XIII. MAGYAR MECHANIKAI KONFERENCIA
MaMeK, 2019
Miskolc, 2019. augusztus 27-29.

AZ ACROBOTER BELTÉRI ROBOT MODELLEZÉSE ÉS TÉRBELI MOZGÁSKÖVETÉSE PÁSZTÁZÓ LÉZERSÍKOK ELVÉN

Zana Roland Reginald[1] és Zelei Ambrus Miklós[2]

[1] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5
zana_r@mm.bme.hu

[2] MTA-BME Gépek és Járművek Dinamikája Kutatócsoport
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
zelei@mm.bme.hu

Absztrakt: *A háztartásbeli robotok utáni érdeklődés és igény egyre nagyobb. Az Acroboter egy speciálisan előkészített mennyezeten közlekedő daruszerű robot, mely képes a rendelkezésére álló teljes belső tér hasznosítására. A robot koncepciójában a daruk és drónok előnyei ötvöződnek: a ventilátorok agilissá teszik vízszintes mozgásokhoz, míg a függesztő kötelekkel szinte energiamentes lebegést lehet megvalósítani nyugalmi helyzetben. A könnyű szerkezetet 3D nyomtatott alkatrészek és szénszálas purhab kompozit alaplemez segítségével sikerült kivitelezni. A jelen munka egyik célja a lengőegység mozgásának és szabályozási lehetőségeinek szimulációs és valós szerkezeten történő vizsgálata. A mozgás vizsgálatához szükséges a szerkezet mechanikai modelljének megalkotása. Az újdonság a korábbi megközelítésekhez képest, hogy az alaplemez mellett a kötél összefogó is térbeli merev testként van figyelembe véve, így a rendszer szabadsági fokainak száma térben 12-re nő, míg csak 7 beavatkozó van. További újítás, a robot pozíciójának és orientációjának, valós idejű követéséhez egy gazdaságos piaci megoldás: a HTC Vive Tracker tervezett alkalmazása.*

Kulcsszavak: *kábelen függő robotok, modell prediktív kontroll, trajektória követés, alulaktuáltság, többtest dinamika, pozíció meghatározás*

1. BEVEZETÉS

A robotok és a szabályozó algoritmusok fejlettek és széleskörűen elterjedtek, az ipari robotok struktúrája és szabályozása nem sokat változott az utóbbi évtizedekben. Azonban különböző speciális célokra mindig fejlesztenek új felépítésű robotokat, ilyenek például a lábbal rendelkező robotok, rugalmas robotok, emberbarát könnyű robotok, kábelekhez kötött robotok, plafonhoz kötött robotok és repülő vagy akár víz alatti robotok [1].

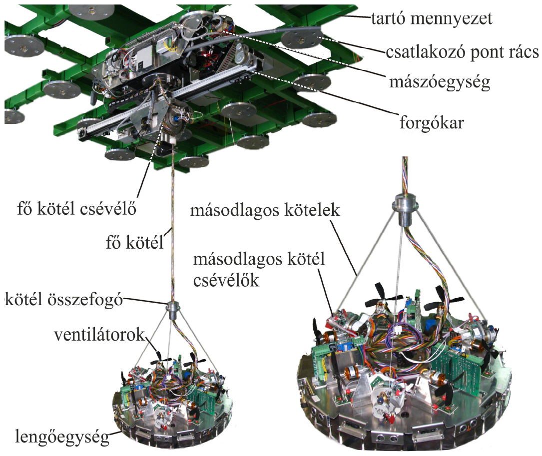
Ezen modern robotok szabályozására a modell prediktív kontroll (MPK) egy hatékony megközelítés, pontossága, jó trajektória követési teljesítménye és viszonylag alacsony számítási igénye miatt. Mechanikai rendszerek esetében az MPK tulajdonképpen a szervo hajtások azon nyomatékainak kiszámítását jelenti, amelyeket alkalmazva az előírt mozgást kaphatjuk. A módszerhez szükséges a rendszer teljes dinamikai modelljének felállítása, a számítási algoritmusokba való beépítéshez. Ezt robotikában gyakran nevezik kiszámított nyomatékok módszerének is (KNyM) [1], [2].

A robotoknak egy számottevő része alulaktuált, az MPK-juk megalkotása matematikailag sokkal bonyolultabb a teljesen aktuált robotokéval szemben. Alulaktuáltnak nevezünk olyan dinamikai rendszereket, amelyek független beavatkozóainak száma kisebb, mint a rendszer szabadsági fokainak száma (SzF) [3], [4], [5]. Az egyik legszemléletesebb alulaktuált rendszer a futódaru, matematikai inga modellje, ahol a szabályozás célja a tömeg pozícionálása, azonban a függesztő kötél felső pontjának pozíciója szabályozható csak míg a lógó tömeg szabad lengéseket végez [6]. Az alulaktuáltság problémája számos való életbeli esetben is jelentkezik: rugalmas robotoknál, ember nélküli légi és vízalatti járművekben, robot karokban, lábbal mozgó rendszerekben és kábelen függő robotokban.

Az alulaktuált rendszerek természetüknél fogva rendelkeznek egy belső dinamikával, amelynek viselkedése nem definiált a szabályozási feladat által. Az MPK nem véghezvihető a belső dinamika kiszámítása nélkül. Így a teljes kontrollált mechanikai rendszer dinamikáját figyelembe kell venni, s az így kapott differenciál algebrai egyenletrendszert (DAE) kell kezelni a mozgás szabályozó algoritmusban [7], [8]. Ezzel szemben a teljesen aktuált rendszerekben a kontroll bemenetek tisztán algebrai úton kiszámíthatóak.

Az alulaktuáltság mellett, a mechanikai rendszerek struktúrájának komplexitása jelentősen megnőhet. Többtest rendszerek nagy SzF-al rendelkezhetnek és zárt kinematikai láncokat is tartalmazhatnak. Egy széleskörűen alkalmazott megközelítés ezen rendszerek matematikai modelljének leírására: redundáns leíró koordináták használata a mozgásegyenlet DAE alakjában [9]. A többtest rendszerek szimulációja az irodalomban alaposan kidolgozott, azonban a hatékony MPK algoritmusuk tovább fejleszthető.

Célunk az 1. ábrán bemutatott alulaktuált teszt robot tovább fejlesztése. A robot alkalmas az új alulaktuált DAE alapú mozgás szabályozási algoritmusok kipróbálásra és összehasonlító tesztelésére. Robotunk darukhoz hasonló szerkezettel rendelkezik, beavatkozóként ventilátorokat és gyors kábelcsévélőket alkalmaz, a pozíció meghatározására pedig söpört lézernyalábokat és inerciális mérő egységeket (IMU).



1. ábra. Az Acroboter egy korábbi prototípusa

2. ÖSSZEHASONLÍTOTT SZABÁLYOZÁSI ALGORITMUSOK

A javasolt prototípusunk nem csak egy ígéretes háztartási robot, de tudományos kísérletekben is alkalmazva lesz. Ez a rész áttekinti a prototípusunkon az összehasonlító teszteknek alávetendő szabályozási algoritmusokat. Az összehasonlítandó szabályozási algoritmusok a következő szempont szerint lesznek figyelembe véve: a) számítási teljesítmény igény (elérendő digitális mintavételezési frekvencia), b) stabilitás, c) robusztusság, d) trajektória követés pontosság, e) kontroll nyomaték és erő előírások, f) alkalmazhatóság különböző típusú szabályozott rendszerekre.

A. Áttekintés

A KNyM használható mozgás szabályozásra, amikor a vég beavatkozó trajektóriája előírt. A KNyM-hez szükséges az inverz kinematika és dinamika kiszámolása [1], [2]. Kutatásunkban a KNyM-t használjuk alulaktuált többtest rendszerre és összehasonlító teszteket végzünk a létező szabályozási megközelítésekre.

A KNyM alkalmazása egy olyan szabályozáshoz vezet mely DAE alakban jelenik meg, a következő két ok miatt:

i) Alulaktuált rendszerek esetében a KNyM-nek alkalmazása DAE problémához vezet, hiszen a rendszer általános koordinátái differenciális változókként, a kontroll bemenetek pedig algebrai változókként jelennek meg a kapcsolt inverz dinamikai és kinematikai számításokban [6], [7] és [11].

ii) Többtest rendszereket, különösképp, azokat amelyek zárt kinematikai láncokat tartalmaznak, nem lehet hatékonyan az általánosan alkalmazott minimális számú általános koordinátával leírni. E helyett gyakran az általános koordináták redundáns elegye alkalmazott, a megfelelő geometriai kényszerekkel együtt. Ilyen numerikusan hatékony számítás lett kifejlesztve az úgy nevezett természetes koordinátákra alapozva [9]. A geometria kényszerek a redundáns koordináták között algebrai egyenletekkel kerülnek leírásra.

B. A probléma megfogalmazása redundáns koordinátákkal

Tekintsük a mozgásegyenlet következő általános megfogalmazását DAE alakban többtest rendszerre [3], [9]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} + \mathbf{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{H}\mathbf{u}, \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{0}, \tag{2}$$

ahol $\mathbf{q}(t) \in \Re^n$ a leíró koordináták vektora, $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \Re^{nxn}$ a tömegmátrix, $\mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) \in \Re^n$ az inerciális erők vektora, $\boldsymbol{\lambda}(t) \in \Re^m$ a Lagrangre-multiplikátorok vektora és $\mathbf{\Phi}_{\mathbf{q}}(\mathbf{q}) = \partial\boldsymbol{\varphi}/\partial\mathbf{q} \in \Re^{mxn}$ a kényszerek Jacobi mátrixa a $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{q}) \in \Re^m$ geometriai kényszerekhez kapcsolva. $\mathbf{H}(\mathbf{q}) \in \Re^{nxl}$ a kontroll bemeneti matrix, és $\mathbf{u} \in \Re^l$ a független kontroll bemenetek vektora. Feltételezzük, hogy a kontroll bemenetek l dimenziója kisebb mint a SzF-ok $n-m$ száma.

Egyértelmű, egyetlen megoldás létezik az inverz kinematikai és dinamikai számításra ha l megegyezik a definiált feladat dimenziójával [7]. Ez azt a feltételezést eredményezi, hogy a szabályozási feladat l számú $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{q},t)\in\Re^l$ szervo kényszer egyenlettel van definiálva [12], [13], [14]:

$$\boldsymbol{\sigma}=\mathbf{0}. \tag{3}$$

Feltétetlezzük, hogy a szervo kényszerek korlátos kontrol erőkkel kielégíthetőek.

C. KDE-vé átalakítás

A legtöbb szabályozási algoritmus alkalmazható matematikai modell közönséges differenciál egyenlet (KDE) formájában történő felírására. Hogy elérjük ezt, az (1) és (2) mozgásegyenlet áttranszformálható KDE-re. Ebben az esetben a kényszererők, azaz matematikailag a Lagrange-mutliplikátorok, kiküszöbölődnek. Ezt nevezik még DAE index redukciónak is [9], [15], [16].

A Lagrange-mutliplikátorok alap ötlete, hogy a (2) geometriai kényszereket, gyorsulás szintjén is megfogalmazzuk, idő szerinti kétszeres differenciálással:

$$\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}\ddot{\mathbf{q}}+\dot{\boldsymbol{\Phi}}_{\mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}}=\mathbf{0}. \tag{4}$$

A (4)-es egyenletet használjuk a (2) pozíció szintű kényszer egyenlet helyett. A Lagrange-multiplikátorok ez után kifejezhetőek zárt alakban:

$$\boldsymbol{\lambda}=(\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}\mathbf{M}^{-1}\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}})^{-1}\left(\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{Hu}-\mathbf{C})+\dot{\boldsymbol{\Phi}}_{\mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}}\right). \tag{5}$$

Az (5) egyenlet visszahelyettesítése után az (1)-es mozgásegyenletbe, a $\ddot{\mathbf{q}}$ gyorsulás kifejezhető expliciten. Azonban, megjegyzendő, hogy a kapott KDE-ben a gyorsulás szintű kényszerek instabilak. Ezért nem használhatóak időbeli integrálásra, csak a kontroll bemenet egy adott időpillanatbeli kiszámítására.

Egy alternatív lehetőség a mozgásegyenlet KDE alakra történő transzformálásra, az (1) mozgásegyenlet projekciója a (2) kényszerek által megvalósítható mozgás alterére [15]. A következő projekció a geometriai kényszerek által megengedett mozgást eredményezi:

$$\mathbf{P}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\left(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}+\mathbf{C}-\mathbf{Hu}\right)=\mathbf{0}. \tag{6}$$

A projekció után, megszabadulunk a kényszer erőktől és a Lagrange-multiplikátoroktól. A $\mathbf{P}_{\mathrm{a}}$ projekciós mátrix a következőképp számítható:

$$\mathbf{P}_{\mathrm{a}}=\mathbf{I}-\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\dagger}\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}, \tag{7}$$

ahol $\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\dagger}$ a Moore-Penrose pszeudó-inverze a kényszerek Jacobi mátrixának, és $\mathbf{I}$ az egység mátrix. A [15] cikk bemutatja a pszeudó-inverz számításának egy olyan módszerét amely elkerüli a leíró koordináták dimenzióbeli inkonzisztenciáját:

$$\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\dagger}=\mathbf{L}^{-1}(\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}\mathbf{L}^{-1})^{\dagger}, \tag{8}$$

ahol $\mathbf{L}$ az $\mathbf{M}$ tömeg mátrix Cholesky-dekompozíciója.

A KDE átalakítás lehetővé teszi olyan szabályozási algoritmusok használatát amelyeket olyan alulaktuált rendszerekre fejlesztettek ki ahol a matematikai modell nem redundáns általános koordináták halmazát használja.

D. Részleges visszacsatolás linearizálás (RVL)

Egy alternatív szabályozási megközelítés alulaktuált rendszerek számára a visszacsatolás részleges linearizálását várja el. Egy speciális átalakítás által, az eredeti nem lineáris rendszer részben helyettesíthető egy ekvivalens lineáris rendszerrel. Az RVL alkalmazásához a rendszert a (9) és (10) egyenletek formájára kell átalakítani [5], [17]. Így a Lagrange-multiplikátorok eltűnnek a mozgásegyenletekből az RVL alkalmazása előtt, ahogy a 2./C részben kifejtésre került.

$$\dot{\mathbf{x}}=\mathbf{f}(\mathbf{x})+\mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}, \tag{9}$$

$$\mathbf{y}=\mathbf{h}(\mathbf{x}), \tag{10}$$

ahol $\mathbf{x}$ az állapotváltozók vektora, $\mathbf{u}$ a kontrol bemenetek vektora és $\mathbf{y}$ a kimenet vektora. A kontrol bemenet a következőképp kifejezhető az RVL alkalmazása után:

$$\mathbf{u}=\mathbf{a}(\mathbf{x})+\mathbf{b}(\mathbf{x})\mathbf{v}, \tag{11}$$

amely integrátorok kaszkádjaként egy linearizált rendszert eredményez, egy szintetikus $\mathbf{v}$ bemenettel. Ez a szintetikus bemenet tetszőlegesen megválasztható, például lineáris kompenzátorként [17].

E. Kiszámított megkívánt kiszámított nyomatékok módszere (KMKNyM)

A KNyM-nek általánosítása alulaktuált rendszerre megtalálható a [18]-as hivatkozásban, olyan dinamikai rendszerekre ahol a leírás nem redundáns általános koordinátákat használ. A KMKNyM alkalmazásához a Lagrange-multiplikátoroktól meg kell szabadulni a mozgásegyenletből a 2./C részben leírtak alapján.

A KMKNyM módszerben a „kiszámított megkívánt” jelző arra utal, hogy a kontrollálatlan koordiniták nem írhatóak elő tetszőlegen, hiszen a belső dinamikától függenek. A módszerhez szükséges az általános koordináták kontrollált és nem kontrollált halmazára történő szétválasztása. A kontrollált koordináták egyértelműen leírtak a szabályozás célja által, míg a kontrollálatlanok nem meghatározottak.

A mozgás egyenlet KDE alakja a $\mathbf{H}$ mátrix null-tere által a kontrollálatlan mozgás egy alterére vetítődik. A projektált KDE rendszer megoldásra kerül a megkívánt kontrollálatlan koordinátákra, és a kontroll bemenet ezután kiszámításra kerül az eredeti mozgásegyenletből.

F. Lagrange-multiplikátorok módszere szervo-kényszer stabilizációval

A szervo-kényszerek [12], [13], [14] amelyek bemutatásra kerültek (3)-ban, hasonlóan kezelendőek mint a geometriai kényszerek (2). Mindkettőt gyorsulás szinten fejezzük ki, ahol a szervo-kényszerek:

$$\mathbf{G_q}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{G}}_\mathbf{q}\dot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{c}} = \mathbf{0}\,, \tag{12}$$

ahol $\mathbf{G_q} \in \Re^{l \times n}$ a $\boldsymbol{\sigma}$ szervo-kényszerek Jacobi-mátrixa, és $\dot{\mathbf{c}}$ az explicit idő szerinti deriváltja a $\boldsymbol{\sigma}$ idő függő részének. A (12) gyorsulás szintű szervo-kényszer egyenletet kiegészítjük a Baumgarte-stabilizáló tagokkal [9], [19] a következőképp:

$$\mathbf{G_q}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{G}}_\mathbf{q}\dot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{c}} + K_\mathrm{D}(\mathbf{G_q}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}) + K_\mathrm{P}\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0}\,. \tag{13}$$

Összefogjuk az (1) dinamikai egyenletet a (4) gyorsulás szintű geometriai kényszerrel és a (13) gyorsulás szintű szervo-kényszer egyenlettel, a következő hiper-mátrix alakban:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \boldsymbol{\Phi}_\mathbf{q}^\mathrm{T} & -\mathbf{H} \\ \boldsymbol{\Phi}_\mathbf{q} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{G_q} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \boldsymbol{\lambda} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{C} \\ -\dot{\boldsymbol{\Phi}}_\mathbf{q}\dot{\mathbf{q}} \\ -\dot{\mathbf{G}}_\mathbf{q}\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{c}} - K_\mathrm{D}(\mathbf{G_q}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}) - K_\mathrm{P}\boldsymbol{\sigma} \end{bmatrix}. \tag{14}$$

A $\mathbf{q}$ és $\dot{\mathbf{q}}$ által definiált állapot minden mintavételezési pillanatban mérésre kerül, a kontrol bemenet pedig kiszámításra kerül a (14) egyenlet által.

E módszer előnye, hogy közvetlenül alkalmazható a mozgásegyenlet DAE alakjára és a szervo-kényszerekre mindenféle transzformáció nélkül. A hátrány, hogy $\ddot{\mathbf{q}}$, $\boldsymbol{\lambda}$ és $\mathbf{u}$ együttható hiper-mátrixa nem invertálható ha a rendszer nem kollokkált. A [18] hivatkozás definicíót ad az alulaktuált rendszerek kollokáltságára.

G. Direkt diszkretizáció

A DAE rendszer direkt diszkretizációja a visszalépő Euler séma használatával egy alternatív módszer, amely közvetlenül alkalmazható az (1), (2) és (3) által definiált rendszer szabályozási problémára. A diszkretizáció az (1) kifejezés első rendű alakjára és a szervo-kényszerek (13) gyorsulás szintű alakjára kerül alkalmazásra:

$$\frac{\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_{i-1}}{h} = \mathbf{y}_i\,, \tag{15}$$

$$\frac{\mathbf{y}_i - \mathbf{y}_{i-1}}{h} = -\mathbf{M}^{-1}\left(\mathbf{C} + \boldsymbol{\Phi}_\mathbf{q}^\mathrm{T}\boldsymbol{\lambda}_i - \mathbf{H}\mathbf{u}_i\right), \tag{16}$$

$$\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{0}\,, \tag{17}$$

$$\mathbf{G_q}\frac{\mathbf{y}_i - \mathbf{y}_{i-1}}{h} + (\dot{\mathbf{G}}_\mathbf{q} + K_\mathrm{D}\mathbf{G_q})\frac{\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_{i-1}}{h} + \dot{\mathbf{c}} + K_\mathrm{D}\mathbf{c} + K_\mathrm{P}\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0}\,, \tag{18}$$

ahol $\mathbf{q}_{i-1}$ és $\mathbf{y}_{i-1}$ a mért vagy vélt értékei a leíró koordinátáknak és koordináta sebességeknek az adott időlépésben. Az időlépés nagysága h. A $\mathbf{M}$, $\boldsymbol{\Phi}_\mathbf{q}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{G_q}$, $\dot{\mathbf{G}}_\mathbf{q}$ mátrixok és $\boldsymbol{\varphi}$, $\boldsymbol{\sigma}$, $\mathbf{c}$, $\dot{\mathbf{c}}$ vektorok a $\mathbf{q}_{i-1}$ és $\mathbf{y}_{i-1}$-vel kerülnek kiértékelésre. A kapott (15)-(18) nem lineáris algebrai egyenletrendszer, Newton-Raphson módszerrel kerül megoldásra a megkívánt $\mathbf{q}_i$ koordinátákra, $\mathbf{y}_i$ sebességekre, $\boldsymbol{\lambda}_i$ Lagrange-multiplikátorokra és $\mathbf{u}_i$ kontrol bemenetekre, amelyek csak a következő időlépésben érvényesülnek [6], [11]. A Newton-Raphson módszer pontos eredményt ad legfeljebb 3 lépésben, mert a kiindulási érték az előző időlépésből számított értékekből ered.

H. Legkisebb négyzetes hiba alapú prediktív módszer

Egy nemrégiben kifejlesztett legkisebb négyzetes hiba alapú félig analitikus prediktív módszer [20], [21] lesz bevonva a kísérleti tesztekbe. A kontroll bemenet polinom függvények formájában kerül előírásra, ahol a polinom együtthatói úgy változnak a mozgás során, hogy a megkívánt és a megvalósuló mozgás közötti különbség minimális legyen. A prediktív szabályozási algoritmus a rendszer mozgását polinom formájában találja meg:

$$\mathbf{q}_c = \mathbf{P}\boldsymbol{\gamma}, \tag{19}$$

ahol $\mathbf{q}_c(t) \in \Re^l$ a szabályozott koordináták vektora, $\mathbf{P} \in \Re^{l \times n}$ az ismeretlen együtthatók mátrixa és $\boldsymbol{\gamma}(t) \in \Re^n$ tartalmaz n számú polinomiális idő függvényt. Az alapötlet a kontroll bemenetek megtalálása variációs elv alapján, amellyel a szabályozási feladat minél pontosabban teljesül. A hiba idő szerinti integrálja egy bizonyos t_0 - t_e zárt idő intervallumon minimalizálásra kerül:

$$J = \int_{t_0}^{te} \mathbf{E}^T \mathbf{E} dt \tag{20}$$

ahol $\mathbf{E}$ a hiba, a megkívánt és a megvalósuló trajektória között. Minden időlépésben, a kontroll bemenet analitikus formában kiszámításra kerül, úgy hogy J a (20) egyenletben minimális legyen. A következő digitális mintavételezésben a [t_0, t_e] intervallum a h időlépéssel eltolásra kerül, ami jelentősen kisebb mint maga [t_0, t_e] intervallum.

I. Digitális hatások kísérleti vizsgálata

Minden digitálisan szabályozott rendszer esetében, a digitalizáció, úgy mint az idő és térbeli kvantálás, az időkésés fontos problémát okoz, mely befolyásolják a rendszer stabilitását [22], [23]. A szervo hajtásokban és csapágyakban is felbukkanó szárazsúrlódás a digitális hatásokkal együtt gyakran eredményez váratlan instabilitásokat és nem kívánt rezgéseket [24], [25], amely a rendszer alapos szintű ismeretét igényli ha valaki szeretné elkerülni ezen hatásokat. Ezek a hatások kísérletileg tesztelve lesznek az Acroboter roboton.

3. A ROBOT PROTOTÍPUSA

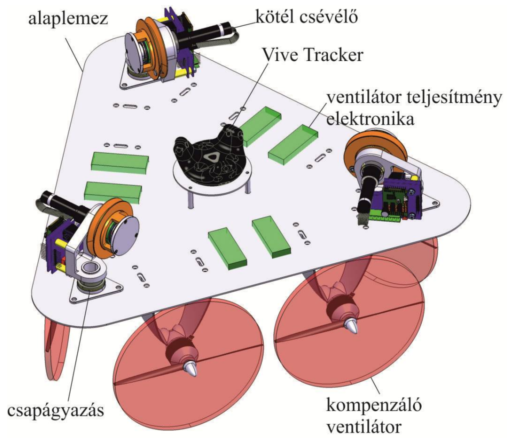
Az Acroboter két fő részből áll, a mászó egységből (ME) és a lengőegységből (LE), lásd 1. ábra.

A LE új prototípusa, lásd 2. ábra, minimális tömegre lett optimalizálva. Cél volt a tömeg 10kg-ról 4kg körüli értékre való csökkentése. Számos a LE korábbi prototípusán használt alkatrész egyszerűsítésre vagy eltávolításra került. A jelen felállásban, a teljesítményelektronika a ME-re lett átcsoportosítva, ez szolgáltatja a 24V-ot a teljesítmény elektronikai alkatrészek számára és az 5V-ot a logikai áramköröknek. Az akadály elkerülésre használt ultrahangos távolságérzékelő és propellerek fordulatszámmérésére használt fotodióda - foto tranzisztor párosok és a hozzájuk tartozó elektronika eltávolításra kerültek. Az alaplemez anyaga alumíniumról könnyűsúlyú szénszál purhab kompozitra cserélődött, lásd 2. ábra. A ventilátorok tartó oszlopai 3D nyomtatással készültek PLA anyagból, közepes kitöltési sűrűséggel, lásd 4. ábra. Ezen módosítások által a kitűzött tömeg elérhető.

A. A Mechanikai felépítés és beavatkozók

A mechanikai felépítés az (1. és 2.) ábrán látható. A fő függesztő kötél és a másodlagos kötelek hossza a LE-n szervo motorok által szabályozott, ami 4 beavatkozót jelent. A pozíciót 6 ventilátor tudja kompenzálni, melyek tetszőleges irányú erőt tudnak eredményezni a LE alaplemezének síkjában, és egy nyomatékot a lemez síkjára merőleges tengely körül. Ez 3 további kontrol bemenetet jelent. Az összesen 7 bemenet ellenére a rendszer alulaktuált, mert a beavatkozók száma kisebb, mint a rendszer SzF-nak száma, ami a kötélösszefogó és az alaplemez, mint térbeli merev test SzF-aiból számolható, azaz 2x6 = 12.

Az Acroboter kinematikailag redundáns. Megjegyezzük, hogy az alulaktuált rendszerek szükségszerűen kinematikailag redundánsak [26]. Azon teljesen aktuált robotokat, amelyek több belső SzF-al rendelkeznek mint amennyi egy bizonyos feladat teljesítétéhez szükséges, kinematikailag redundánsnak nevezzük [2]. Ilyen rendszerek esetében az inverz kinematikai számítás nem egyértelmű. Azonban a kapcsolt inverz kinematikai és inverz dinamikai számítás alulaktuált robotok számára már egyértelmű, ha a szabályozási cél dimenziója megegyezik a független kontrol bemenetek számával. Ami még mindig kevesebb, mint a SzF-ok száma, ezért mindkét rendszer kinematikailag redundáns, ez a redundancia a belső dinamika figyelembevételével oldható fel. Ettől eltekintve az Acroboter tartalmaz még további kinematikailag redundáns SzF-okat.



2. ábra. A lengőegység könnyűsúlyú prototípusának terve

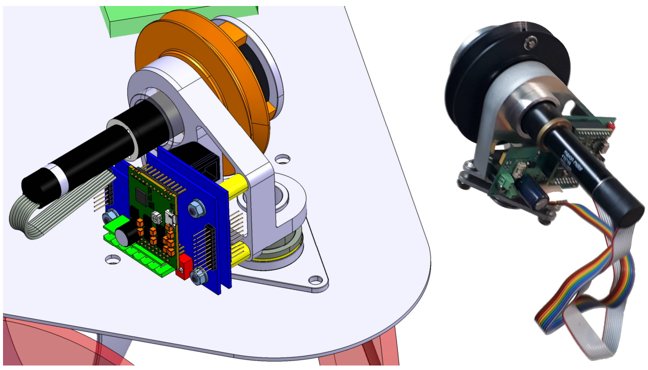
B. Aktuátorok

A másodlagos kötél csévélők siklócsapággyal (lásd 3. ábra) csatlakoznak az alaplemezhez, így képesek az alaplemezre merőleges tengely körüli elfordulásra. Kefenélküli EC16 60 W Maxon tipusú DC motorokat használunk a kötélcsévélőkhöz.

A ventilátormotorokat, 4. ábrán látható, a régi BL 2212/10 180W típusról MN3110-17 700kv típusú Tiger motorokra cseréltük, amelyeknek több mint kétszerese a teljesítménye, akár 466W. Nagy hatékonyságú 2 szárnyú propellereket használunk 8 inch átmérővel és 8 inch emelkedéssel. A propellerek óramutató járásával megegyező és ellentétes párok, ennek megfelelően is forgatjuk őket az alaplemezre gyakorolt forgatónyomaték és giroszkopikus hatások kioltása céljából.

C. Érzékelés és pozíció meghatározás

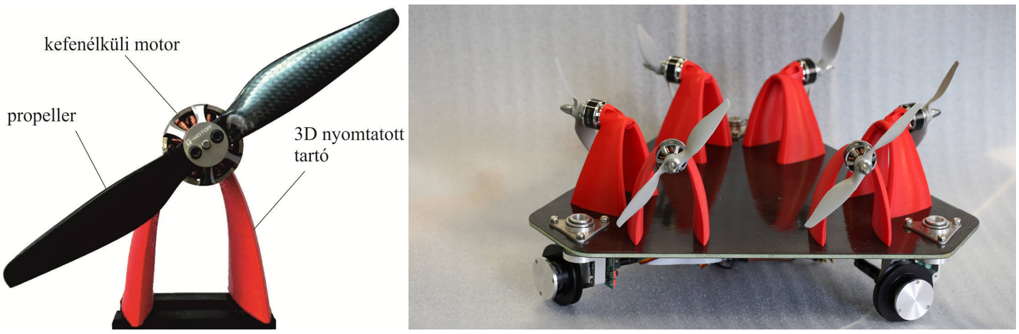
Az alaplemez pozíció követése a HTC VIVE [27] virtuális valóság rendszer egy kiegészítőjével kerül megvalósításra a Vive Tracker-el. A Tracker az alaplemez felső oldalára kerül rögzítésre rezgés szigetelés alkalmazásával, ez az elrendezés megfelelő rálátást biztosít a pásztázó egységek számára. Két lézer sík kibocsájtó egység az úgynevezett Lighthouse-ok felváltva bocsájtanak ki vízszintes és függőleges lézersíkokat 120°-os szögtartományt lefedve mindkét irányban. A Tracker felületén fotodiódák találhatóak, az érkező lézernyaláb érzékelésére. A lézersík érkezési időpontja a különböző diódákon rögzítésre kerül, az időbeli különbségekből kiszámolható a Tracker térbeli pozíciója és orientációja. A Tracker működését inerciális szenzorok is segítik. A Tracker működése a következőkben röviden összefoglalásra kerül az [28] és [29] irodalom alapján.



3. ábra. Másodlagos kötél csévélő mechanizmus forgásjeladóval felszerelve, terv és megvalósítás

Az A és B Lighthouse-ok alternáló söprő lézersíkjai a következő szekvencia szerint működnek:

- az A állomás függőleges lézersíkja balról jobbra söpör
- egy fél fordulattal vagy 8.333mp-el később az A állomás vízszintes lézersíkja söpör lentről felfelé
- 8.333mp-el később, az A állomás lézerei kikapcsolnak, és a B állomás függőleges lézersíkja söpör balról jobbra
- 8.333mp-el később a B állomás vízszintes lézersíkja söpör lentről felfelé
- a B állomás lézerei kikapcsolnak, az A állomás lézerei bekapcsolnak, és a folyamat kezdődik elölről



4. ábra. Ventilátor, mint beavatkozó

Minden állomás tartalmaz egy villogó LED mátrixot az összeszinkronizálhatóság céljából. A LED tömbök egy széles szögű szinkronizáló impulzust bocsájtanak ki minden 8.333mp-es söprő periódus elején.

A pozíció és orientáció meghatározást inerciális mérő egységek segítik. Az aktuális állapot az előző állapotból és a szenzor jelének az előző állapot óta eltelt idő szerinti integrálásából adódik össze. Az integrálás és mérési zajok miatt elkerülhetetlen a mért pozíció drift-je. Azonban amikor a lézersík söprés megtörténik, a bázis állomások többnyire korrigálják a pozíció és orientáció drift-et.

Irodalmakban [28] található mérések szerint headset esetében 0.3mm körül ingadozott a mérés jitter-je. A jitter a pontatlanság a mérésben miközben a mért test nyugalomban van. Ez az érték 2.1mm-re is nőhet, ha csak egy Lighthouse-nak van rálátása a Tracker-re. A rendszer pontosságára vonatkozó mérések, 2mm RMS pontosságot eredményeztek.

Mivel a bázis állomásokat úgy kell elhelyezni, hogy lássák egymást maximum 5 méter távolságban, ez a munkatér maximális nagysága, ami kielégítő méréseink számára.

Nagyobb, akár mm alatti precizitás elérésére egy OptiTrack [30] kamerarendszer lehet egy drágább, de lehetséges megoldás.

5. ábra. Vive Tracker pozíció meghatározáshoz [27]

A kötélcsévélő motorok hall szenzorokkal ellátottak a szögpozíció mérés céljából. A hall szenzor 6 különböző jelkombinációt képes kiadni egy körülfordulás alatt. Továbbá digitális inkrementális forgásjeladó, körülfordulásonként 512 jellel, szolgál a sebességmérésre. Így a kötél hosszak mérhetőek, támogatva a pozíció meghatározását.

D. A szabályozás megvalósítása és a kommunikáció

A csévélő motorok és ventilátorok elektromos kontroll és szenzoregységei egy half-duplex RS422 láncra vannak felfűzve. Az RS422-es busz egyik vége egy PC-ben végződik, ahol a magas szintű trajektória követő szabályozás fut.

A Tracker egy vezetéknélküli interfészen keresztül egy USB dongle-höz kapcsolódik. Ez a dongle a PC-hez csatlakoztatva átviszi a Tracker mért adatait a PC-re.

A 2. szekcióban összefoglalt kontroll algoritmusok, MatLab-an lettek implementálva, amely egy kényelmes fejlesztői környezetet nyújt szabályozások fejlesztésére.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben az Acroboter lengőegységének továbbfejlesztése lett összefoglalva. A fejlesztés iránya a tömeg csökkentése és precízebb könnyebben használható szenzor rendszer alkalmazása volt. Több alulaktuált szabályozási algoritmus lett megvizsgálva, amelyek tesztelésre fognak kerülni a kísérleti berendezésen.

5. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Ezt a kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (Projekt azonosító: NKFI-FK18 128636) és az MTA-BME Gépek és Járművek Dinamikája Kutatócsoport támogatta.

HIVATKOZÁSOK

[1] B. SICILIANO, O. KHATIB, *Springer Handbook of Robotics*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2007.

[2] M. W. SPONG and M. VIDYASAGAR, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, 1989.

[3] H. GOLDSTEIN, *Classical Mechanics,* 2nd ed. Addison-Wesley, 1980.

[4] A. DE LUCA, R. MATTONE, G. ORIOLO: Control of underactuated mechanical systems: Application to the planar 2r robot. In: *35th IEEE Conf Decision Contr*, Kobe, Japan, pp 1455–1460, 1996.

[5] M. W. SPONG, Underactuated mechanical systems, *Control Problems in Robotics and Automation*. Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol 230. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998, doi: /10.1007/BFb0015081.

[6] A. ZELEI, L. L. KOVÁCS, G. STÉPÁN, Computed torque control of an under-actuated service robot platform modeled by natural coordinates, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 16(5):2205–2217, 2011.

[7] W. BLAJER, K. KOLODZIEJCZYK, Modeling of underactuated mechanical systems in partly specified motion, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 46(2):383–394, 2008.

[8] R. SEIFRIED, *Dynamics of Underactuated Multibody Systems: Modeling, Control and Optimal Design*, Springer, 2014.

[9] J.G. DE JALÓN, E. BAYO, *Kinematic and dynamic simulation of multibody systems: the realtime challenge*, Springer-Verlag, 1994.

[10] G. STÉPÁN, A. TÓTH, L. L. KOVÁCS, G. BOLMSJÖ, G. NIKOLERIS, D. SURDILOVIC, A. CONRAD, A. GASTERATOS, N. KYRIAKOULIS, D. CHRYSOSTOMOU, R. KOUSKOURIDAS, J. CANOU, T. SMITH, W. S. HARWIN, R. C. V. LOUREIRO, R. LOPEZ, M. MORENO, ACROBOTER: A ceiling based crawling, hoisting and swinging service robot platform, *Beyond Gray Droids*: Domestic Robot Design for the 21st Century Workshop at HCI 2009, 2009.

[11] L. L. KOVÁCS, A. ZELEI, L. BENCSIK, J. TURI, and G. STÉPÁN, Motion control of an under-actuated service robot using natural coordinates, in *Proceedings of ROMANSY 18 Robot Design, Dynamics and Control*, 2010, pp. 331–338.

[12] W. BLAJER and K. KOLODZIEJCZYK, A geometric approach to solving problems of control constraints: Theory and a dae framework, *Multibody System Dynamics*, 11(4):343–364, 2004.

[13] W. BLAJER and K. KOLODZIEJCZYK, Control of underactuated mechanical systems with servoconstraints, *Nonlinear Dynamics*, 50(4):781–791, 2007.

[14] P. MASARATI, M. MORANDINI, A. FUMAGALLI, Control Constraint of Underactuated Aerospace Systems, *ASME J. Comput. Nonlinear Dyn*., 9(2):021014, April 2014, doi:10.1115/1.4025629.

[15] J. KÖVECSES, J.-C. PIEDOBOEUF, and C. LANGE, Dynamic modeling and simulation of constrained robotic systems, IEEE/ASME *Transactions on mechatronics*, vol. 8, no. 2, pp. 165–177, 2003.

[16] L.L. KOVÁCS and L. BENCSIK, Stability case study of the acroboter underactuated service robot, *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2(4):043004, 2012.

[17] A. ISIDORI, *Nonlinear Control Systems*, 2nd ed. Springer, 1999.

[18] I. M. M. LAMMERTS, Adaptive Computed Reference Computed Torque Control, Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, 1993.

[19] J. BAUMGARTE, Stabilization of constraints and integrals of motion in dyanamical systems, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 1(1):1–16, 1972.

[20] L. BENCSIK, B. BODOR, L. L. KOVÁCS, Predictive trajectory tracking of under-actuated systems, in proc.: *Joint International Conference on Multibody Dynamics*, Montreal, Canada, 2016., paper a305.

[21] D. J. NAGY, L. BENCSIK, T. INSPERGER, Identification of the model of stick balancing using the cepstral analysis, in proc.: DSTA 2017: *Mathematical and Numerical Aspects of Dynamical System Analysis*, Lodz, Poland, 2017., pp. 405-412.

[22] G. STÉPÁN, A. STEVEN, and L. MAUNDER. Design principles of digitally controlled robots. *Mechanism and Machine Theory*, 25(5):515-527, 1990.

[23] G. STÉPÁN. Vibrations of machines subjected to digital force control. *International Journal of Solids and Structures*, 38(10-13):2149-2159, 2001.

[24] BUDAI, C., KOVÁCS, L.L., KÖVECSES, J., STÉPÁN, G.: Effect of dry friction on vibrations of sampled-data mechatronic systems. *Nonlinear Dynamics*, 88(1): 349-361, 2017. https://doi.org/10.1007/s11071-016-3246-7.

[25] Cs. Budai, L. L. KOVÁCS and J. KÖVECSES: Combined Effect of Sampling and Coulomb Friction on Haptic Systems Dynamics. *J. Comput. Nonlinear Dynam* 13(6), 061005 (10 pages), 2018. Doi: 10.1115/1.4039962.

[26] A. ZELEI, L. BENCSIK, L. L. KOVÁCS, G. STÉPÁN: Redundancy Resolution of the Underactuated Manipulator ACROBOTER. In proc. *RoManSy 2012* - 19th CISM-IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, June 12-15, 2012, Paris, France, pp. 233-240.

[27] Hivatalos HTC Vive honlap: https://www.vive.com/us/vive-tracker/. Utolsó elérhetőség: 2019. március 20.

[28] Doc-Ok homepage: http://www.doc-ok.org/?p=1478. Utolsó elérhetőség: 2019. március 20.

[29] D.C. NIEHORSTER, L. Li, M. LAPPE, The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research. *Iperception* 8(3): 2041669517708205, 2017. Doi: 10.1177/2041669517708205.

[30] OptiTrack hivatalos honlap: optitrack.com. Utolsó elérhetőség: 2019. március 20.