

Eksik Tahrikli Seri Eklemlı Bir Robotun İzdüşüm Yöntemi ile Konum Kontrolü

Seda Korkmaz, Berke Gür
Mekatronik Mühendisliği
Bahçeşehir Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
Email: seda.korkmaz, berke.gur@eng.bau.edu.tr

Özetçe — *Bu çalışmada, eksik tahrikli robot manipülatörlerinin izdüşüm operatörü ile dinamik analizi ve kontrolü üzerinde durulmuştur. Kontrolörler PHANTOM Omni robot için Matlab - VREP yazılımları kullanılarak test edilmiştir. Herhangi bir eklem kontrol girişi uygulanmaması ile o eklem yapay olarak pasif hale getirilerek, eksik tahrikli robot kontrolü çalışılmıştır. Pasif olan eklemdaki torku karşılamak için, onunla aynı yönde tork üreten aktif eklem kullanılmıştır. Elde edilen denetleyiciler daha sonra Omni robot kullanılarak deneysel olarak uygulanmıştır.*

Anahtar Kelimeler — *Eksik tahrikli robotlar, izdüşüm operatörü, dinamik modelleme, robot kontrolü.*

I. GİRİŞ

Pasif ya da elastik eklemler, esnek kollar ve robot dinamiğinden kaynaklanan kontrol edilemeyen serbestlik derecesi gibi nedenler ile robotlar, eksik tahrikli olarak tanımlanırlar. Kontrol giriş sayısının robotun serbestlik derecesinden az olması, eksik tahrikli manipülatörlerin kontrolünü zorlu bir problem haline getirmektedir.

Bu bildiriye, pasif eklem nedeni ile eksik tahrikli olan robot manipülatörlerinin kontrolü için izdüşüm operatörü ile dinamik çözüm ve denetleyici tasarımları üzerinde durulmuştur. İzdüşüm yöntemi ile dinamik çözüm, [1] giriş kuvvetinin izdüşüm operatörü ile harekete ve ortam tepki kuvvetlerine neden olan bileşenlerine ayrılması temeline dayanır. Bu yöntem, hareket ve kuvvet için iki ayrı geri beslemeli kontrol şemasının geliştirilebildiği ve hareketin bilinmesi ile kuvvetlerin de öngörülebildiği bir formülasyon sunmaktadır. Eklem uzayında, hareketi bir yüzey ile sınırlanmış eksik tahrikli robotların kontrolleri, tepki kuvvetlerinin pasif eklemdaki hareketi telafi edecek şekilde tasarlanması ile sağlanır. [2]

Görev uzayında konum kontrolünde ise temel amaç, uç işlevcinin hedef yörüngeyi olabildiğince düşük bir hata ile takip etmesini sağlayan bir denetleyici tasarlamaktır. İzdüşüm yöntemi ile görev uzayında konum kontrolü için, öncelikle robot dinamiği izdüşüm yöntemine göre tanımlanır. Daha sonra pasif olan eklemdaki hareketi karşılayacak uygun kontrol girişleri hesaplanarak aktif eklemlere uygulanır. [3] Bu yöntem, hareketi kısıtlanmış robotlar ile birlikte, robotta yeterli sayıda kontrol girişi

bulduğunda hareket kısıtlaması olmayan durumlar için de uygulanabilir.

Eksik tahrikli robotların kontrolü için yapılan çalışmalarda, pasif eklemin hedeflenen açısız konuma ulaştığında frenlenerek durdurulması sıklıkla başvurulan yöntemlerden biridir. [4] Bu yöntemlerde pasif eklemin frenleme mekanizmasına sahip olması beklenmekte, aynı zamanda pasif eklemin tamamen hareketsiz hale gelmesi nedeni ile kısıtlanan çalışma alanında hareket planlaması güçleşmektedir. Bu çalışmada tercih edilen izdüşüm yöntemi ile robotlar, pasif eklemden herhangi bir frenleme mekanizması olmaksızın kontrol edilebilir.

Bu çalışmada, test için kullanılan denetleyicilerin elde edilmesi için öncelikle kontrol yönteminin temel aldığı dinamik formülasyon özetlenmiştir. Denetleyicilerin uygulandığı robot manipülatörü olan PHANTOM Omni için kinematik ve dinamik analizler açıklanmıştır. Son olarak elde edilen denetleyicilerin Matlab/Simulink-VREP benzetim ortamlarında ve deneysel olarak testleri yapılmıştır.

II. İZDÜŞÜM OPERATÖRÜ İLE EKSİK TAHRİKLİ ROBOT KONTROLÜ

Eksik tahrikli robotlarda konum kontrolü yapılırken denetleyiciler, kontrolsüz serbestlik derecesindeki hareketi telafi edecek şekilde tasarlanır. İzdüşüm operatörü yöntemi ile eklem uzayında kontrol yapılırken tepki kuvvetleri kullanılırken, görev uzayında kontrol için aktif eklemlerdeki harekete neden olmayan sıfır uzay torkları kullanılır. İzdüşüm ters dinamiği (1)'de verilmiştir. [2]

$$M_p \ddot{q} + P(b + g) - D_p \dot{q} = P\Gamma \quad (1)$$

Denklemden M_p robotun bir yüzey ile kısıtlanması durumunda kütle matrisini ifade edip $M_p = PM + I - P$ ile bulunur. P izdüşüm operatörü, kısıt Jacobian vektörü J_c kullanılarak, $P = I - J_c^+ J_c$ eşitliği ile hesaplanır. b Coriolis ve merkezkaç kuvvetini, g yerçekimi ivmesini, D_p izdüşüm operatörünün zamana göre türevini ve Γ eklem giriş torklarını temsil etmektedir. J Jacobian matrisini göstermek üzere, eklem uzayında ifade edilen bu eşitliğin her iki

tarafının JM_p^{-1} ile çarpılması sonucu denklem, görev uzayına (2)'deki gibi transfer edilir:

$$\ddot{x} - \dot{J}\dot{q} + JM_p^{-1}(P(b+g) - D_p\dot{q}) = JM_p^{-1}P\Gamma \quad (2)$$

(2)'de $\dot{J}\dot{q} = \ddot{x} - \dot{J}\dot{q}$ dönüşümü kullanılarak robot eklemlerindeki ivmelerin uç işlevciye ivmeye dönüşümü yapılmıştır. Sadeleştirme için $\Lambda_c = J^{-T}P^{-1}M_pJ^{-1}$ ifadesi kullanılarak (3) elde edilir:

$$\Lambda_c\ddot{x} + \Lambda_c(JM_p^{-1}P(b+g) - (\dot{J} + JM_p^{-1}D_p)\dot{q}) = F \quad (3)$$

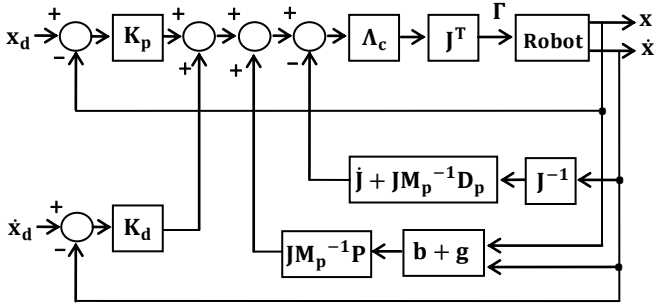
Görev uzayında uç işlevci kuvveti olarak hesaplanan kontrol girişleri, J^T ile eklem torklarına (4)'teki gibi dönüştürülür. [3]

$$\Gamma = J^TF \\ = J^T(\Lambda_c\ddot{x}_{des} + \Lambda_c(JM_p^{-1}P(b+g) - (\dot{J} + JM_p^{-1}D_p)\dot{q})) \quad (4)$$

Hareket kontrolü görev uzayındaki konum ve hız hataları temel alınarak PD denetleyici şeklinde (5)'teki gibi tasarlanır:

$$\ddot{x}_{des} = K_p(x_d - x) + K_d(\dot{x}_d - \dot{x}) \quad (5)$$

İzdüşüm dinamiği kullanılarak tasarlanan bir denetleyicinin blok diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: İzdüşüm yöntemi ile kontrol

İzdüşüm dinamiği ile tasarlanan denetleyicilerin eksik tahrikli manipülatörlerin kontrolünde kullanılması için yukarıdakilere ek olarak sıfır uzay torkları tanımlanır. $N = I - J^TJ^{\#}$ ve $J^{\#} = (JM_p^{-1}PJ^T)^{-1}JM_p^{-1}P$ olmak üzere, sıfır uzay torklarının dahil edildiği çözüm (6)'da verilmiştir:

$$\Gamma = J^TF + N\Gamma_0 \quad (6)$$

Robotta hangi eklemin pasif olduğu B matrisi ile tanımlanır; tüm eklemleri aktif olan bir robot için B matrisi robotun eklem sayısı boyutunda bir birim matristir. Eksik tahrikli bir robotun konum kontrolünü gerçekleştirebilmesi için (7) sağlanmalıdır.

$$J^TF + N\Gamma_0 = BJ^TF + BN\Gamma_0 \quad (7)$$

(7)'den sıfır uzay torkları Γ_0 aşağıdaki gibi bulunur:

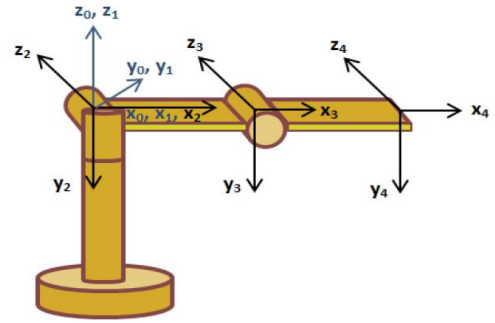
$$\Gamma_0 = -((I - B)N)^+(I - B)J^TF \quad (8)$$

Son olarak sıfır uzay torkları (6)'da yerine konularak eksik tahrikli robot için kontrolör (9)'daki gibi tanımlanır:

$$\Gamma = (I - N[(I - B)N]^+)J^TF \quad (9)$$

III. ROBOTUN KİNEMATİK VE DİNAMİĞİ

Phantom Omni robot [5], üç aktif dönel eklem sahip seri eklemli bir robot olup, bilek kısmında bulunan üç pasif eklem ile birlikte toplamda 6 serbestlik derecesine sahiptir. Bu çalışmada aktif olan ilk üç eklem göz önünde bulundurulmuştur. Robotun kinematik ile dinamik analizlerinde temel alınan koordinat sistemi yerleşimi Şekil 2'de verilmiştir.

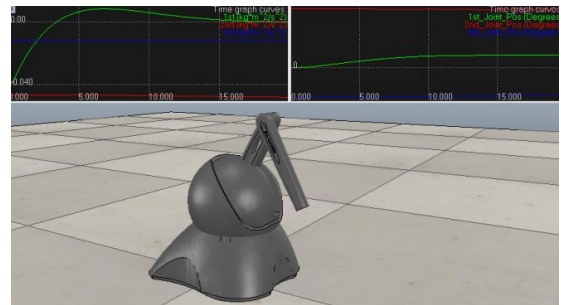


Şekil 2: Robotun koordinat sistemi yerleşimi

Denavit-Hartenberg yöntemi ile robotun ileri kinematiği, böylelikle uç işlevcinin konum ve yönelim eşitlikleri bulunmuştur. Newton-Euler yöntemi ile robotun dinamik parametreleri olan kütle matrisi, Coriolis ve merkezkaç vektörleri ile yerçekimi vektörleri belirlenmiştir.

IV. BENZETİM VE DENEYLER

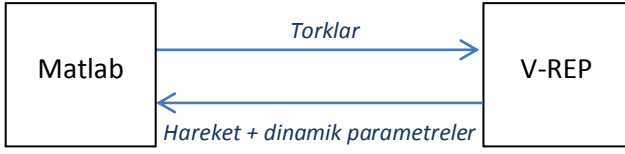
Robotların hareketlerini benzetim sırasında yakından gözlemlemek, dinamiklerinin benzetimi ve denetleyici tasarımında oldukça önemlidir. VREP benzetim yazılımı, robotun mekanik modelini görselleştirilirken, aynı zamanda modellenen dinamiğin ve tasarlanan denetleyicilerin katı model üzerindeki sonuçlarını da gözlemleme fırsatı vermektedir. PHANTOM Omni robotun VREP modeli Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: VREP benzetim ortamı

VREP uzaktan uygulama programlama arabirimi (remote API) ile sunucu-istemci altyapısını kullanarak harici bir

programlama dili ile kontrol edilebilmektedir. Böylelikle denetleyiciler Matlab ile tasarlanarak eş zamanlı olarak VREP üzerinde test edilmiştir. Matlab-VREP arasındaki iletişim Şekil 4’teki gibi özetlenebilir:

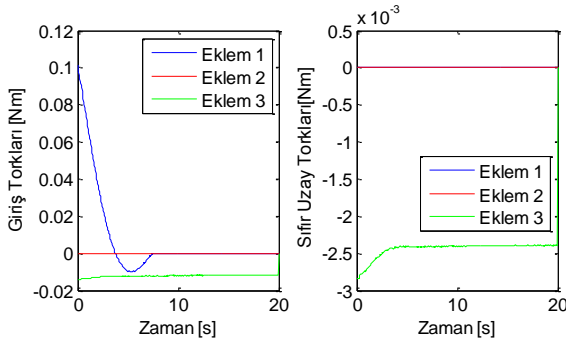


Şekil 4: Matlab-VREP iletişimi

Uç işlevcinin z-yönündeki hareketi hareket sınırı olarak belirlenip yalnızca x-y düzlemi üzerinde hareket edebilmesi için, robotun ileri kinematığı ile elde edilen z-yönündeki öteleme eşitliği kullanılır. Bu durumda z-yönünde hareketi kısıtlayan denklem (10)’daki gibi olmalıdır:

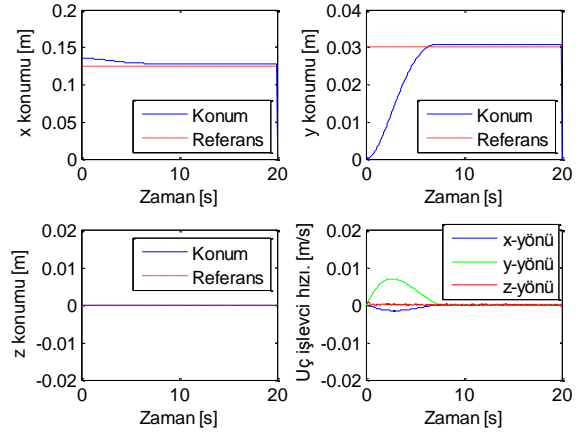
$$z(t) = \phi(t) = -l_1 s_2 - l_2 s_{23} = 0 \quad (10)$$

Kısıt Jacobian vektörü, (10)’un eklem değişkenlerine göre türevleri alınarak bulunur. Daha sonra izdüşüm matrisi P, kısıt Jacobian vektörü kullanılarak hesaplanır. Eksik tahrikli robot kontrol şemasını robotta test etmek üzere, B matrisi robotun 2. eklemine pasif yapacak seçilmiştir. Bu durumda uç işlevcinin x- ve y-yönünde $x(0)=-0.01$ m ve $y(0)+0.03$ m hareketi için 1 ve 3 numaralı eklemlere gönderilen giriş torkları ve 2 numaralı pasif eklem hareketini telafi eden sıfır uzay torkları Şekil 5’te verilmiştir.



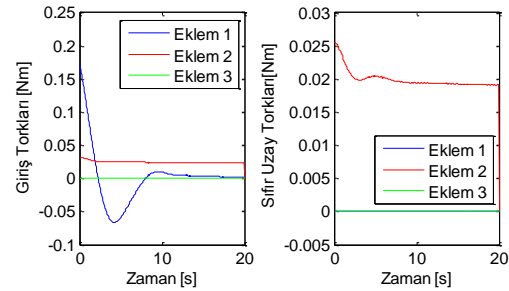
Şekil 5: 2 numaralı eklem pasif olması durumunda eklem torkları ve sıfır uzay torkları

Kontrolör (9) kullanılarak, pasif eklem hareketini telafi edip uç işlevciyi hedef konuma götürecektir şekilde tasarlanmıştır. Sonuç olarak pasif olan 2 numaralı eklem herhangi bir tork uygulanmıyorken, onunla aynı yönde tork üreten 3 numaralı eklemde sıfır uzay torku olduğu görülmüştür. PD kontrolör katsayılarının deneme yanılma ile sırasıyla 70 ve 150 olarak seçildiği durumda, sabit referans için kontrolör performansı Şekil 6’da verilmiştir. Uç işlevci, hedef konumuna kalıcı durumda x-ekseninde 2×10^{-4} m, y-ekseninde 5×10^{-5} m hata ile ulaşmaktadır. Robotun hedef konumunun x-eksenine göre y-ekseninde daha büyük olması nedeniyle, y-yönünde eklem 1 ile uygulanan kuvvetin daha fazla olduğu ve sonuçta robotun bu yönde daha hızlı hareket ettiği görülmektedir.



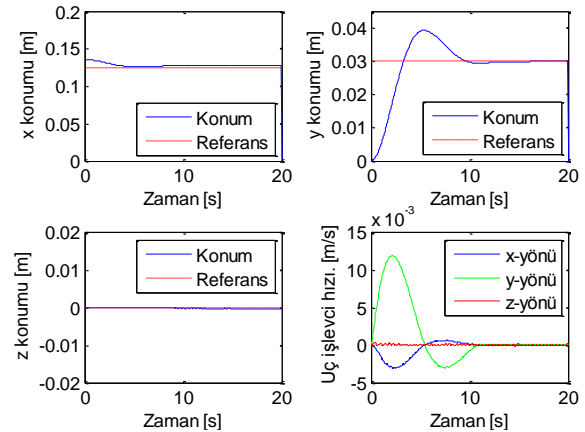
Şekil 6: 2 numaralı eklem pasif olması durumunda uç işlevci konum ve hızları

B matrisi robotun 3. eklemine pasif yapacak seçildiğinde, aynı hedefe ulaşmak için aktif olan 2. eklem üzerinde pasif eklem hareketini telafi etmek üzere sıfır uzay torkları oluşur. Giriş ve sıfır uzay torkları Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7: 3 numaralı eklem pasif olması durumunda eklem torkları ve sıfır uzay torkları

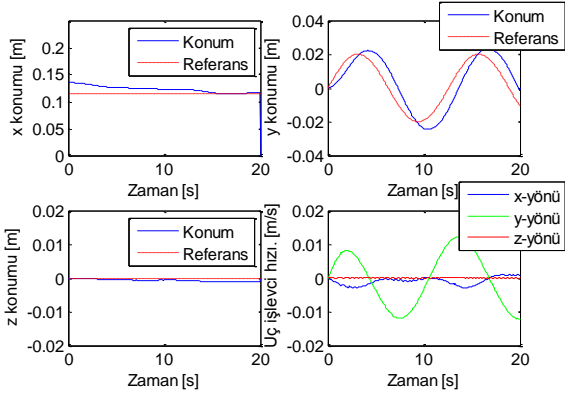
Uç işlevci konum ve hızları P kontrolör 70, D kontrolör 80 olarak seçildiğinde Şekil 8’deki gibi bulunmuştur. Uç işlevci x- ve y-eksenlerindeki konum hedeflerine kalıcı durumda 1×10^{-4} m ve 4×10^{-5} m hata ile ulaşmaktadır.



Şekil 8: 3 numaralı eklem pasif olması durumunda uç işlevci konum ve hızları

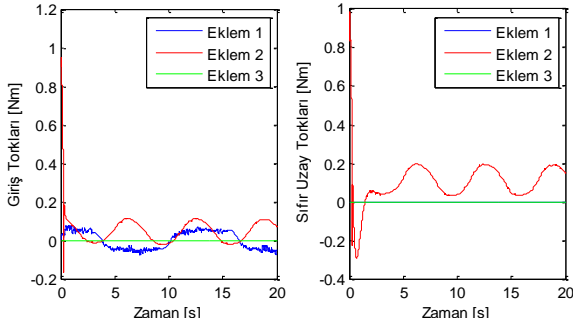
Kontrolörün zamanla değişen referans için performansı Şekil 9’da verilmiştir. 3 numaralı eklem pasif iken y-yönünde $0.02 \times \sin(0.5t)$ m, x-yönünde sabit $x(0)=-0.02$ m

hedef yörüngeler olarak belirlenmiştir. Zamanla değişen yörüngeyi takip ederken hatanın 7×10^{-4} m'ye kadar arttığı görülmüştür.

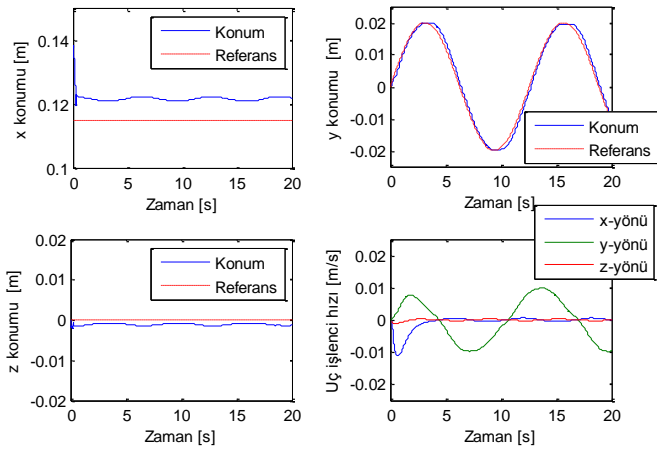


Şekil 9: 3 numaralı eklem pasif olması durumunda uç işlevci konum ve hızları

Deney için motorların DAC değerleri ile giriş torkları arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılmış ve sürtünme kuvvetleri ihmal edilmiştir. Bilgisayar üzerinden gerçek zamanlı kontrol için HIL API aracı, yazılım olarak Matlab/Simulink kullanılmıştır. Zamanla değişen referans için giriş ve sıfır uzay torkları Şekil 10'da, kontrolör performansı Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10: Robotun eklem giriş torkları ile sıfır uzay torkları



Şekil 11: Uç işlevci konum ve hızları

3 numaralı eklem pasif iken x-yönünde hata yaklaşık 8×10^{-4} m'ye kadar artmaktadır. VREP ile kıyaslandığında hatanın x-yönünde arttığı, ancak zamanla değişen yörüngeyi takip ederken maksimum hatanın yaklaşık 2×10^{-5} m olduğu görülmektedir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, PHANTOM Omni robot için herhangi bir eklem kontrol girişi uygulanmaması ile o eklem yapay olarak pasif hale getirilerek, eksik tahrikli robot kontrol şemalarının uygulaması açıklanmıştır. Pasif olan eklemdaki torku karşılamak için, onunla aynı yönde tork üreten aktif eklem kullanılmıştır. PHANTOM Omni robotta ikinci ve üçüncü eklemler aynı yönde tork üretmektedir. Bu nedenle herhangi biri pasif olarak seçildiğinde kontrol aktif olan diğer eklem ile sağlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, pasif eklemle kontrol yöntemi ile hedef konumlara kalıcı durumda milimetre düzeyinde hatalarla varılabildiğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

- [1] F. Aghili, "Inverse and direct dynamics of constrained multibody systems based on orthogonal decomposition of generalized force," *Proc. IEEE Conf. Robot. Autom.*, s. 4035–4041, Taipei, Taiwan, Eylül 2003.
- [2] F. Aghili, "A unified approach for inverse and direct dynamics of constrained multibody systems based on linear projection operator: applications to control and simulation," *IEEE Transactions on Robotics*, 21(5), s. 834–849, Ekim 2005.
- [3] M. Mistry, L. Righetti, "Operational space control of constrained and underactuated systems," *Proc. Robotics: Science and Systems*, Los Angeles, CA, Haziran 2011.
- [4] M. Bhave, S. Janardhanan, L. Dewan, "Configuration Control of Planar Underactuated Robotic Manipulator using Terminal Sliding Mode," *4th IFAC Conf. on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems*, s. 148–153, India, Şubat 2016
- [5] M. H. Koul, P. Kumar, P. K. Singh, M. Manivannan, S. K. Saha, "Gravity compensation for PHANTOM Omni haptic interface," *1st Joint Int. Conf. on Multibody System Dynamics*, Lappeenranta, Finland, Mayıs 2010.