint lehetővé teszi a motor által leadott nyomaték irányának megfordítását is.

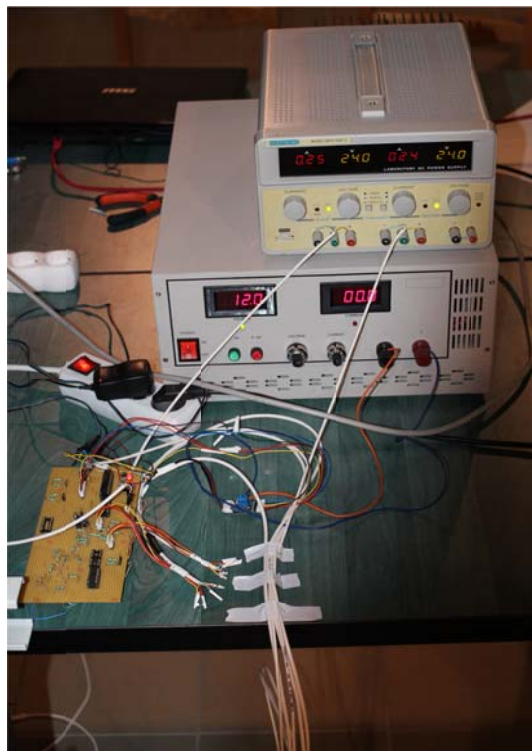
A számítógép RS232-es portja és a mikrokontroller közötti kommunikáció megvalósításához a két eszköz jeleinek feszültség szintjét megfelelő értékekre kell hozni, amely feladathoz MAX3232CPE típusú feszültségillesztő áramkört alkalmaztuk.

Az elektromágnesek ki- és bekapcsolásához, nagyteljesítményű, IRLU8726PBF típusú MOSFET tranzisztorokat használtunk, amelyek alkalmasak az elektromágnesek számára szükséges 24V-os feszültség kivezérlésére, méghozzá a PIC kimeneti digitális feszültség szintjei alapján.

A fentiekben bemutatott egységeknek, IC-knek, adott tápfeszültség biztosítását, szűrőkondenzátorokkal ellátott LD1117V33 valamint L7805CVTO-220 típusú feszültségstabilizátorok valósítják meg.

A mikrokontrollert a megfelelő egységekkel valamint tápfeszültséggel történő összeköttetés kialakításán kívül két jelző LED-el, valamint Reset gombbal is elláttuk.

Az így megalkotott áramkőről képet a 14. ábrán láthatnak. Az elektronikai alkatrészek adatlapjai a CD mellékleten megtalálhatóak.



14. ábra A felhasznált elektronika

5.2 A szabályozást megvalósító program

A robot megfelelő működtetéséhez szükségünk van az elvégzendő feladatok megosztására a mikrokontroller és a számítógép között. Jelen esetben a feladatokat úgy választottuk ketté, hogy dsPIC látja el a jelfeldolgozási, kivezérlési feladatokat, míg a nyers adatok alapján a Simulink program végzi a számításokat, és továbbítja az azok alapján kapott eredményeket a mikrokontroller felé. Ez a feladatmegosztás azért is szerencsés, mert így lehetőségünk van a futási eredmények eltárolására, a későbbi kiértékelésre és nem utolsósorban összetett szabályozási feladatok (pl. részleges linearizálás állapot visszacsatolással) hatékony, a mikrokontroller ismeretét nem igénylő, programozására és kipróbálására.

A két eszköz között master-slave alá- fölérendeltségi viszonyt alakítottunk ki. A mikrokontroller a PC felől érkező adatok alapján, beállítja a szükséges regisztereket, amik megfelelően működtetik a motort, az elektromágneseket, és a LED-eket. A beérkezett információra válaszként pedig, az aktuálisan megfigyelendő két encoder szöghelyzetét leíró adatokat küldi.

A mikrokontrolleren futó C program a függelék 10.7 pontjában, a Simulink program pedig a 10.8-10.12 található.

6 Mozgásstratégiák szimulációja

A megvalósított rendszerünk adatait felhasználva szimulációkat készítettünk annak modellezésére, valamint a fellendülési stratégiáink paramétereinek behangolására. Az így kapott eredményeket az alábbi fejezetekben ismertetjük.

6.1 Paraméteres gerjesztés

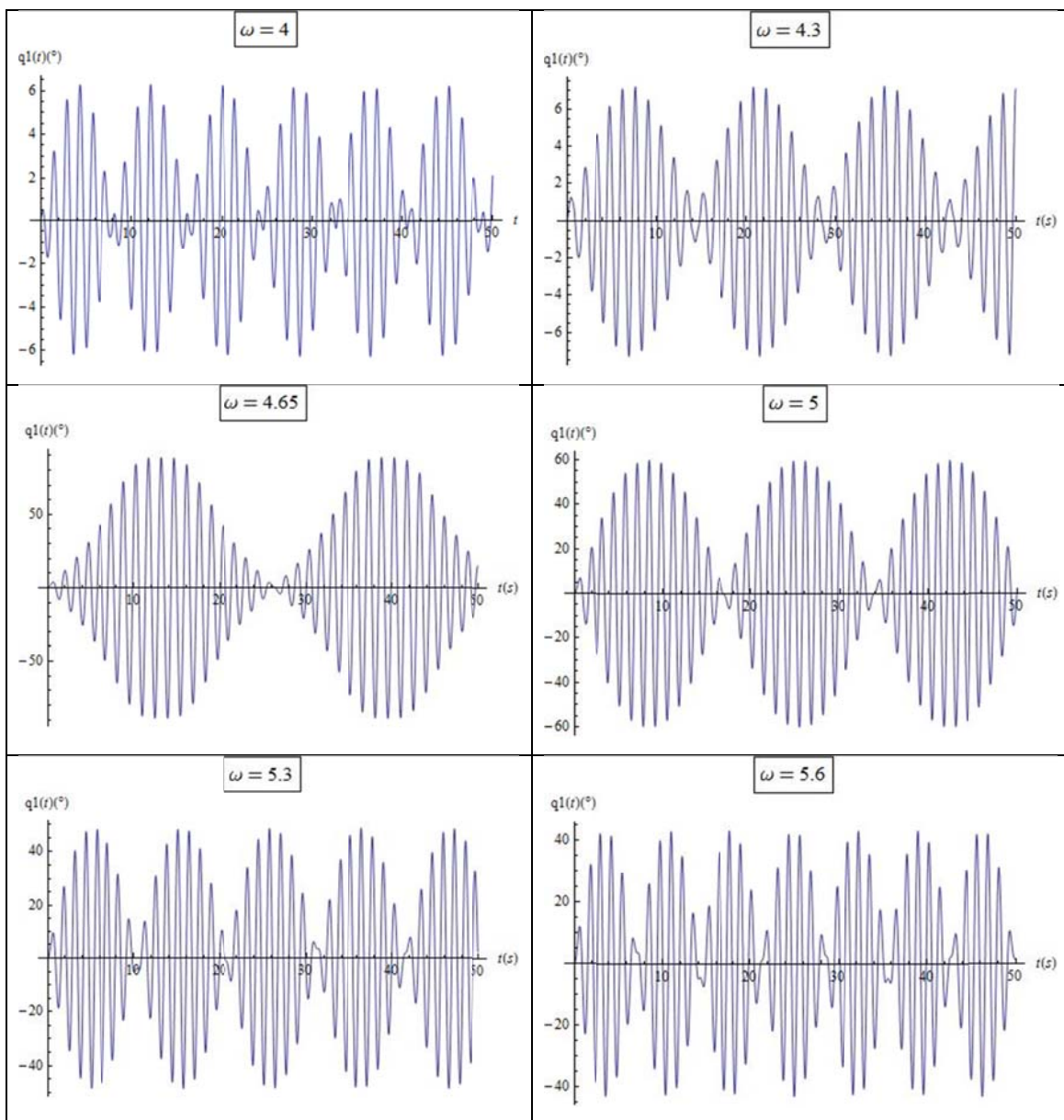
A q_1 lengési amplitúdójának növeléséhez a paraméteres gerjesztés q_{20} , A és ω paramétereit megfelelően kell megválasztanunk. A szimulációk alapján az alábbi értékeket találtuk megfelelőnek:

$$\begin{aligned} q_{20} &= 0[\text{rad}], \\ A &= \frac{\pi}{5} [\text{rad}], \\ \omega &= 4,65 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]. \end{aligned} \tag{11}$$

A q_{20} paraméter megválasztása triviálisnak mondható, mert így a rezgés során mindkét irányba szimmetrikusan változik a rendszer súlypontjának távolsága a felfüggesztési ponttól. Az A amplitúdó meghatározása mögött leginkább gyakorlati szemléletmód állt. Ilyen amplitúdójú mozgást még a motor könnyedén megvalósít, azonban elegendően nagy a rendszer belengetéséhez. Az igazi nehézséget az ω megválasztása okozta, mivel nem megfelelő választás esetén nem fog növekedni a rendszer energiaszintje. A változó kötéllhosszúságú matematikai inga esetén az ω értéket a gerjesztetlen inga sajátkörfrekvenciájának kétszeresénél keresnénk [14]. A mi rendszerünknel azonban nem minden súlypont változási periódus szimmetrikus, hiszen egyszer az egyik, utána pedig a másik irányba tér ki a q_2 szög. Így a mi esetünkben a súlypont változási frekvenciája ugyancsak az inga sajátkörfrekvenciájának kétszerese közelében található, de ez az érték nem egyezik meg ω -val. A megfelelő ω -t ennek felénél, az inga sajátkörfrekvenciájának közelében találjuk.

Inventor program segítségével meghatároztuk $q_2 = 0$ rögzített szöghelyzet esetén a robotunk súlypontjának távolságát a felfüggesztési ponttól. Az így kapott értékkel megegyező kötéllhosszúságú matematikai ingának sajátkörfrekvenciája $5,14 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$. A fentiekben leírtak alapján ezen érték közelében vizsgáltuk a paraméteres gerjesztést.

Az 15. ábrán a szimuláció eredményei láthatóak. Tapasztalataink alapján $4 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ alatt a rendszer nem gerjedt be, 4,5 és $4,9 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ között az acrobot lengése egy ideig gerjed, majd a lengés lecsillapodik. Ezt a jelenséget azzal magyarázhatjuk, hogy a gerjesztés, valamint az acrobot lengési frekvenciája nem egyezik meg tökéletesen, így egy ideig a gerjesztés erősíti q_1 lengési amplitúdóját, majd gyengíti. $5 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ fölött a rendszer q_1 lengési amplitúdója már csak kisebb maximális értéket vesz fel. Ezek alapján az gerjesztés frekvenciáját $\omega = 4,65 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ értékre állítottuk be.



15. ábra Mathematica szimuláció eredményei paraméteres gerjesztésre

Ehhez az alfejezethez tartozó Mathematica szimulációs fájl a Függelék 10.2 pontjában található.

6.1 Részleges linearizáció állapot visszacsatolással

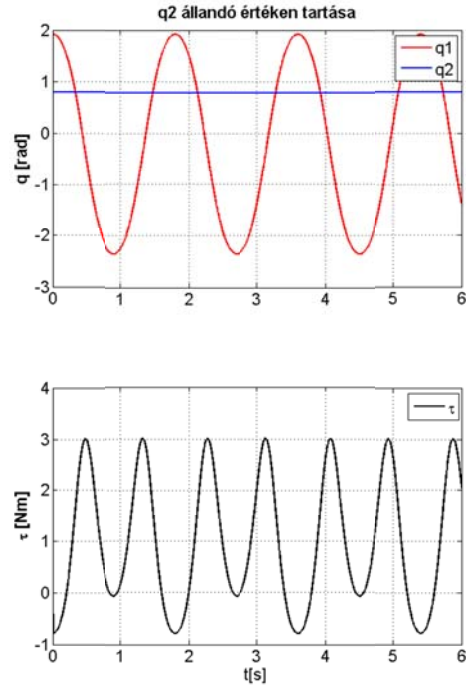
Ebben az alfejezetben a visszacsatolással biztosított részleges linearizálás (partial feedback linearization) hatását szemléltetjük három alappéldán keresztül. Célunk olyan u szabályozható bemenetet beállítása, mellyel q_2 szög értékét, később annak sebességét, végül gyorsulását állandó értéken tarthatjuk.

A 3. fejezet (3) és (5) egyenletei alapján adott q_2 szög állandó értéken tartásához $u = 0$ (szintetikus) szabályozási bemenet szükséges. A szimuláció alapján kapott τ értékek, valamint a q_1 és q_2 szögek változása a 16. ábrán látható.

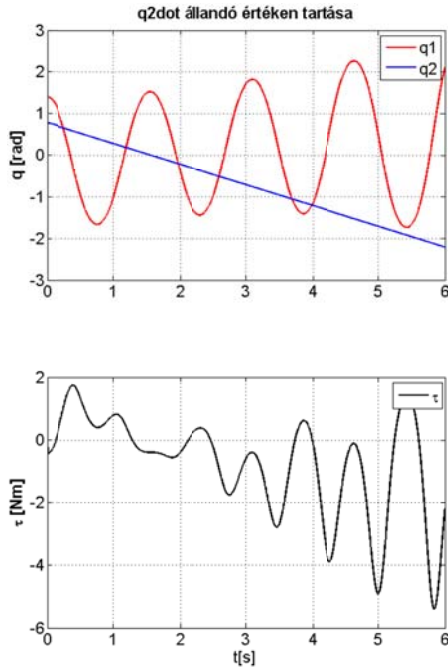
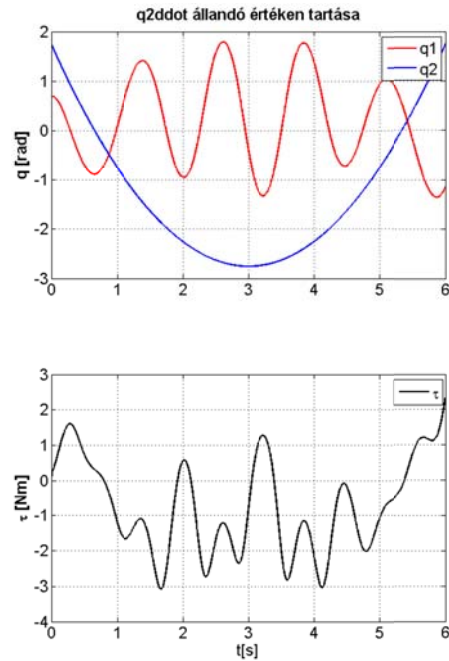
Hasonlóan $u = 0$ szabályozható bemenet esetén, $\dot{q}_2 = \text{const}$, nemnulla kezdeti feltétellel indítva a rendszert a szögsebesség állandó értéken tartása valósul meg. Az így lefutott szimuláció eredményei (17. ábra) is ezt igazolják.

Állandó $\ddot{q}_2$ megvalósításához, u szabályozási bemenetet valamilyen konstans, nem zérus értékre állítjuk. Ennél a szimulációnál a kezdeti feltétel

$q_1(0) = 40^\circ$, $q_2(0) = 100^\circ$, $\dot{q}_1(0) = 0 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ és $\dot{q}_2(0) = -3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, valamint a szabályozási bemenet $u = 1$. A szimuláció eredményeit a 18. ábra szemlélteti. Az alfejezethez tartozó MATLAB szimulációs program a Függelék 10.3-jában található.



16. ábra q_2 állandó értéken tartása PFL

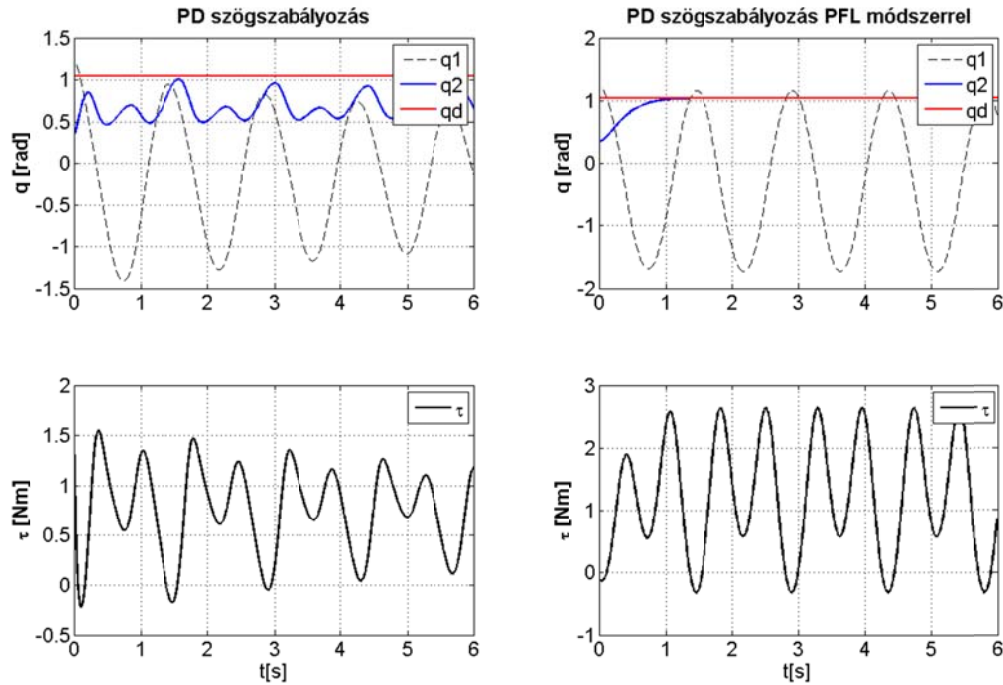

17. ábra $\dot{q}_2$ állandó értéken tartása PFL esetén

18. ábra $\ddot{q}_2$ állandó értéken tartása PFL esetén

6.2 Súlypontáthelyezéssel stratégia

A szimuláció elkészítésében a legfontosabb feladat egy gyorsan működő PD szögszabályozás létrehozása, mert így közelítjük meg leginkább a 3.4 fejezetben bemutatott, a súlypont hirtelen áthelyezésére építő elméletet.

A 19. ábrán két fajta PD szabályozás eredményei láthatóak. Ezek közül az egyik egy egyszerű PD szabályozó által megvalósított beállást, míg a másik a PFL segítségével megalkotott szimuláció eredményeit szemlélteti. A kezdeti feltételek mindkét esetben azonosak voltak. Látható, hogy PFL nélküli a PD szögszabályozás szöghibája igen jelentős, ráadásul értéke időben változó. Ezzel szemben a PFL alkalmazása gyors beállást biztosít elhanyagolható szöghiba mellett. Ez azzal magyarázható, hogy az egyszerű PD szabályozó a PFL-el szemben nem veszi figyelembe a brachiation robot dinamikus viselkedését, valamint a gravitáció okozta hatásokat.

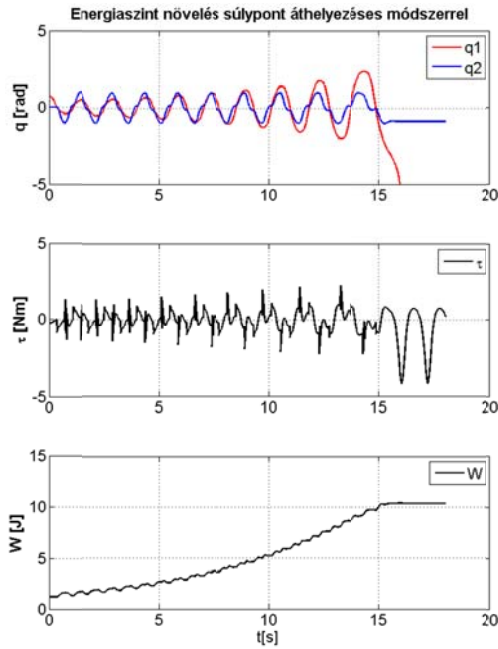
A P és D értékét mindkét esetben a motor nyomatékkorlátját figyelembe véve szimulációk segítségével határoztuk meg. Az 19. ábrán az adott szabályozáshoz tartozó q_1 , q_2 szögkoordináták, q_d megkívánt szögérték és a kivezérelt τ nyomaték látható. Ezek alapján megállapítható, hogy Partial Feedback Linearization megfelelő módszert biztosít a szabad kar relatív szöghelyzetének szabályozásához.



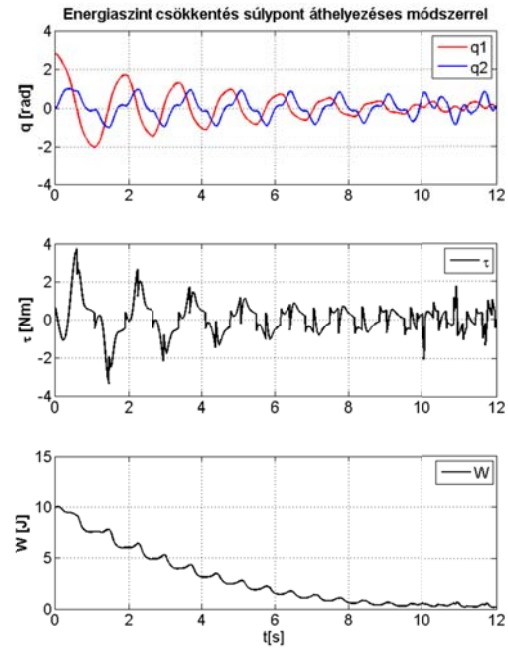
19. ábra PD és PFD+PD szabályozás összehasonlítása

A 20. ábra a súlypontáthelyezéssel való stratégia szimulációs eredményeit tartalmazza. A q_{2d}^* értéke 50° , a kezdeti szöghelyzetek: $q_1(0) = 40^\circ$, $q_2(0) = 0^\circ$, valamint kezdeti sebességek zérusak. Ábrázoltuk az általános koordináták változását, a τ hajtónyomatékokat, valamint az aktuális energiaszintet (kinetikus és potenciális energiát együttesen). A szimulációt addig futtattuk, amíg a brachiation robot összenergiája elegendővé nem válik a felfüggesztési pont körüli átforduláshoz.

A 21. ábrán a stratégia energiaszint csökkentésére való felhasználásának szimulációs eredményei láthatóak. A kezdeti feltétel ebben az esetben: $q_1(0) = 160^\circ$, $q_2(0) = 0^\circ$, valamint a kezdeti szögsebességek ugyancsak nullák.



20. ábra Energiaszint növelés súlypont áthelyezési módszerrel



21. ábra Energiaszint csökkentés súlypontáthelyezési módszerrel

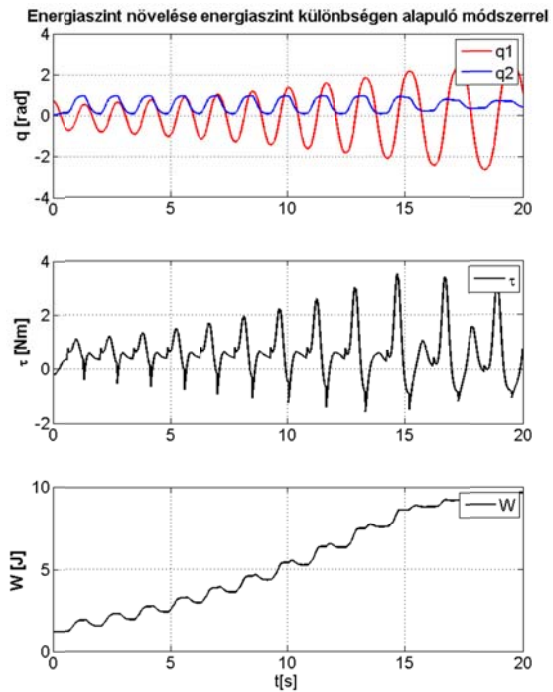
Az 20-21. ábrák alapján belátható, hogy a rendszer energiaszintjét gyorsan tudjuk növelni vagy csökkenteni a súlypont áthelyezési módszer segítségével. Mivel a célenergiaszint elérésekor a szögértékek nem egyeznek a megkívánt konfiguráció által definiálttal, alkalmazása nem célszerű, hiszen a megfelelő szögre való szabályzás, módosít a rendszer teljes energiaállapotán. A rendszer összenergiájának növelése nem elegendő a brachiation robot helyváltoztató mozgásának biztosításához. Az megkívánt energiaszint és konfiguráció együttes biztosítás szükséges.

Ehhez az alfejezethez tartozó MATLAB szimulációs fájlok a Függelék 10.4 pontjában megtalálhatóak.

6.3 Energiaszint alapú szabályozás

Ennél a szimulációnál a legnagyobb nehézséget a P, D és E paraméterek megfelelő megválasztása jelentette. Ezeket a változókat a szimulációk segítségével hangoltuk be. A 22. ábrán olyan szimuláció eredményei láthatóak, amikor $q_1(0) = 40^\circ$, $q_2(0) = 0^\circ$ kezdeti feltétellel, a felső egyensúlyi helyzetnek megfelelő előírt energiaszinttel beállított energiaszint alapú szabályozást alkalmazunk. Az így beállított szabályozással elérhető az acrobot felső egyensúlyi helyzet közelébe juttatása, ahol egy PD szabályozással akár egyensúlyozhatjuk is a rendszerünket.

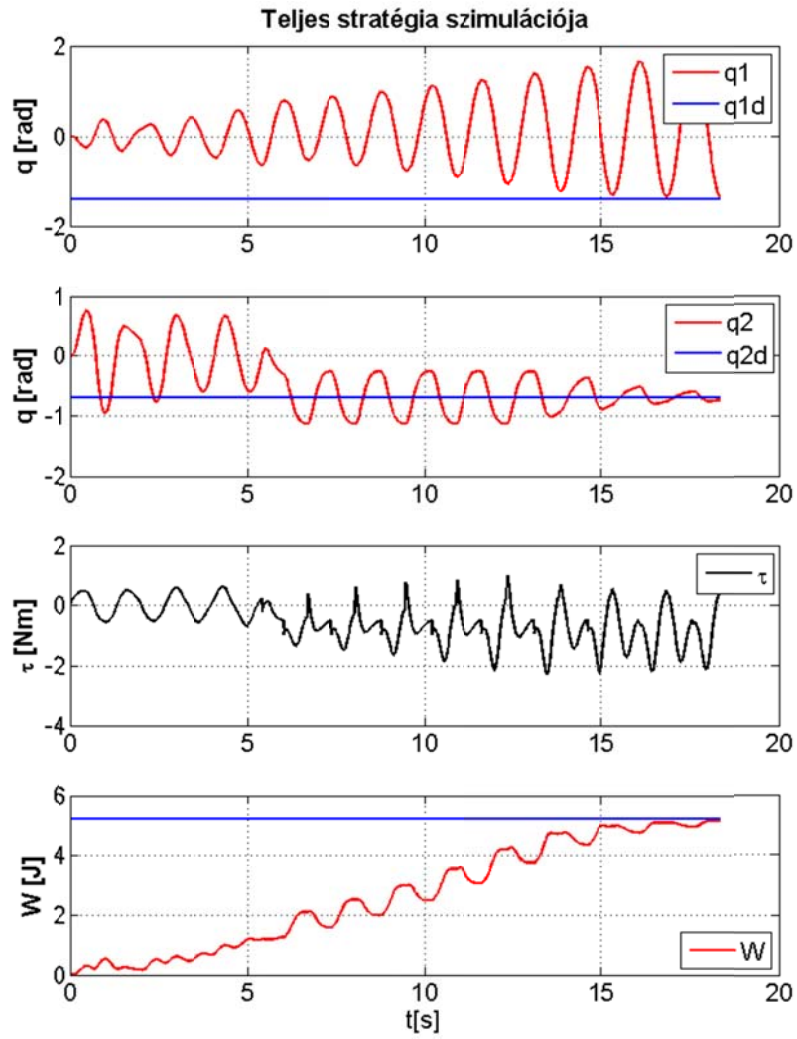
Ennek a módszernek az előnye, hogy úgy érjük el a célergiaszintet, hogy közben az előírt konfiguráció is biztosított



22. ábra Energiaszint alapú szabályozás

6.4 Teljes fellendülési stratégia

Az eddig bemutatott módszerek felhasználásával összeállítható egy olyan mozgásstratégia, amely segítségével adott kezdeti feltételekről indítva eljuttathatjuk a brachiation robot szabad karjának végpontját egy előre meghatározott célpontba. Ezt a stratégiát egy $\mathbf{q} = [40^\circ \ 0]^\top$ konfiguráció alapján definiált energiaszintig paraméteres gerjesztéssel, utána pedig energiaszint alapú szabályozással érjük el, amelynek a szabályozási energiaszintje a célergiaszint, valamint a q_{2d} szöge a célállapotnak megfelelő. A 23. ábrán az alsó egyensúlyi helyzetből elindított rendszer teljes fellendülési stratégiát megvalósító szimulációnak eredményei láthatóak. A célállapotot $\mathbf{q} = [-80^\circ \ -40^\circ]^\top$ -ban írtuk elő, amit 0,05 rad-os tűréssel tekintettük teljesítettnek. A szimuláció $t = 5,4$ [s]-nál vált a paraméteres gerjesztés energia szint alapú szabályozásra.



23. ábra Teljes mozgásstratégia

7 Kísérletek bemutatása

A következő fejezetben a megvalósított szerkezettel végzett méréseink eredményeit mutatjuk be. A Matlab szimulációk alapján, valós időben működő Simulink programokat készítettünk, kísérletekkel behangoltuk a szükséges konstansok értékét. A PWM kitöltési tényezőjét τ nyomatékkal arányosan egy kísérletezéssel kitapasztalt arányosító tényező segítségével állítjuk. A kapott eredményeket kiértékeljük.

A tesztek során 500[Hz]-es mintavételezési frekvenciával dolgoztunk. A választott frekvencia a Simulink RTW (Real-Time Windows target) soros-porti kommunikációt megvalósító blokkjának, alapértelmezett beállítások melletti, maximális értéke. A mintavételezési frekvencia szabályozásra gyakorolt hatását egyelőre nem vizsgáltuk. Az időbeni diszkretizáció miatti időkéés destabilizáló hatását, a rendszer sajátfrekvenciáihoz képest, magas mintavételezési frekvencia választásával igyekeztünk csökkenteni.

A mért pozíció adatok alapján digitális átlagoló szűrő segítségével számoltuk a szögsebességeket. Az átlagolás hossza, a mintavételezési frekvencia, valamint az encoder-ek felbontása egyértelműen meghatározzák a sebességérték legkisebb lépését, azaz térbeli felbontását, melynek egész számú többszörösei lesznek a számolt szögsebesség-értékek. Ez a lépés lesz a rendszerünkben definiálható sebességkvantum, mely a függesztett kar álló csukló körüli szögsebességére $0,262 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ -nak, valamint a függesztett kar és szabad kar között $0,341 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ -nak adódnak. A két érték a két különböző típusú encoder eltérő felbontásából adódik. Az alkalmazott egyszerű szűrés további időkéésést okoz, mely destabilizáló lehet, de lehetővé teszi a sebességkvantum értékének csökkentését.

A mérési összeállítás a 24. ábrán látható.



24. ábra A mérési összeállítás

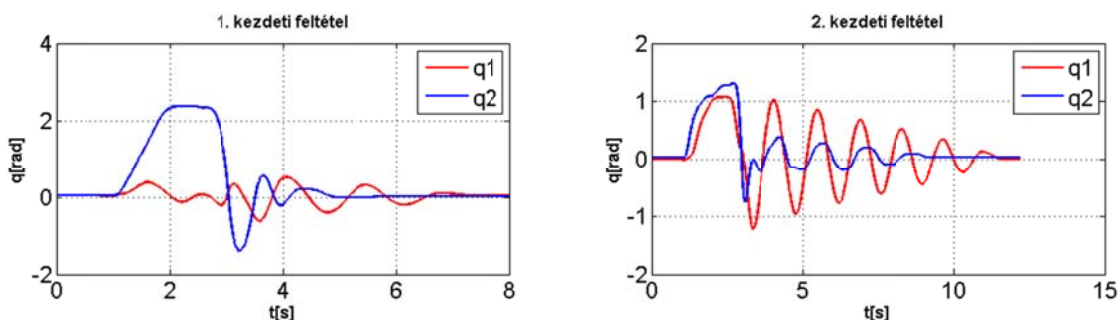
7.1 A motor csillapító hatásának kiküszöbölése

Amennyiben egy egyenáramú motor tengelyét megforgatjuk állandó szögsebességgel $U = 0$ kapocsfeszültség esetén, annak tengelyére a forgás irányával ellentétes nyomaték fog hatni, amely nyomaték statikus esetben a szögsebességgel arányos nagyságú. Az így keletkező ellennyomaték ennél fogva a rendszer dinamikájában csillapításként fog jelentkezni.

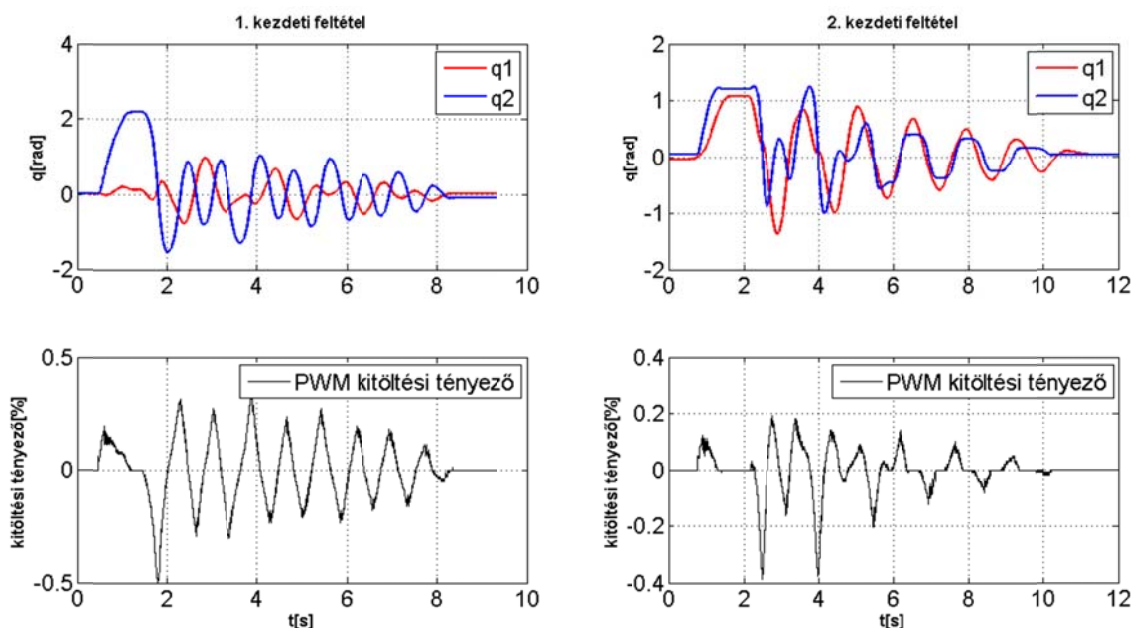
A hatás kiküszöbölésére a motor feszültségét, annak szögsebességével arányos pozitív taggal szabályoztuk. Így a kivezérelt negatív csillapítás és a motoron jelentkező valódi csillapítás egymás hatását kioltja.

A gyakorlati megvalósítás során a szabályzásban szereplő arányossági tagot mérések segítségével állítottuk be. A kísérletek során különböző konfigurációkat vizsgálva addig növeltük annak értékét, míg valamilyen üzemállapotban a rendszer gerjedését nem tapasztaltuk.

Méréseket végeztünk két különböző kezdeti konfigurációból, szabályzó nélkül (25. ábra), illetve annak alkalmazásával (26. ábra).



25. ábra A szabályzó nélküli rendszer lengései



26. ábra A rendszer lengései negatív csillapítás alkalmazásával

Az így kapott eredmények jól szemléltetik, hogy szabályzó nélküli esetben a q_2 -vel koordinátával jellemzett csukló lengései rövidebb idő alatt lecsengenek, mint annak alkalmazása esetén. A tapasztalható csillapodás oka ekkor a szabad kar végén elhelyezkedő elektromágnes és a vaslemez közötti száraz súrlódás.

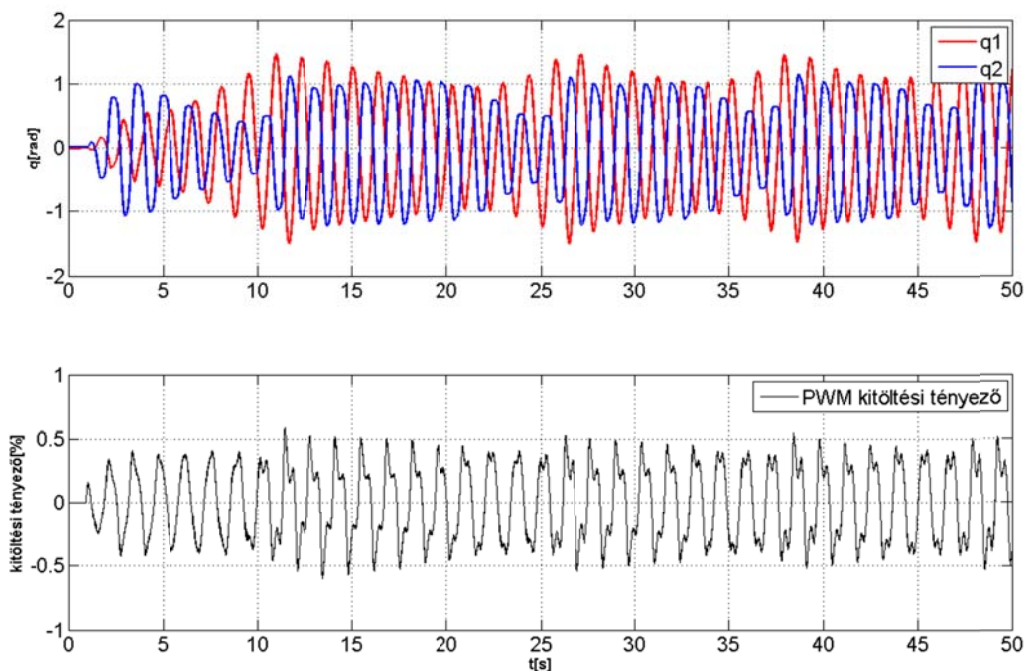
7.2 A paraméteres gerjesztés

A mozgás során a q_2 szögére előírt útgerjesztés megvalósulását a 27. ábra szemlélteti. Ez alapján elmondhatjuk, hogy a mozgás jelleghelyes, azonban a motor áttételének ketyogása, valamint a rendszer súrlódása torzult szinuszos jelet eredményez.

Megfigyelhető, hogy a mozgás első szakaszában, a q_1 szög maximális értéke nő, és nagysága megközelíti a szimulációkban kapottakat (15. ábra). Ezt követően a q_1 szög

grafikonjának burkológörbéje a szimulációkban kapottakhoz hasonló jelleget mutat, azonban értéke nem csökken le közel nullára. Emellett a változás periódusideje is eltér a szimulációtól.

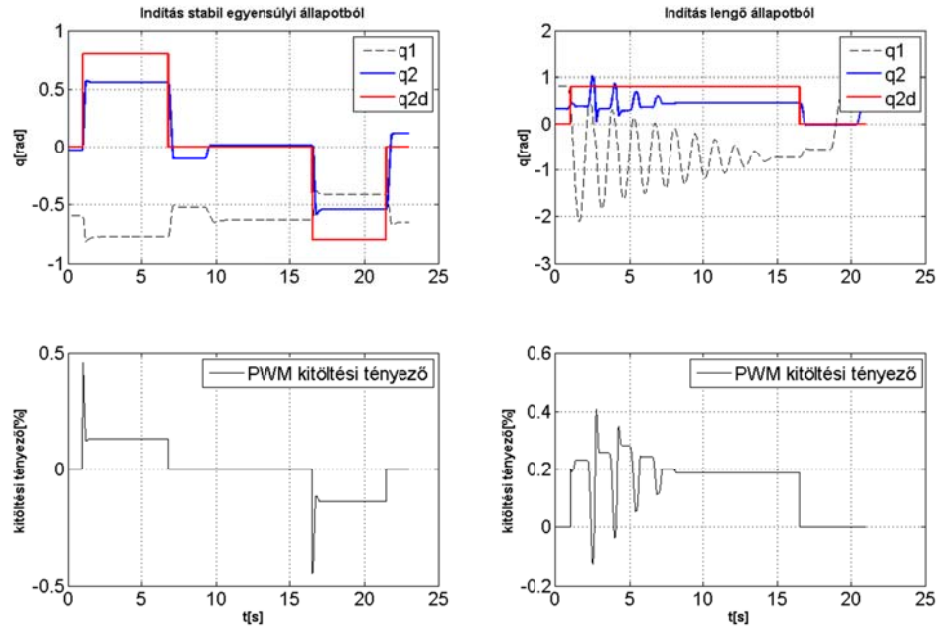
Ezeknek oka a megvalósuló útgerjesztés eltérése az előírttól, emellett szerepet játszik a sebesség jelen jelentkező zaj és a rendszer pontatlansága.



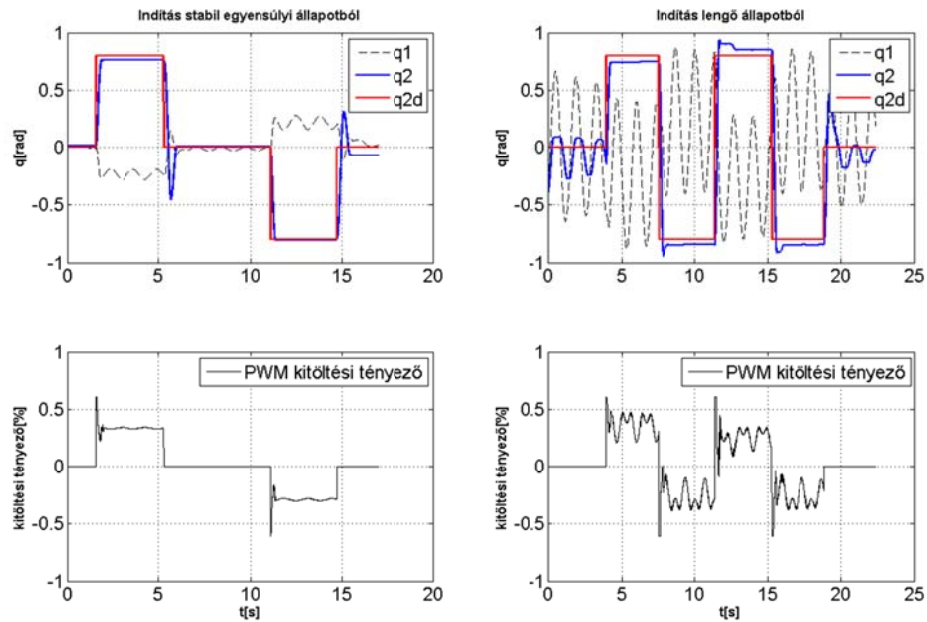
27. ábra Paraméteres gerjesztés

7.3 A relatív szöghelyzet szabályása

A szögszabályzás megvalósítására a 6.2-ben bemutatott két módszert, a PFL segítségével, illetve az a nélkül megvalósított PD szabályozás teszteltük. A mérések során stabil egyensúlyi helyzetéből, valamint szabadon lengő állapotból elindítva a szerkezetet, a szöghiba nagyságát, valamint a beállítás gyorsaságát vizsgáltuk. A mérési eredmények a 28. és 29. ábrákon láthatóak. Az ábrák alapján azokban az időpillanatokban, amikor q_{2d} értéke nulla, nem vezérlünk ki feszültséget a motorra.



28. ábra PD szabályzó



29. ábra Szög szabályzás PFL szabályzóval

Látható, hogy egyszerű PD szabályzás esetén statikus helyzetből indítva a rendszert a szöghiba jelentős, azonban értéke állandó. A jól behangolt P és D arányossági tagok hatására rendszer gyorsan beáll, a túllendülés mértéke kicsi. A másik kezdeti feltételről indítva a rendszert, nagy amplitúdójú lengések esetén, a szöghiba értéke változik.

A PFL szabályzó figyelembe veszi a gravitáció és a rendszer mozgásának hatásait, így a szöghiba nagysága, mint statikus, mind dinamikus esetben igen kis mértékű, nagysága állandó.

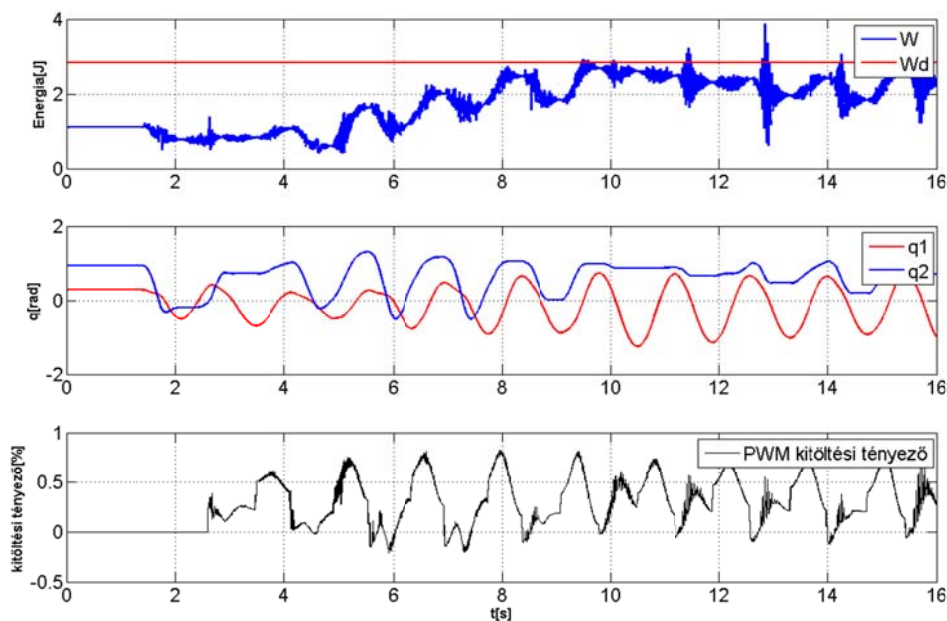
A két szögszabályzást összehasonlítva a PFL hatását jól szemlélteti a 28. valamint a 29. ábra kitöltési tényezőjét bemutató diagramm. Egyszerű PD szabályozás esetén, miután állandósult a szöghiba, a motorra vezérelt kitöltési tényező értéke nem változik. Ezzel szemben PFL alkalmazása mellett, a mozgásból valamint a gravitációból eredő dinamikai hatásokat a motor nyomatéka folyamatosan kompenzálja.

7.4 Energiaszint alapú szabályzás

A módszer alapját a megkívánt, valamint a mért energiaszint különbség alapú beavatkozás jelenti. A mintavételezett rendszer fentiekben leírt relatív nagy sebességkvantumai meglehetősen zajos számított energiaértéket eredményeznek, hiszen annak értéke erősen függ a $\dot{q}_1$, valamint a $\dot{q}_2$ szögsebességektől.

A mérések során kapott eredményeket a 30. ábra szemlélteti. A rendszer energiaszint változásának jellege a szimulációs eredményeknek megfelelően alakul, azonban a megkívánt szint megközelítése után legtöbb esetben a megkívánt érték alatt marad. Az energiaszintben megjelenő hirtelen tüskék a szögsebesség mérésének zajosságából származnak.

A mért és szimulált energiaszint változásoknak jellegbeli különbsége a szimulációk során figyelmen kívül hagyott súrlódásból származhatnak. A valódi rendszerben jelen levő száraz súrlódásnak jelentős hatása van, melyek teljesítménye, minden esetben a rendszer összenergiáját csökkenti.

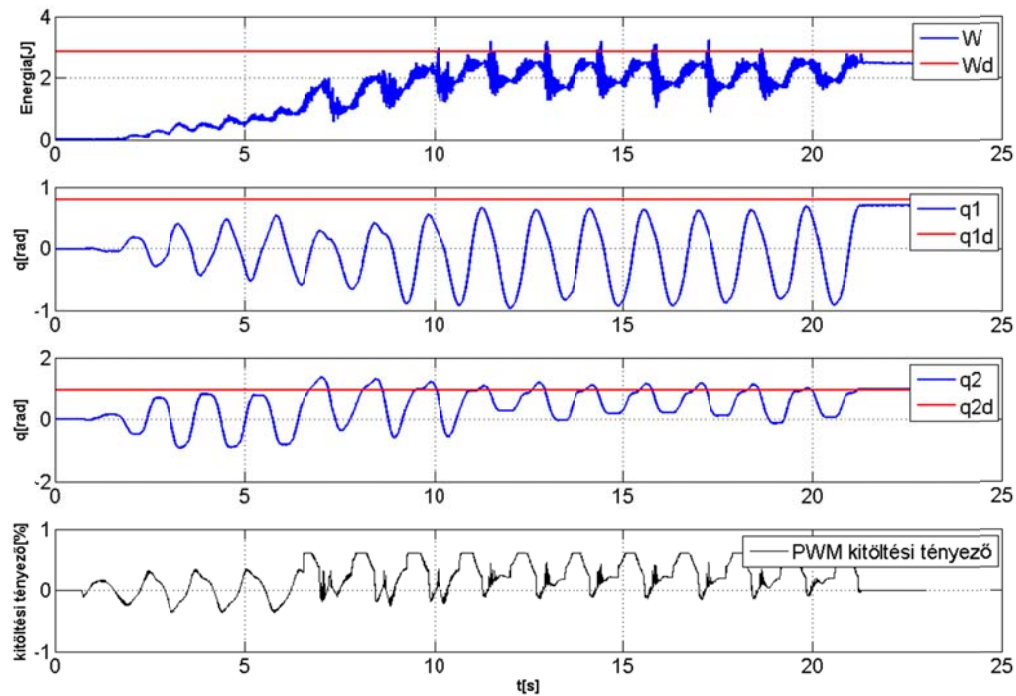


30. ábra Energiaszint alapú szabályzás

7.5 A teljes fellendülési stratégia

A fenti eredmények, valamint a kísérletileg behangolt szabályozási paraméterek segítségével létrehoztunk egy teljes fellendülési stratégiát. Amennyiben a robot szabad vége egy előre definiált tűréssel megközelíti a célállapotot, az elektromágnes működésbe jön, a robot átfog a megfelelő pontba. Az energiaszint alapú szabályozás mérési eredményei alapján ezt a tűrést mindkét szögre $\pm 0,1$ [rad] értékben határoztuk meg.

Az így összeállított mérés eredményeit a 31. ábra szemlélteti.



31. ábra Teljes fellendülési stratégia

8 Összefoglalás

Dolgozatunkban bemutattuk egy alulaktuált helyváltoztató robot tervezésének menetét. Többféle mozgásstratégiát készítettünk, melyek működését a kész szerkezet adatai alapján szimulációkkal, majd mérésekkel igazoltuk. A teljes fellendülési stratégia segítségével megvalósítható a feladat megfogalmazásában szereplő célunk, a robot helyváltoztató mozgása.

A célunk megvalósítása során törekedtünk minél gyorsabb mozgás létrehozására, azonban a szabályzások tovább optimalizálhatóak megfelelőbb szabályzási paraméterek megválasztásával, a szabályzók finomításával. Ennek egyik útja lehet a szimulációk továbbfejlesztése, például a súrlódások, vagy a motor és az áttétel forgó alkatrészeinek figyelembevételével. A megvalósított rendszer azonban térben és időben kvantált digitális szabályzással működik, így a digitális hatások instabil működést eredményezhetnek. Ezeket szintén figyelembe vehetjük szimulációk segítségével, avagy analitikus és fél analitikus utakon levezetett stabilitási térképek segítségével.

A megépített brachiation robot alkalmas további szabályzástechnikai problémák vizsgálatára. A szerkezet használható instabil egyensúlyi helyzet körüli szabályozás, valamint teljes fellendülés idő és sebesség optimalizált módszereinek gyakorlatban való megvalósítására. Vizsgálhatóak a digitális szabályzás, instabilizáló hatásai, valamint a mikrokáosz jelensége.

9 Irodalomjegyzék

- F. Saito, T. Fukuda és F. Arai, „Swing and Locomotion Control for a Two-Link Brachiation Robot,” *1994IEEE*, February 1994.
- T. Geissmann, „The Gibbons (Hylotidae): Az Introduction - 5. Locomotion,” [Online]. Available: http://www.gibbons.de/main/introduction/chapter_english05.html. [Hozzáférés dátuma: 20 10 2013].
- H. Robotics, „Honda Robotics Unveils Next-Generation ASIMO Robot,” [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/honda-robotics-unveils-next-generation-asimo-robot>. [Hozzáférés dátuma: 22 10 2013].
- M. Vukobratovic, „Zero-Moment Point — thirty five years of its life,” [4] *International Journal of Humanoid Robotics*, %1. kötetVol.1 No. 1, p. 17, 2004.
- R. Tedrake, „MIT Open Courseware - Underactuated robotics - Lecture I Introduction,” MIT, [Online]. Available: <http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-832-underactuated-robotics-spring-2009/video-lectures/lecture-1-introduction/>. [Hozzáférés dátuma: 20 10 2013].
- „The Cornell passive dynamic walker,” [Online]. Available: [6] <http://www.eucognition.org/index.php?page=passive-dynamic-walkers>. [Hozzáférés dátuma: 22 10 2013].
- R. Tedrake, „Fully Actuated vs. Underactuated Systems,” 2008. [Online]. [7] Available: http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-832-underactuated-robotics-spring-2009/readings/MIT6_832s09_read_ch01.pdf. [Hozzáférés dátuma: 22 10 2013].
- M. W. Spong, „The swing up control problem for Acrobot,” *1995IEEE*, [8] February 1995.
- M. N. a. A. M. Seyyed Mohammad Hosseini Lavasani, "Minimum Control Effort Trajectory Planning and Tracking Control for Brachiation Robot," [Online]. Available: http://www.expo21xx.com/automation21xx/15799_st2_university/. [Accessed 22 10 2013].
- T. . A. Mokhiemer, „How to pump a swing,” [10] <http://staff.kfupm.edu.sa/phys/tahmed/How%20to%20pump%20a%20swing.pdf>.

M. W. Spong, „Energy based control of a class of
[11] underactuated”.*Spong_IFAC96*.

J. G. d. Jalón és E. Bayo, Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody
[12] Systems - ISBN 0-387-94096-0.

G. Dr. Csernák és G. Dr. Stépán, „A műszaki rezgés tan alapjai,” 2012. [Online].
[13] Available:

http://www.mm.bme.hu/targyak/bsc/rezgtan/downloads/muszaki_rezgestan_bmarks.pdf
. [Hozzáférés dátuma: 22 10 2012].

N. Minoesky, „Parametric Excitation,” *Journal of Applied Physics*, pp. Volume
[14] 22, Number 1, 1951, January.

R. Tedrake, Underactuated Robotics, 2009.
[15]

10 Függelék

A függelékeket nagy terjedelmük miatt CD mellékletben csatoljuk a dokumentumhoz. Az alábbiakban a CD melléklet Függelék mappájában található dokumentációkat azonosítjuk be. A dokumentációkon kívül a CD-n megtalálható a PIC program, a Mathematica szimulációs fájl, MATLAB szimulációs fájlok, Inventor modellek valamint felhasznált eszközök adatlapjai.

- 10.1 Műszaki rajzok**
- 10.2 Mathematica brachiation**
- 10.3 MATLAB - Partial Feedback Linearization**
- 10.4 MATLAB – Súlypontáthelyezési módszerhez tartozó szimulációk**
- 10.5 MATLAB – Energiaszint alapú szabályozás**
- 10.6 MATLAB – Teljes fellendülési stratégia**
- 10.7 PIC program**
- 10.8 Simulink – Motor hatását kiküszöbölő szabályozás**
- 10.9 Simulink – PD szabályozás PFL nélkül**
- 10.10 Simulink – Energiaszint alapú szabályozás**
- 10.11 Simulink – Paraméteres gerjesztés**
- 10.12 Simulink – Teljes fellendülési stratégia**
- 10.13 Alkatrészeczek adatai**

11 Ábrajegyzék

1. ábra Brachiation mozgás [2]	4
2. ábra ASIMO [3]	6
3. ábra Passzív járórobot [6]	6
4. ábra Az Acrobat [15]	7
5. ábra Brachiation robot mozgás közben [9]	7
6. ábra Brachiation	10
7. ábra Súlypont áthelyezéssel szemléltetése.....	14
8. ábra A karos megfogó mechanizmus	17
9. ábra A CERDA robot [9]	17
10. ábra Megoldási elvek kombinálása	20
11. ábra A brachiation robot modellje.....	22
12. ábra A megépített brachiation	23
13. ábra Elektronika szemléltetése.....	25
14. ábra A felhasznált elektronika.....	26
15. ábra Mathematica szimuláció eredményei paraméteres gerjesztésre.....	30
16. ábra q_2 állandó értéken tartása	31
17. ábra q_2 állandó értéken tartása	32
18. ábra q_2 állandó értéken tartása	32
19. ábra PD és PFD+PD szabályozás összehasonlítása	33
20. ábra Energiaszint növelés súlypont áthelyezéssel	34
21. ábra Energiaszint csökkentés súlypontáthelyezéssel.....	34
22. ábra Energiaszint alapú szabályozás	35
23. ábra Teljes mozgásstratégia	36
24. ábra A mérési összeállítás	38
25. ábra A szabályzó nélküli rendszer lengései	39
26. ábra A rendszer lengései negatív csillapítás alkalmazásával	39
27. ábra Paraméteres gerjesztés	40
28. ábra PD szabályzó	41
29. ábra Szögnyomat szabályozás PFL szabályzóval	41
30. ábra Energiaszint alapú szabályozás	43
31. ábra Teljes fellendülési stratégia.....	44