

Instabil pozícióra szabályzás fuzzy logika használatával

Menich Péter

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, 1034 Budapest Bécsi út 96/b. Magyarország email: peter.menich@gmail.com

Dr. Kopják József

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, 1034 Budapest Bécsi út 96/b. Magyarország email: kopjak.jozsef@kvk.uni-obuda.hu

A cikk a Golyó a keréken (Ball On the Wheel) instabil pozícióra szabályzás problémájának megoldásával foglalkozik. A cikk bemutatja a probléma megoldására választott fuzzy logikán alapú szabályzó rendszert tervezését és megvalósítását. A feladat egy szabadon gördülő golyó egyensúlyozása egy hajtott kerék tetején, melynek nehézségét az adja, hogy a forgó golyó miatt a szabályzásnak végtelen sok egyensúlyi pontja van, azaz a kerék, és ezen keresztül a golyó minden állandó szögsebességéhez tartozik egy ilyen pont. A cél egy egyszerű és olcsó szabályzó megvalósítása volt, ezért esett a választás a fuzzy logikára és egy dsPIC mikrokontrollerre. A kerék egy BLDC motorral ellátott elektromos kerékpár kereke, melynek beépített HALL jeladói szolgáltatnak a kommutációhoz, illetve a fordulatszámhoz információval. A vezérlő panel X2C development board dsPIC33EP256MC502 mikrokontrollerrel. A felépített matematika modell alapján a szabályzót Scilab Xcos használatával ellenőriztük, majd implementáltuk és teszteltük a megvalósított hardveren. Az így elkészített rendszer jól használható az oktatásban is, mind a motor hajtás, mind fuzzy logika bemutatására.

Kulcsszavak: fuzzy logic; unstable position control; ball on the wheel; microcontroller; scilab/xcos

1 Bevezetés

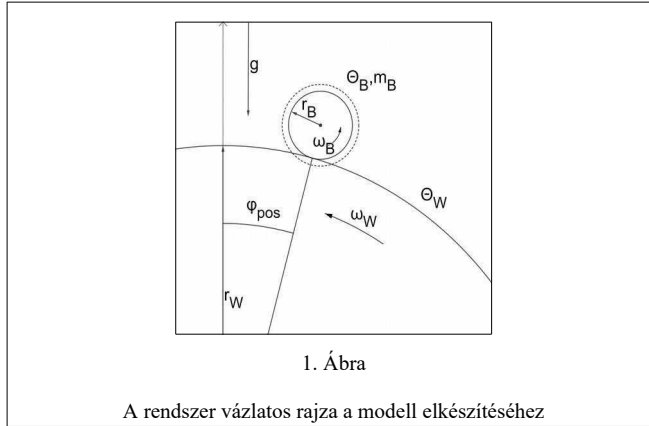
A cikk mikrokontrolleres instabil pozícióra szabályzás megvalósítását mutatja be fuzzy szabályzó használatával. A felépített matematikai modell csupán szimulációhoz, a szabályzásban rejlő lehetőségek vizsgálatához és nem a szabályzó megvalósításához készült. Arra voltunk kíváncsiak, hogy egy beágyazott rendszerben könnyen implementálható, egyszerű fuzzy szabályzó

hogyan birkózik meg a golyó a keréken (ball on the wheel) feladat szabályzásával. Itt a klasszikus fordított inga feladattal szemben a problémát az jelenti, hogy ha a gördülési ellenállástól eltekintünk, akkor nem egy, hanem végtelenül sok egyensúlyi pozíciója van a rendszernek, hiszen a felső holtpontra nem csak álló, hanem tetszőleges sebességgel forgó állapotban is meg lehet tartani a golyót.

2 Matematikai modell

A megvalósított fizikai modell paramétereit használtuk fel a matematikai modell változóinak beállításához mint például a golyó tömege, sugara, tehetetlenségi nyomatéka, kerék tehetetlenségi nyomatéka stb.

A rendszer sematikus modelljét mutatja a 1. ábra.



2.1 Lagrange formula

A formula felírásához szükséges a rendszer helyzeti és mozgási energiájának felírása. $L = T + U$ (1)

Mozgási energia:

$$T = T_w + T_B = \frac{1}{2} \Theta_w \omega_w^2 + \frac{1}{2} \Theta_B \omega_B^2 + \frac{1}{2} m_B ((r_w + r_B) \dot{\phi}_{pos})^2 \quad (2)$$

átírva ϕ_{pos} és ϕ_w paraméterekre:

$$T = \frac{1}{2} \Theta_w \dot{\phi}_w^2 + \frac{1}{2} \Theta_B \left(\frac{r_w}{r_B} (\dot{\phi}_{pos} - \dot{\phi}_w) \right)^2 + \frac{1}{2} m_B ((r_w + r_B) \dot{\phi}_{pos})^2 \quad (3)$$

Helyzeti energia:

$$U = m_B g (r_B + r_w) \cos(\phi_{pos}) \quad (4)$$

Veszteségek

$$Q_M = \frac{K_M (U_a - K_U \dot{\phi}_w)}{R_a} \quad (5)$$

$$Q_w = K_{w1} \cdot \text{sign}(\dot{\phi}_w) + K_{w2} \cdot \dot{\phi}_w \quad (6)$$

$$Q_B = K_{B1} \cdot \text{sign}(\dot{\phi}_{pos} - \dot{\phi}_w) + K_{B2} \cdot \dot{\phi}_w \quad (7)$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q_M - Q_w + Q_B \\ -Q_B \end{bmatrix} \quad (8)$$

Lagrange egyenlet

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \Theta_w + \Theta_B \frac{r_w^2}{r_B^2} & -\Theta_B \frac{r_w^2}{r_B^2} \\ -\Theta_B \frac{r_w^2}{r_B^2} & \Theta_B \frac{r_w^2}{r_B^2} + m_B (r_w + r_B)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_w \\ \ddot{\phi}_{pos} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ m_B g (r_B + r_w) \sin(\phi_{pos}) \end{bmatrix} = Q \quad (10)$$

Ezek alapján felírhatók a ϕ_{pos} és ϕ_w második deriváltjai a

$\sin(\phi_{pos}), \text{sign}(\dot{\phi}_{pos} - \dot{\phi}_w), \dot{\phi}_w, \text{sign}(\dot{\phi}_w), U_a$ segítségével.

Behelyettesítve Táblázat 1 értékeit:

$$A = \begin{bmatrix} 22,84 & -17,94 & -0,17 & -0,00235 & 7,115 \\ 0,6 & -56,34 & 0,01 & -0,00738 & 22,375 \end{bmatrix} \quad (11)$$

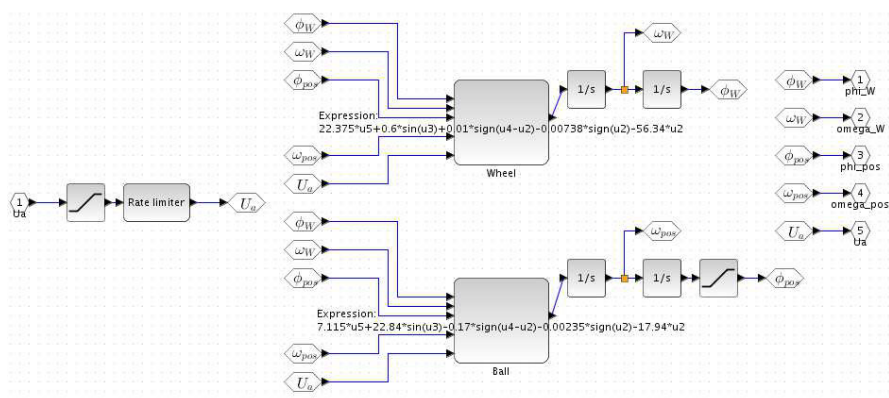
$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi}_{pos} \\ \ddot{\phi}_W \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} \sin(\phi_{pos}) \\ \dot{\phi}_W \\ \text{sign}(\dot{\phi}_{pos} - \dot{\phi}_W) \\ \text{sign}(\dot{\phi}_W) \\ U_a \end{bmatrix} \quad (12)$$

Táblázat 1

A rendszer fizikai paramétereit (forrás [6] és saját mérés)

Jelölés	Érték	M.egység	Jelölés	Érték	M.egység
Θ_W	0,30618	kg·m ²	r_W	0,27	m
Θ_B	0.0000731	kg·m ²	r_B	0,0254	m
m_B	0,203	kg	R_a	0,300	Ω
K_M	2,093	V·s/rad	K_U	2,518	N·m/A
K_{W1}	0,0023	N·m	K_{B1}	0,045	N·m
K_{W2}	0,0003	N·m·s	K_{B2}	0,005	N·m·s

Ezt a nemlineáris modellt alkottuk meg Xcos-ban, hogy megvizsgáljuk, hogyan viselkedik a rendszer különböző fuzzy szabályzó paraméterek használatakor.



2. Ábra

Nemlineáris rendszer modellje

A modellt egy superblokkban hoztuk létre, és minden paramétert kiveztünk a kimenetekre.

3 A fizikai modell



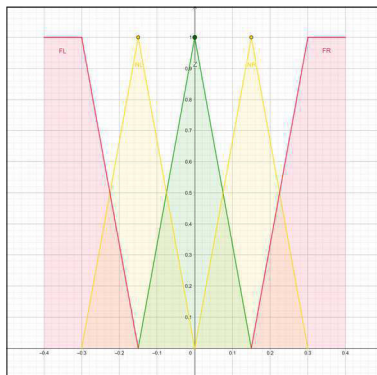
3. Ábra

A megvalósított golyó a keréken (Ball On the Wheel) rendszer

A megvalósított eszköz egy elektromos kerékpár kereke, ami egy három HALL szenzorral ellátott BLDC motort tartalmaz. A golyó a felnin gurul, ami a tapadás biztosítása érdekében gumival lett bevonva. A kereket egy acél váz tartja, amin az irányváltások okozta ütések csökkentése érdekében rezgéscsillapítót alakítottunk ki. A golyó pozíciójának mérésére egy BALLUFF BOD 21M-LA04-S92 lézeres távolságmérőt használunk. A BLDC meghajtó áramkör egy Microchip MCLV fejlesztőkártya, míg a vezérlés egy X2C fejlesztőkártyával van megvalósítva.

4 Fuzzy szabályzó

A fuzzy szabályzó használatánál a mikrokontrolleres alkalmazás miatt a lehető legegyszerűbb megvalósításra törekedtünk, ezért a tagsági függvények csak háromszög és trapéz formát vehettek fel. A trapéz speciális eseteként, de a végtelen meredekség elkerülése érdekében a széleken alkalmazott jobb és baloldali teljes kitöltésű tagsági függvény külön került implementálásra (l. 4. Ábra).

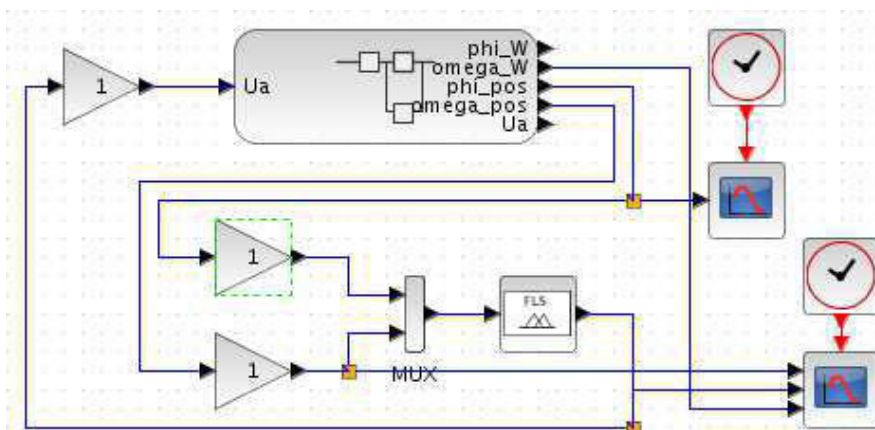


4. Ábra

A pozíció szögéhez (φ_{pos}) tartozó fuzzy tagsági függvény alapkonfigurációja

A végleges szabályzó 2 bemeneti és egy kimeneti értékkel rendelkezik. Bemenetként a lézer távmérő távolság jelét mint a golyó pozíciójának a szögét, és annak két mérés közti változását, mint a pozíció szögsebességét használja. A kimenet jel az U_a kapocsfeszültség, amelyet PWM segítségével állít elő, azaz a kimenetre megfelelő kitöltési tényezőjű négyszögjelet ad. A kommutáció a HALL szenzorok jelei alapján történik.

A teszteléshez a Scilabhoz letölthető SciFLT fuzzy toolboxot használtuk. Arra kerestük a választ, hogy képes-e valamilyen nagyon egyszerű konfigurációjú fuzzy szabályzó a feladat megoldására.



5. Ábra

Fuzzy szabályzó kör

4.1 Golyó megtartása a holtponton

Ahhoz, hogy a golyó a holtponton megmaradjon, a szabályzónak képesnek kell lenni korrigálni annak pozícióját. Mivel a rendszernek végtelen egyensúlyi helyzete van, azaz a holtponton a golyó úgy is tartózkodhat, hogy közben állandó szögsebességgel pörög (valójában ebben a esetben a gördülési veszteség miatt kicsit a holtponton túl, hogy a nehézségi erő által okozott gyorsulás ellensúlyozza a veszteség okozta lassulást). Lehetséges ilyen szabályzó építése is [3], de mi most a hangsúlyt az egyszerű, kis számítási kapacitást igénylő, az álló golyó megtartására képes fuzzy szabályzó megvalósítását tűztük ki célul. Feltettük azt, hogy a golyó impulzusmomentuma a holtponton, vagy annak közelében csekély, azaz valamilyen módszerrel sikerült már feljuttatni a kerék tetejére úgy, hogy csak „kicsit” pörögjön. A modellben azt vizsgáltuk, hogy

- a) Melyek azok a minimálisan szükséges bemenő paraméterek, amelyekkel a feladat megoldható?
- b) Milyen kimenő paraméterekkel oldjuk meg a feladatot?
- c) Kis szögeltérés esetén, hogyan képes a szabályzó a korrigálásra?
- d) A holtponton kis laterális sebesség esetén (álló kerék, pörgő golyó) hogyan képes szabályozni.

4.1.1 Bemenő paraméterek

A megépített fizika rendszer a következő paraméterek mérésére alkalmas:

- Golyó pozíciójának mérése (ϕ_{pos}) lézer távolságmérő segítségével. Valójában ez, ha a golyó görbületétől eltekintünk, a golyó pozíció szögének szinuszával arányos értéket mér, de kis szögeknél $\sin \alpha \approx \alpha$.
- A kerék szögsebességének mérése (ω_w) a BLDC motor jeladóinak segítségével. Sajnos az abszolút pozíció (ϕ_w) nem mérhető és a relatív is csak kb. 2,6° pontossággal (46 állandó mágnes 3 jeladó). Ha pontos pozíciót, szögsebességet szeretnénk, akkor modellt kell készítenünk hozzá. Pontos pozíciót a HALL jeladók jelei jelentik. Köztük a kiadott U_a és a visszamért áram alapján becsülhető lenne a motor pozíciója és szögsebessége, így újabb szenzor nélkül lehetne ezekkel a paraméterekkel is dolgozni. Mivel mi a legegyszerűbb megvalósításra törekedtünk, így ezekkel nem számoltunk.
- Nyomaték becslés az áramfelvételtől.

A szabályzás szempontjából felhasználható, számítható mennyiségek:

- Golyó pozíciójának szögsebessége (ω_{pos}), ami a pozíció két mérésének különbségéből és a mérések közti időből számítható.
- A golyó forgásának szögsebessége az $\frac{r_w}{r_B}(\omega_{pos} - \omega_w)$ (13)

képletből számolható, ahol r_w a kerék és r_B a golyó sugara. A pontosságot főleg az ω_w értékének hibája határozza meg. Nagyon hasznos lehet a szabályzás szempontjából, hiszen ha a golyó „jó” irányba pörög, azaz felfelé szeretne gurulni a nehézségi gyorsulással szemben, akkor a mozgási energiája

$$h = \frac{1}{2} \Theta_w \frac{1}{m_B \cdot g} \omega_B^2 = c \cdot \omega_w^2 \quad (14)$$

magasság megtételére elég. A képletbe h helyére behelyettesítve a holtponthoz tartozó magasságot $(r_w + r_b)(1 - \cos(\phi_{pos}))$ (15)

megkapjuk azt, hogy álló keréknél mekkora az a golyó szögsebesség, amellyel felgurul a holtpontra.

$$1 - \cos(\phi_{pos}) = 2 \sin^2\left(\frac{\phi_{pos}}{2}\right) = c_2 \cdot \omega_{whp}^2 \quad (16)$$

a $\sin \alpha \approx \alpha$ közelítéssel $\phi_{pos}^2 \approx c_3 \cdot \omega_{whp}^2$ tehát $\phi_{pos} \propto \omega_{whp}$ amivel korrigálható a szabályzás.

Elsődlegesen a két legegyszerűbben felhasználható paramétert a ϕ_{pos} és ω_{pos} paramétereket használtuk fel, hiszen a cél a számítási szükséglet minimalizálása volt, a legegyszerűbb szabályzást szerettük volna megvalósítani. Mivel ez már kielégítő eredményt adott, így a többi kipróbálására nem került sor.

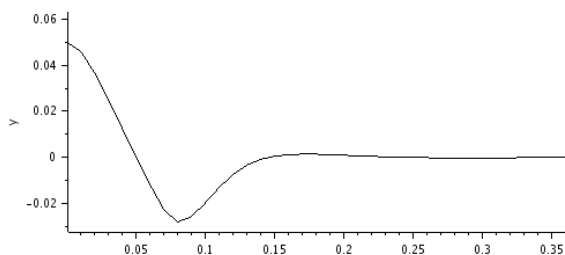
4.1.2 Kimenő paraméter

A fuzzy szabályzó kimenő paramétereként a kapocsfeszültség természetes módon adódik. A megvalósításban ezt használtuk fel.

Mivel a golyó mozgására a kerék gyorsulásával tudunk hatni, így a gyorsulás lenne az igazán jó kimenő jel, viszont ebbe csak közvetve tudunk beavatkozni, így szükséges lenne egy újabb szabályzó kör, ami a kerékgyorsulást állítaná a kívánt értékre az U_a és a visszamért áramjel segítségével. Az egyszerűsége való törekvés miatt esetünkben így ezt nem vettük számításba.

4.1.3 Kis szögeltérés korrekciója

Kis szögeltérés esetén a szimuláció szerint kb. 3° eltérés esetén még képes volt a rendszer korrigálni.

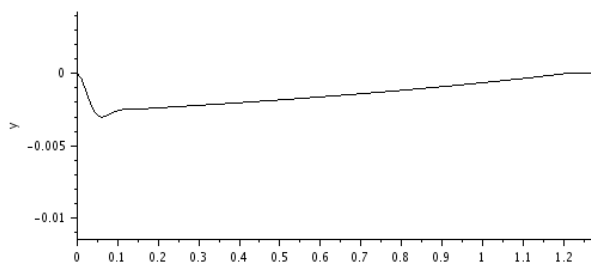


6. Ábra

Korrekcio 0,05 radián eltérésű kezdőpozícióval

4.1.4 Kis laterális sebesség korrekciója

A szögeltéréshez hasonló módon kerestük azt, hogy milyen laterális sebességet képes a rendszer kompenzálni. A modell azt mutatta, hogy kb. 0,135 m/s sebességet tud a rendszer kezelni.



7. Ábra

Golyó pozíciójának változása 0,5 rad/s kerék kezdősebesség esetén

4.2 A golyó felvitele a holtpontra

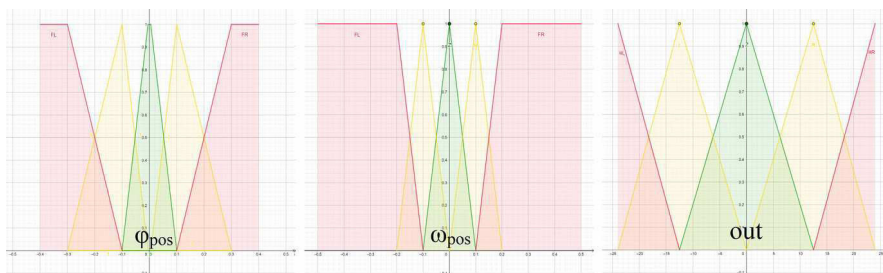
Mivel a szabályzó már jól kezelte a golyó holtponton tartását, már „csak” az odajuttatást kellett megoldani. Mivel a szabályzó a holtponton 0 körüli sebességet feltételez, azaz a golyó nem foroghat, ezért úgy kell feljuttatni, hogy a holtponton „megálljon”. Erre két lehetőség van.

Az egyik, hogy az ütközőkön a golyót annyira felpörgetjük, hogy a kereket megállítva a mozgási energiája elég legyen arra, hogy feljusson a holtpontra és ott megálljon. A szabályzás az holtponton álló golyónál indul.

A másik lehetőség, hogy az ütközőn csak annyira pörgetjük fel a golyót, hogy a kerék ellentétes irányú forgása a holtpontig a golyót megállítsa. Ekkor a megfelelő felpörgetés után azonnal indulhat a szabályzás, hiszen az a golyót már a szabályzó juttatja fel. Ez utóbbinak több előnye van a másik megoldással szemben. Egyrésről a szabályzás a felpörgetés után azonnal indul, nincs szükség arra, hogy megvárjuk a holtpont elérését. A másik az, hogy maga a felvitel a szabályzóval sokkal kontrolláltabb, nem csak a kezdeti feltételektől függ, hiszen a szabályzó folyamatosan figyeli a golyó pozícióját és annak sebességét, így be tud avatkozni a folyamatba, kevésbé érzékeny a rendszer a kezdeti feltételekre. Ez utóbbi megoldás került implementálásra a fizikai rendszerben.

4.3 A megvalósított szabályzó

Az implementált szabályzó nem sokban változott a kiinduló állapothoz képest. A pozíció tagsági függvény közepén trapéz lett, hogy a holtponton nyugalomban legyen a rendszer, ugyanis a fizikai modell tetején kb. 1mm-es sávban a golyó megáll, valamint kicsit eltolódtak a tagsági függvények pontjai.



8. Ábra

Megvalósított fuzzy szabályzó tagsági függvényei

A szabályrendszer megalkotásánál a természetes, magától értetődő szabályokat alkalmaztunk. A két paraméter, azaz a pozíció és a pozíció szögsebesség tagsági függvényei szerepelnek mint bemenő adatok, logikai ÉS kapcsolattal összekötve. A szabályokhoz tartozó kimenő U_a kapocsfeszültség tagsági függvénye az alábbi táblázat értéke.

Táblázat 2
A szabályrendszer

POS/ ω_p	FL	L	S	R	FR
VL	HR	HR	HR	R	Z
L	HR	HR	R	Z	L
C	HR	R	Z	L	HL
R	R	Z	L	HL	HL
VR	Z	L	HL	HL	HL

POS: VL – Very Left, L – Left, C – Center, R – Right, VR – Very Right

ω_p : FL – Fast Left, L- Left, S -Stop, R – Right, FR – Fast right

U_a: HL – High Left, L – Left, Z – Zero, R – Right, HR – High Right

Következtetések

A megalkotott szimulációs modell megmutatta, hogy segítségével be lehet állítani a fizikai modell szabályozójának paramétereit. Sikertült egy nagyon egyszerű fuzzy szabályzóval megoldani a golyó a keréken problémát. Ezen felül megfelelő kiindulási feltételek esetén a megépített eszköz alkalmas arra is, hogy a golyót felvigye a felső holtpontra, úgy, hogy ott képes megtartani.

Az így elkészült hardver és szoftver az oktatásban is jól használható. Egyrésztől bemutatható vele az instabil rendszer, valamint a hasonló rendszerek szabályozási problémái, másrésztől a fuzzy szabályzás és a BLDC hajtás demonstrálására is alkalmas.

Az eszközben a továbbfejlesztés lehetősége is megvan. A jelenlegi megoldás stabilan fenntartja a golyót még kis mértékű zavaró hatások ellenére is. Más bemeneti jelek választásával, esetleg a szabályzó input paramétereinek számának növelésével vagy más jellegű tagsági függvények használatával a zavartűrést tovább lehetne szélesíteni.

A fejlesztés során felmerült, hogy komplexebb fuzzy szabályzó segítségével esetleg megoldható lenne a golyót adott szögsebességen tartani a felső holtpontra. Ehhez biztosan nem elegendő a most használt bemeneti paraméterek, tehát legalább a kerék forgásának szögsebessége is szükséges. Megvizsgálandó, hogy a korábban leírt módszerrel elérhető-e a megfelelő pontosság, vagy kiegészítő jeladó felszerelése szükséges.

Köszönetnyilvánítás

A fejlesztési munkát az Óbudai Egyetem támogatta. Köszönjük, hogy a fizikai modellt a rendelkezésünkre bocsátotta. Továbbá szeretnénk köszönetet mondani Kasovitz Artúrnak és Dobány Imrének az előzőleg elvégzett munkáért és mérésekért, amelyek megkönnyítették munkánkat, továbbá szeretnénk köszönetet mondani Gyimesi Máténak, aki az X2C és MCLV kártyák illesztését megvalósította,

Irodalomjegyzék

- [1] E.H. Mamdani, S. Assilian, International Journal of Man-Machine Studies 7 (1975) pp. 1-13
- [2] Ming-tzu Ho, Yi-wei Tu, Hao-shuan Lin IEEE Control Systems Magazine 29 (2009) pp. 93-101
- [3] Sven-Olaf Lindert, Christian Höfler, Kurt Schlachere e & i Elektrotechnik und Informationstechnik 135 (2018) pp. 286-293
- [4] R.W. van Gils, „Control of the Ball on the Wheel System,” Technische Universiteit Eindhoven (2007)
- [5] Miasa, Samer & Al-Mjali, Mohammad & Ibrahim, Anas & Tutunji, Tarek. (2010). „Fuzzy control of a two-wheel balancing robot using DSPIC.” 7th International Multi-Conference on Systems Signals and Devices (SSD), 2010
- [6] Dobány Imre, Instabil pozícióra szabályozó demonstrációs eszköz fejlesztése (2017)
- [7] Attila Nemes, „Continuous Periodic Fuzzy-Logic Systems and Smooth Trajectory Planning for Multi-Rotor Dynamic Modeling” Acta Politechnica Hungarica (2016) Vol 13. Issue 6.
- [8] Martin Kratmüller, Combining Fuzzy/Wavelet Adaptive Error Tracking Control Design Acta Politechnica Hungarica (2010) Vol 7. Issue 4.