

Akıllı Robot Yürüteçler için Tasarlanmış Yanal Destek Mekanizmasına Hesaplamalı Tork Kontrol Yönteminin Uygulanması

Computed Torque Control Method Application to Lateral Support Mechanism designed for Smart Walkers

Nurdan Bilgin¹, Tolga Tutkan², Elif Topal³

¹Makine Mühendisliği Bölümü
Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun
nurdan.bilgin@omu.edu.tr

²Makine Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Öğrencisi
Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun
tolga.tutkan@gmail.com

³Makine Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Öğrencisi
Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun
eliftopalt@gmail.com

Özetçe

Dünya genelinde, yürüme güçlüğü çeken, konsantrasyon ve/veya mental kayıp yaşayan yaşlı nüfus artmaktadır. Onların güvenli şekilde yürüme fonksiyonlarını sürdürebilmeleri ve yeniden kazanabilmeleri için robotik teknolojilerden yararlanılması güncel eğilimdir. Tübitak ve Omü-Bap tarafından desteklenen projelerimiz kapsamında, düşme anını algılayıp statik destek sağlamak üzere geliştirilen akıllı robot yürüteç için, yana devrilme ve kendi ekseninde dönmeyi önlemek üzere yanal ayak mekanizması geliştirilmiştir. Bu çalışmada, önerilen yanal ayak mekanizmasının tetiklendikten sonra dış bozuculardan etkilenmemesi için geliştirilen bir kontrol süreci tanıtılmaktadır. Sözü edilen kontrolün amacı, belirlenen hareket profilinin dış bozuculardan etkilenmeksizin izlenmesidir. Çalışma kapsamında dış bozucu girişlere karşı hesaplamalı tork kontrolü yöntemi çalışılmış ve benzetim sonuçları verilmiştir. Yapılan benzetim çalışması kontrol amacının gerçekleştiğini göstermektedir. Gelecek çalışma yöntemin gerçek zamanlı uygulaması şeklinde olacaktır.

Abstract

Worldwide, the elderly population with walking difficulties, concentration and/or mental loss is increasing. It is a current trend to use robotic technologies so that they can maintain and recover their gait functions safely. Within the scope of our projects supported by Tübitak and Omü-Bap, a smart robot walker has been developed to detect the moment of falling and provide static support. This walker has lateral support leg mechanisms to prevent sideways tipping and rotation on its own axis. In this study, a control process which is against external disturbances and started after triggering of proposed mechanism is introduced. The purpose of the mentioned control is to trace the determined motion profile without being

affected by external disturbances. Within the scope of the study, the computational torque control method against external disturbance inputs has been studied and the simulation results are given. The simulation results show that the control objective is achieved. Future work will be in the form of real-time implementation of the method.

1. Giriş

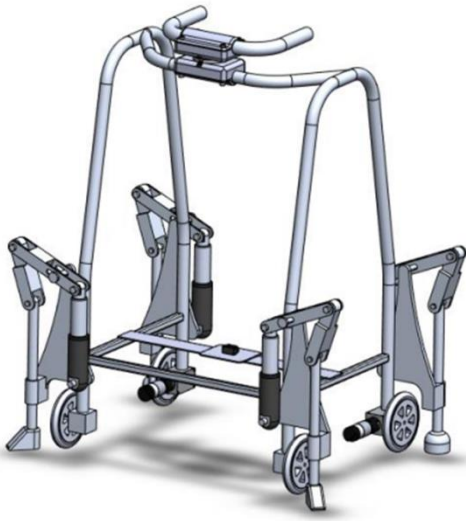
Yürüteçler, yürüme güçlüğü çeken insanların normal insanlar gibi yürüyebilmelerini ve yaşama katılabilmelerini desteklemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yardımcı araçtır. Ancak yürüteç kullanırken, her iki taraftaki kuvvetin eşit olmaması ve/veya eğimin etkisi ile döndürme momenti oluşabilmekte, yürütecin devrilmesi ve kullanıcıyı düşürmesi mümkün olabilmektedir [1]. Bu problemi ortadan kaldırmak üzere, robot yürüteç üzerindeki çok sayıda algılayıcı kullanılarak yürütecin devrilme eşiği belirlenerek önlem geliştirilmesi Tübitak BİGG 1512, 2220176 numaralı “Akıllı Robot Yürüteç” ve OMÜ-BAP, PYO.MUH.1908.23.010 numaralı “Tekerekli (hasta/yaşlı) yürüteçleri için kullanıcının düşme başlangıcını algılamaya ve düşme önlemeye yönelik destek sistemleri” projeleri kapsamında desteklenmektedir. Bu projeler kapsamında düşme durumu algılandığında, açılarak statik ve kararlı destek sağlayacak yanal ayaklar tasarlanmıştır. Yanal destek ayağı mekanizması önceki bir çalışmada anlatılmıştır [2]. Sağlanan destek ile tekerlerin dönmeye devam etmesi ve diğer yönlerdeki dengesizlik giderilebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında yanal ayaklar düşme başlangıcı veya başka bir acil durum algılanıp tetiklendiğinde doğrusal eyletici için arzu edilen hareket profilinin dış bozuculardan etkilenmemesi için alt düzey bir kontrol önerilmektedir.

Önerilen algoritma iyi bilinen dış bozucunun, sistemin hareket modeli uyarınca tahminine dayalı hesaplamalı tork kontrolü yöntemidir [3-5] ve belirlenen bir hareket profilinin izlenmesine yönelik yapılmış benzer bir çalışma mevcuttur [6]. Çalışmanın ileriki bölümleri şu şekilde tasarlanmıştır. Sonraki bölümde önerilen yanay ayak mekanizmasının matematiksel modeli verilecektir. Ardından önerilen kontrol yöntemi açıklanacaktır. Dördüncü bölüm benzetim çalışması ve grafiksel gösterimlere ayrılmıştır. Bildiri Sonuç ve Gelecek Çalışmalar ismini taşıyan son bölüm ile tamamlanacaktır.

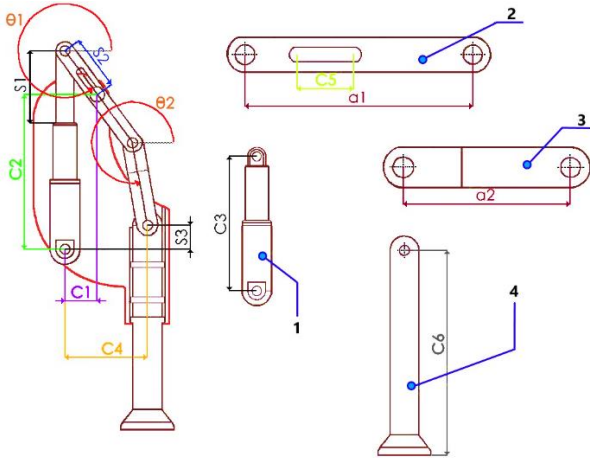
2. Mekanizmanın Matematiksel Modeli

Şekil 1'de katı modeli gösterilen akıllı robot yürüteç üzerindeki algılayıcılar aracılığıyla düşme durumunu algılamak ve önlem almak üzere geliştirilmiştir. Ekli yanay ayaklar, acil durumda açılarak statik destek sağlamakta ve yürütecin kendi eksenini etrafında dönmelerini engellemektedir.



Şekil 1: Akıllı robot yürütecin katı modeli.

Yanay ayağın teknik resmi Şekil 2'de gösterilmektedir. Yanay ayak bir doğrusal eyletici, üzerine kanal açılmış bir parça, Sabit ara parça ve yere basmak üzere tasarlanmış destek ayağından oluşmaktadır.



Şekil 2: Yanay ayak mekanizmasının teknik resmi. (1-Doğrusal Eyletici, 2-Üzerine Kanal Açılmış Parça, 3-Sabit ara parça, 4-Destek Ayağı)

Şekilde görüldüğü gibi, c_1, c_2, c_3 ve c_4 sabit boyutları, s_1, s_2 ve s_3 ise değişken boyutları göstermektedir. θ_1 ve θ_2 uzuvların açısal konumlarını ifade etmek için kullanılmaktadır. Üzerine pinin kayması için kanal açılmış destek parçasının uzunluğu a_1 olarak gösterilmektedir. Diğer ara destek parçasının uzunluğu ise a_2 olarak gösterilmektedir. Burada s_1 giriş değişkenidir ve doğrusal eyleticiin stroke uzunluğu ile sınırlıdır. s_2 pin ile kısıtlanmış kanalın hızıdır. Mekanizma iki döngü ile ifade edilebilmektedir. Birinci döngü denklemi (1)'de verildiği gibidir. Bileşenlerine ayrılarak (2) ve (3) denklemlerine ulaşılır.

$$c_1 i + c_2 j = c_3 j + s_1 j + s_2 e^{i\theta_1} \quad (1)$$

$$c_1 = s_2 \cos(\theta_1) \quad (2)$$

$$c_2 - c_3 - s_1 = s_2 \sin(\theta_1) \quad (3)$$

(3) denkleminin (2) denklemine bölünmesi ile θ_1 açısının tanjant değeri ve bu değer ters tanjantının alınması ile θ_1 açısı sabit değerlere ve doğrusal eyleticiin konumuna göre elde edilir (4).

$$\tan(\theta_1) = \frac{c_2 - c_3 - s_1}{c_1} \Rightarrow \quad (4)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{c_2 - c_3 - s_1}{c_1} \right)$$

İkinci döngü denklemi (5) aşağıdaki gibi yazılır ve (4)'de hesaplanmış θ_1 değeri kullanılarak çözülebilir.

$$c_4 i + s_3 j + a_2 e^{i\theta_2} = c_3 j + s_1 j + s_2 e^{i\theta_1} \quad (5)$$

(5)'in bileşenleri bilinen terimler sağda bilinmeyen terimler solda kalacak şekilde (6) ve (7) şeklinde yazılabilir. Bu denklemlerin sağ tarafları basitleştirme açısından sırasıyla k_1 ve k_2 şeklinde adlandırılabilirler. $k_1 = s_2 \cos(\theta_1) - c_4$ ve $k_2 = a_1 \sin(\theta_1) + c_3 + s_1$ şeklindedir.

$$a_2 \cos(\theta_2) = k_1 \quad (6)$$

$$a_2 \sin(\theta_2) = k_2 - s_3 \quad (7)$$

Denklem (6) ve (7)'nin her iki tarafının karesi alınırsa.

$$a_2^2 \cos^2(\theta_2) = k_1^2 \quad (8)$$

$$a_2^2 \sin^2(\theta_2) = k_2^2 - 2k_2 s_3 + s_3^2 \quad (9)$$

$$a_2^2 = k_1^2 + k_2^2 - 2k_2 s_3 + s_3^2 \quad (10)$$

Denklem (8), (9) ve (10)'un birlikte çözümü θ_2 ve s_3 değerlerini verir. Böylece tüm konum değişkenleri doğrusal eyleticiin konumuna bağlı olarak bilinir hale gelir. Doğrusal eyletici sıfır konumunda iken sabit destek ayağının konumunu ifade eden s_3 değişkeni mutlak olarak en küçük değerdedir. Doğrusal eyleticiin yüksüz hızı sabit 70 mm/saniye [7] olarak bildirilmektedir. Diğer değişkenlerin hızları, doğrusal eyleticiin hızına (\dot{s}_1) bağlı olarak hesaplanabilir. Eşitlik (2) ve (3)'ün türevinin birlikte çözülmesi ile

$$\begin{aligned} 0 &= \dot{s}_2 \cos(\theta_1) - s_2 \sin(\theta_1) \dot{\theta}_1 \\ 0 - \dot{s}_1 &= \dot{s}_2 \sin(\theta_1) + s_2 \cos(\theta_1) \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_1 &= \frac{\dot{s}_2 \cos(\theta_1)}{s_2 \sin(\theta_1)} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} -\dot{s}_1 &= \dot{s}_2 \sin(\theta_1) + \frac{s_2 \cos(\theta_1) \dot{s}_2 \cos(\theta_1)}{s_2 \sin(\theta_1)} \\ \dot{s}_2 &= -\dot{s}_1 \sin \theta_1 = g_{12} \dot{s}_1 \end{aligned} \quad (12)$$

(11) denkleminde (12) denkleminde bulunan \dot{s}_2 ifadesi yerine yazılırsa

$$\dot{\theta}_1 = \frac{\dot{s}_2 \cos(\theta_1)}{s_2 \sin(\theta_1)} = -\dot{s}_1 \sin \theta_1 \frac{\cos(\theta_1)}{s_2 \sin(\theta_1)}$$

$$\dot{\theta}_1 = -\frac{\cos(\theta_1)}{s_2} \dot{s}_1 = g_{122} \dot{s}_1 \quad (13)$$

(12) ve (13) denklemlerinde ifade edilen g_{12} ve g_{122} sırasıyla ikinci uzvun doğrusal hızı ve açısal hızı ile doğrusal eyleticinin hızı arasındaki ilişkiyi gösteren hız etki katsayılarıdır.

Kinetik Enerji

$$T = \frac{1}{2} [m_1 \dot{s}_1^2 + m_2 \dot{s}_2^2 + m_2 d_1^2 \dot{\theta}_1^2 + I_2 \dot{\theta}_1^2 + I_3 \dot{\theta}_2^2 + m_4 \dot{s}_3^2]$$

$$T = \frac{1}{2} [m_1 + m_2 g_{12}^2 + (m_2 d_1^2 + I_2) g_{122}^2 + I_3 g_{13}^2 + m_4 g_{14}^2] \dot{s}_1^2$$

$$T = \frac{1}{2} M(s_2, \theta_1, \theta_2) \dot{s}_1^2 = \frac{1}{2} M(s_1) \dot{s}_1^2 \quad (18)$$

Burada M sadece konum değişimlerine bağlı bir fonksiyon olarak bulunur. Tüm konum değişkenleri s_1 , giriş uzvunun konumu cinsinden ifade edilebildiği için $M(s_2, \theta_1, \theta_2)$ fonksiyonunu, $M(s_1)$ şeklinde ifade edebiliriz. Burada

$$M(s_2, \theta_1, \theta_2) = m_1 + m_2 g_{12}^2 + (m_2 d_1^2 + I_2) g_{122}^2 + I_3 g_{13}^2 + m_4 g_{14}^2 \quad (19)$$

Potansiyel Enerji

$$U = g [m_1 (c_3 + \frac{s_1}{2}) + m_2 (c_3 + s_1 + d_1 \sin \theta_1 + m_3 (c_3 + s_1 + a_1 \sin \theta_1 + d_2 \sin \theta_2) + m_4 (c_3 + s_1 + a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin \theta_2 + \frac{c_6}{2} - s_3)] \quad (20)$$

Potansiyel enerji ifadesi içerisinde geçen ve teknik resimde gösterilmeyen d_1 ve d_2 ifadeleri sırasıyla ikinci ve üçüncü uzuvların kütle merkezlerini ifade etmektedir. Burada ağırlık merkezlerinin yükseklik değişimini belirten h ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$h_1 = c_3 + \frac{s_1}{2};$$

$$h_2 = c_3 + s_1 + \frac{a_1}{2} \sin \theta_1;$$

$$h_3 = c_3 + s_1 + a_1 \sin \theta_1 + \frac{a_2}{2} \sin \theta_2$$

$$\text{ve } h_4 = c_3 + s_1 + a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin \theta_2 + \frac{c_6}{2} - s_3$$

$$U = gV(s_1, \theta_1, \theta_2, s_3)$$

$$V(s_1, \theta_1, \theta_2, s_3) = m_1 h_1 + m_2 h_2 + m_3 h_3 + m_4 h_4 \quad (21)$$

Potansiyel enerji ifadesini yerçekimi ivmesi ve sadece konum değişkenlerine bağlı bir $V(s_1, \theta_1, \theta_2, s_3)$ fonksiyonu şeklinde ifade edebiliriz. Bu durumda Lagrange ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$L = T - U = \frac{1}{2} M(s_2, \theta_1, \theta_2) \dot{s}_1^2 - gV(s_1, \theta_1, \theta_2, s_3) \quad (22)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{s}_1} - \frac{\partial L}{\partial s_1} = F \quad (23)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{s}_1} = M(s_2, \theta_1, \theta_2) \dot{s}_1 \quad (24)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{s}_1} = M(s_2, \theta_1, \theta_2) \dot{s}_1 + \left[\frac{\partial M}{\partial s_2} \cdot \frac{\partial s_2}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} \right] \dot{s}_1 \quad (25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial s_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial M}{\partial s_2} \cdot \frac{\partial s_2}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} \right) \dot{s}_1^2 - g \left(\frac{\partial V}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial s_3} \cdot \frac{\partial s_3}{\partial s_1} \right) \quad (26)$$

$$M(s_2, \theta_1, \theta_2) \dot{s}_1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial M}{\partial s_2} \cdot \frac{\partial s_2}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} \right) \dot{s}_1^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial s_2} \cdot \frac{\partial s_2}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} \right) \dot{s}_1 + g \left(\frac{\partial V}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial s_3} \cdot \frac{\partial s_3}{\partial s_1} \right) = F \quad (27)$$

F, genelleştirilmiş kuvvettir ve tahrik edilen bağlantı tarafından uygulanan kuvvetle ilgilidir. Sonuç olarak sistemin hareketini tanımlayan diferansiyel denklem aşağıdaki gibi verilmiştir: Hareket denklemi ifadesinin içerisinde yer alan türev ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial M}{\partial s_2} = -\frac{2(m_2 d_1^2 + I_2) \cos^2(\theta_1)}{s_2^3} + \frac{I_3 a_1^2 (\cos(4\theta_1) - 1)}{4a_2^2 s_2^3 \sin^2(\theta_2)} - \frac{2m_4 a_1 \cos(\theta_1) \sin(\theta_1 - \theta_2) (s_2 \sin(\theta_2) + a_1 \cos(\theta_1) \sin(\theta_1 - \theta_2))}{s_2^3 \sin^2(\theta_2)} \quad (28)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \theta_1} = m_2 \sin(2\theta_1) - \frac{(m_2 d_1^2 + I_2) \sin(2\theta_1)}{s_2^2} - \frac{I_3 a_1^2 \sin(4\theta_1)}{a_2^2 s_2^2 (\cos(2\theta_2) - 1)} + \frac{2m_4 a_1 \cos(2\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_1 - \theta_2) (s_2 \sin(\theta_2) + a_1 \cos(\theta_1) \sin(\theta_1 - \theta_2))}{s_2^2 \sin^2(\theta_2)} \quad (29)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \theta_2} = -\frac{I_3 a_1^2 \cos^2(\theta_1) \cos(\theta_2) \sin^2(\theta_1)}{a_2^2 s_2^2 \sin^3(\theta_2)} + \frac{2m_4 a_1 \sin(2\theta_1) (s_2 \sin(\theta_2) + a_1 \cos(\theta_1) \sin(\theta_1 - \theta_2))}{s_2^2 \sin(\theta_2) (\cos(2\theta_2) - 1)} \quad (30)$$

$$\ddot{s}_1 = M^{-1}(s_2, \theta_1, \theta_2) \left[F + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial M}{\partial s_2} \cdot \frac{\partial s_2}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} \right) \dot{s}_1^2 - \left(\frac{\partial M}{\partial s_2} \cdot \frac{\partial s_2}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} \right) \dot{s}_1 - g \left(\frac{\partial V}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial s_3} \cdot \frac{\partial s_3}{\partial s_1} \right) \right] \quad (31)$$

Tablo 1. Parametreler

	Doğrusal Eyletici	Kanal Açılmış Destek Parçası	Solid Destek Parçası	Bacak
Kütle	$m_1 = 0.35 \text{ (kg)}$	$m_2 = 0.31 \text{ (kg)}$	$m_3 = 0.55 \text{ (kg)}$	$m_4 = 1 \text{ (kg)}$
Kütle Atalet Mom.		$I_2 = 0.000692 \text{ kgm}^2$	$I_3 = 0,000811 \text{ kgm}^2$	
Ağırlık Merkezi		$d_1 = 0.12 \text{ m}$	$d_2 = 0.07 \text{ m}$	
Boyu	$c_3 = 0.23$	$a_1 = 0.195 \text{ m}$	$a_2 = 0.143 \text{ m}$	$c_6 = 0.35 \text{ m}$

$$\frac{\partial V}{\partial s_1} = g \left(\frac{1}{2} m_1 + m_2 + m_3 + m_4 \right) \quad (32)$$

$$\frac{\partial V}{\partial q_1} = g \cos(\theta_1) (d_1 m_2 + a_1 m_3 + a_1 m_4) \quad (33)$$

$$\frac{\partial V}{\partial q_2} = g \cos(\theta_2) (d_2 m_3 + a_2 m_4) \quad (34)$$

$$\frac{\partial V}{\partial s_3} = -g m_4 \quad (35)$$

3. Önerilen Kontrol Yöntemi

Önerilen kontrol yöntemi, doğrusal ikinci dereceden regülatöre sahip hesaplamalı tork kontrolü (computed torque controller) yöntemine dayanmaktadır. Bu yöntem doğrusal olmayan sistemleri doğrusal sistemlere dönüştüren bir geri beslemeli doğrusallaştırma tekniğidir ve daha sonra sistemin kontrol hedefine ulaşmak için doğrusal kontrol tasarım teknikleri kullanılabilir. Hareket denklemi için kontrol girişi, hesaplamalı tork kontrolü yöntemi (36) numaralı denklemde verilmektedir.

Burada s_1 referans giriş ve u da sonuçta ortaya çıkan doğrusal modelin kontrol yasasıdır ve doğrusal ikinci dereceden düzenleyici problemi olarak tasarlanacaktır. Bu kontrol yasasını dinamik modelde yerine koyarak, kapalı çevrim sisteminin hata denklemi (37) elde edilir.

$$M(s_2, \theta_1, \theta_2)(0 - u) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial M}{\partial s_2} \cdot \frac{\partial s_2}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} \right) \dot{s}_1^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial s_2} \cdot \frac{\partial s_2}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial M}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} \right) \dot{s}_1 + g \left(\frac{\partial V}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial s_1} + \frac{\partial V}{\partial s_3} \cdot \frac{\partial s_3}{\partial s_1} \right) = F_{est} \quad (36)$$

$$\ddot{e} = 0 - \ddot{s}_1 = u(t)$$

$$\dot{e} = \dot{s}_{1,ref} - \dot{s}_1 \quad (37)$$

$$e = s_{1,ref} - s_1$$

(37) denklemi durum uzayı modelinde şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (38)$$

Burada

$$x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Bilindiği gibi doğrusal ikinci dereceden regülatör, aşağıdaki performans endeksini en aza indirmek için en uygun çözümü sunma hedefi taşımaktadır:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (39)$$

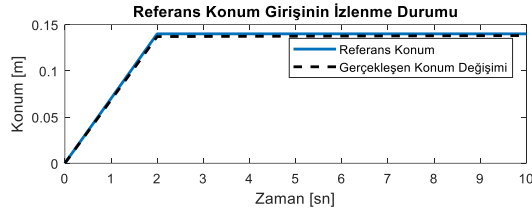
R (1×1), Q (2×2) pozitif tanımlı ve simetrik matrislerdir. Sırasıyla kontrol ağırlık matrisini ve durum ağırlık matrisini temsil ederler. Denklem (16)'da verilen sistem için lineer kontrol girişi $u(t)$ aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$u(t) = -Kx = -R^{-1}B^T P x \quad (40)$$

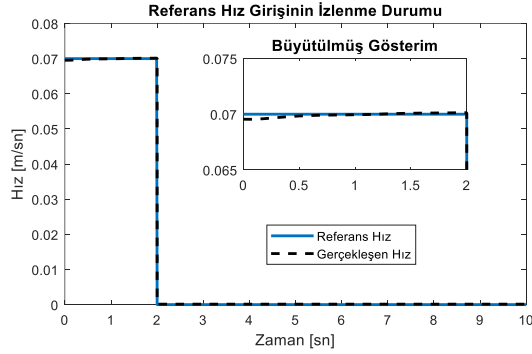
Burada $K = [k_1 k_2]$ optimal kazançların bir vektörüdür ve P (2×2) cebirsel Riccati denkleminin çözümüdür. Hata dinamiği kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olduğundan, optimal kontrol yasası sistemin asimptotik kararlılığını sağlayabilir.

4. Benzetim Çalışması ve Grafıksel Gösterimler

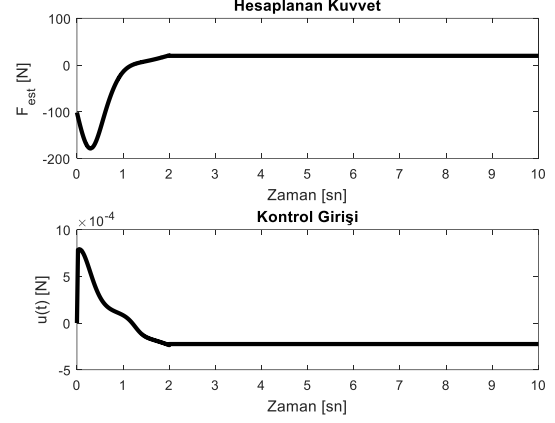
Tablo 1'de verilen parametreler kullanılarak yapılan benzetim çalışması sonucunda konum ve hız için istenen referans girişin izlenebildiği görülmüştür. Şekil 3 ve Şekil 4 sırasıyla istenen hareket profilinin izlenebilme durumunu konum ve hız girişi açısından göstermektedir. Şekil 4'de fark grafik üzerinde net görülmediği için grafiğin içinde büyütülmüş gösterim yapma gereği ortaya çıkmıştır.



Şekil 3: İstenen hareket profilinin izlenme durumu. (Konum)



Şekil 4: İstenen hareket profilinin izlenme durumu. (Hız)



Şekil 5 : Hesaplanan kuvvet ve kontrol girişinin zamana bağlı değişim.

Şekil 5 tahmin edilen dış bozucu girişin zamana bağlı değişimini ve üretilen kontrol girişini göstermektedir. Mekanizma üzerine gelen yerçekimsel kuvvetler nedeniyle hesaplanan kuvvetin ve kontrol girişinin sabitlendiği ancak sıfırlanmadığı görülmektedir.

5. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Çalışmanın devamı gerçek zamanlı uygulama şeklinde devam edecektir. Bu nedenle uygulanması kolay bir kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Benzetim sonuçları önerilen kontrolün çalıştığını göstermektedir. Gelecek çalışmadaki gerçek zamanlı uygulamanın aynı başarıyı göstereceği öngörülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Tübitak 1512-BİGG destekleri kapsamında, 2220176 proje numaralı "Akıllı Robot Yürüteç" ve OMÜ-BAP, PYO.MUH.1908.23.010 numaralı "Tekerekli (hasta/yaşlı) yürüteçleri için kullanıcının düşme başlangıcını algılamaya ve düşme önlemeye yönelik destek sistemleri" projeleri çıktısıdır.

Kaynakça

- [1] J. A. Stevens, K. Thomas, L. Teh, and A. I. Greenspan, "Unintentional Fall Injuries Associated with Walkers and Canes in Older Adults Treated in US Emergency Departments," *Journal of the American Geriatrics Society*, vol. 57, no. 8, pp. 1464-1469, Aug 2009.
- [2] N. Bilgin, T. Tutkan, Y. C. Er, and E. Nayır, "Lateral Support Mechanisms for Smart Walkers to Prevent Sideways Rollover," in *New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications*, Cham, 2023, pp. 229-239: Springer Nature Switzerland.
- [3] F. L. Lewis, D. M. Dawson, and C. T. Abdallah, *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*. CRC Press, 2003.
- [4] S. Kilicaslan, S. K. Ider, M. K. Ozgoren, and Asme, "Trajectory tracking control of flexible manipulators considering modeling discrepancy," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Orlando, FL, 2005, pp. 1457-1467, 2005.

- [5] M. K. Özgören, *Robot Manipulatörlerin dinamiği ve kontrolü*. Maktek, 2016.
- [6] M. Alhaddad, A. Joukhadar, and B. Shaukifeh, "Adaptive Control of a Manipulator with Closed Kinematic Chains and Linear Actuator," in *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 2021, pp. 2611-2615.
- [7] bibus.com.tr. (2023, 04/01/2023). *The linear actuator's catalog*. Available:
https://www.bibus.com.tr/fileadmin/editors/countries/bitur/Bansbach_EasyE-Line_Katalog.pdf