

DÜZLEMSEL ORTAK ROBOTİK MANİPÜLASYONDA YÖRÜNGE İZLEMEDE ROBUST KONTROL UYGULAMASI

Hürvet SARIKAYA¹, İbrahim UZMAY¹ ve Recep BURKAN²

¹Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 38039 Kayseri-TÜRKİYE

²Erciyes Üniversitesi Kayseri Meslek Yüksek Okulu, Elektronik Bölümü, 38039 Kayseri-TÜRKİYE

Özet: Bir cismin düzlemsel robot manipülatörle taşınmasında yörünge kontrolünü sağlamak amacıyla geliştirilen dinamik modelde, ortak manipülasyona katılan iki serbestlik dereceli manipülatör tutucuları ile cisim arasında bağıl hareket olmadığı kabul edilmiştir. Ortak manipülasyon sistemin dinamik modeli, cisim ile robot manipülatörler arasındaki etkileşim denklemlerinden yararlanarak geliştirilmiştir. Ortak manipülasyon dinamik model parametreleri; robot manipülatörler ve taşınan cismin atalet etkileri, Coriolis ve merkezkaç kuvvetleriyle, ağırlık kuvvetleri gibi parametrelerden meydana gelmektedir. Ortak manipülasyonda; taşınan cisim kavrama veya tutma işlemlerinde robot el ile tutucu arasındaki sürtünme, robot uzuvlarının esnekliği ve eklemlerdeki sürtünme kayıpları, kontrol işlemi dinamik modelin belirsizlikleri olarak dikkate alınmıştır. Düzlemde, verilen bir yörüngeyi izlemek amacıyla robust kontrol tekniği, geliştirilen modele uygulanarak optimum kontrol parametreleri araştırılmıştır. Söz konusu kontrol kuralının uygulanmasıyla, konum hatalarının oldukça düşük değerlere indirildiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Robotik, Yörünge İzleme, Düzlemsel Ortak Manipülasyon, Parametre Belirsizliği, Robust Kontrol

ROBUST CONTROL APPLICATION IN TRAJECTORY TRACKING PATH FOR PLANAR COOPERATIVE MANIPULATION

Abstract: In the case of handling an object by planar robot manipulators, for the purpose of developing the dynamic model concerning tracking control, it is assumed that there is no relative motion between the robot manipulators and object. The dynamic model of cooperative manipulation consists of the terms of link parameters, inertia of carried mass, Coriolis, centripetal and gravitational forces. In designing robust control structure, contact and friction constraints for grasping and bearing conditions, link's flexibility or such similar factors as various unmodeled dynamics are considered as the uncertainties. In the trajectory control for a given path, robust control algorithm has been applied to this model, and the appropriate control parameters that reduce tracking error have been investigated.

Key words: Robotics, Planar Cooperative Manipulation, Tracking Path, Parameter Uncertainty, Robust Control

1. Giriş

Robot manipülatörlerin endüstriyel uygulamalarında, uygun olmayan geometrik özelliğe sahip ve nispeten ağır cisimlerin veya iş takımlarının taşınmasında yada iş şartlarının gereği olarak, tek bir robot manipülatörün işin özelliğine bağlı olarak yetersiz kalması durumunda, birden fazla robot manipülatörün ortak kullanımı söz konusu olabilir. Dolayısıyla, bu tür sistemlerde uygulanabilecek kontrol teknikleri ve kontrol parametrelerinin belirlenmesi konusunda çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

İki robotlu ortak manipülasyon sisteminin dinamik modeli, cismin ve robot manipülatörlerin dinamik karakterleri göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Kurulan dinamik modelde robotların ortak çalışmasının modellenmesinde, model

sistem parametrelerindeki belirsizlikleri gidermek için adaptif kontrol tekniği uygulanmıştır. Robotlar tarafından cismin taşınması esnasında dinamik belirsizliklerden dolayı meydana gelen konum hataları adaptif kontrol tekniği ile büyük oranda giderilmiştir [1].

Manipülâtörlerin ve cismin dinamik karakterleri göz önüne alınarak, ortak manipülasyonun dinamik modeli elde edilmiş ve elde edilen dinamik modele karma pozisyon/kuvvet kontrol metodu uygulanmıştır. Böylelikle, ortak manipülasyonla cismin taşınmasında, konum ve kuvvet kontrol parametreleri araştırılmıştır [2].

Ortak robotik manipülasyon için uygun bir dinamik model oluşturabilmek amacıyla robot manipülâtörlerle cismin ortak hareketinde meydana gelecek kinematik sınırlamaların tam olarak belirlenmesi gereklidir. Kapalı kinematik zincirler içeren ortak manipülasyon için geliştirilen dinamik modelde, kinematik sınırlayıcıların analitik olarak bilindiği kabul edilmiştir [3].

Manipülâtör tutucuları ile cisim arasında bağıl hareket olmadığı kabul edilerek, manipülâtörlerle cismin ortak çalışmasının dinamik modelinin geliştirildiği bir çalışmada, iş ve atalet kuvvetlerine uygun tahrik momentleri tayin edilmiştir. Modelde görülen eksiklik ise, farklı cisimler için manipülâtör parametrelerinin yeniden belirlenmesi olarak açıklanabilir [4].

Ortak robotik manipülasyon sistemlerinde, robot eklem açısız değişkenlerinin kontrolünde master-slave metodu ilk olarak düşünülmüştür [5], [6]. Tek bir robotun gerçekleştiremeyeceği bir işin birden fazla robot ile yapılması ve her robotun kapasitesinin sınırlı olduğu kabul edilmiştir. Çok robotlu sistem için kinematik ve dinamik model elde edilmiş ve master-slave kontrol metodu uygulanmak suretiyle yörünge kontrolü gerçekleştirilerek, hatayı minimum yapan kontrol parametreleri araştırılmıştır [7].

Ortak robotik manipülasyon sisteminde, çok parmaklı tutucular üzerindeki çalışmalar içerisinde iki temel konu göz önüne alınmıştır. İlk olarak, iş parçasının kavrama işleminin planlaması yapılmış ve daha sonra nokta temas modeli göz önüne alınarak hesaplanmış tork tekniği algoritması uygulanmıştır. Uygulanan kontrol algoritmasında cismin dinamik modeli dikkate alınarak, konum/kuvvet karma kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu kontrol tekniği cisim ile el arasındaki kayma ve dönme hareketlerine kolayca uygulanabilecek şekilde geliştirilebilir [8].

Bu çalışmada ise, ortak çalışan iki serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan iki robot manipülâtörle cisim arasında bağıl hareket olmadığı kabul edilmiştir. Cismin tanımlı yörünge boyunca taşınması ile ilgili hareketin, Newton-Euler dinamik formülasyonu ile analizi gerçekleştirildi. Cisim ile ortak çalışan robot manipülâtörlerle ilgili dinamik model; cisim ile manipülâtörler arasındaki denge denklemlerinden hareketle kuruldu. Ortak manipülasyonda yer alan robot manipülâtörlerin eklem hareketleri robust kontrol tekniği kullanılarak istenilen şartlarda gerçekleştirilmiştir. Sözü edilen kontrol tekniğinin uygulanmasında, kontrol işlemini etkileyen model belirsizlikleri olarak taşınan cisim ile tutucular arasındaki kavrama olayının rijitliği, uzuv esneklikleri ve eklem yataklarındaki sürtünme kayıpları dikkate alınmıştır. Dolayısıyla, kontrol parametrelerinin belirlenmesinde yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur.

2. Ortak Manipülasyon Parametreleri

Ortak manipülasyona katılan manipülâtörlerin temel parametrelerinin yanısıra, cisim ve tutucularla ilgili parametreleri de açıklamak gereklidir. Bu amaçla, Z_i ile tanımlı manipülâtörlerin son uç noktasında bulunacak 3. bağıl referans eksen takımı tanımlanır. T_0 ise orijini cismin kütle merkezinde, eksenleri cismin atalet eksenleri ile özdeş bir eksen takımıdır. Ortak robotik manipülasyon modeli olarak; bir cismin, iki serbestlikli düzlemsel iki robot

manipülâtör tarafından taşınması model olarak seçilmiş ve ortak manipülasyonda temel parametreler ve eksen takımları Şekil 1' de verilmiştir.

Model parametreleri olarak;

T_i : Bağlı referans eksen takımı,

R_i : T_i sistemine göre T_0 sisteminin bağıl konumu,

R_i^o : Vektörel büyüklükleri, T_0 sisteminden T_i sistemindeki vektörlere dönüştüren dönüşüm matrisi,

A_1^i : Vektörel büyüklükleri, Z_i nin temel koordinat sisteminden Z_1 'in temel koordinat sistemindeki vektörlere dönüştüren dönüşüm matrisi,

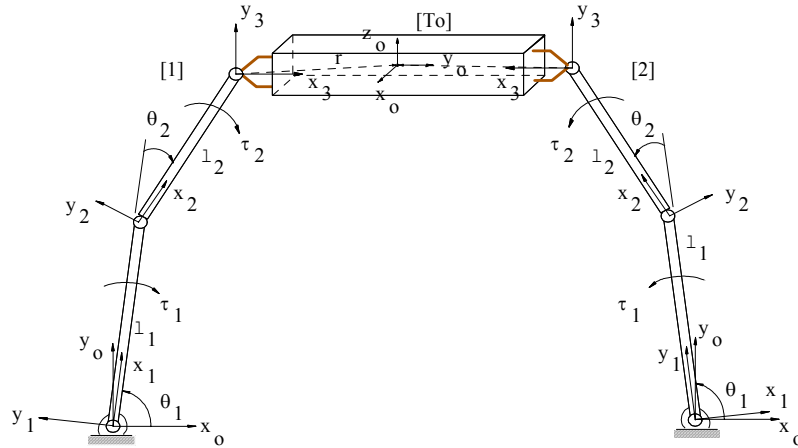
m_o : Cismin kütlesi,

Z_i : i. manipülâtör,

I_o : T_0 sisteminde cismin kütlelel atalet matrisi,

i : Tam sayılar kümesi (1,...n),

Her bir dönüşüm matrisi, eklem açılarının bir fonksiyonudur.



Şekil-1: Ortak robotik manipülasyon modeli [9].

3. Taşınan Cismin Hareket Denklemleri

Ortak manipülasyonda yer alan cismin, öngörülen yörüngede manipülâtörler tarafından uygulanan kuvvet ve torkların etkisi altındaki hareketi incelenecektir. Burada;

F_i, M_i : T_i sisteminde ve T_i orijinine indirgenen, Z_i manipülâtörü tarafından cisme uygulanan kuvvet ve tork vektörleri,

a_o, α_o, ω_o : T_0 sisteminde cismin sırasıyla lineer, açısal ivmesi ve açısal hızı,

R_M^3 : T_3 eksen takımı ile mutlak koordinatlar arasındaki dönüşüm matrisi,

g : Verilen sistemde yerçekimi ivmesi vektörü,

T_3 sisteminde, cisme etkiyen kuvvetlerin denge denklemi [10];

$$\sum_{i=1}^n R_3^0 R_i^{0T} \tilde{F}_i = m_o R_3^0 \tilde{a}_0 - m_o R_M^{3T} \tilde{g} \quad (1)$$

burada,

$$R_3^0 \tilde{a}_0 = \tilde{a}_3 + \tilde{\alpha}_3 \otimes \tilde{r}_1 + \tilde{\omega}_3 \otimes (\tilde{\omega}_3 \otimes \tilde{r}_1) \quad (2)$$

α_0 ve ω_0 büyüklükleri T_3 eksen takımına göre tanımlanacak olursa moment denklemi;

$$\sum_{i=1}^n R_3^0 R_i^{0T} (\tilde{M}_i - \tilde{r}_i \otimes \tilde{F}_i) = R_3^0 I_o R_3^{0T} \tilde{\alpha}_3 - (R_3^0 I_o R_3^{0T} \tilde{\omega}_3) \otimes (R_3^{0T} \tilde{\omega}_3) \quad (3)$$

Cisim için elde edilen hareket denklemlerini, genel karakterde matris formunda yazabilmek için aşağıdaki notasyonları tanımlayalım;

$$B_i = \begin{bmatrix} R_3^0 R_i^{0T} & O_3 \\ R_3^0 R_i^{0T} V_i & R_3^0 R_i^{0T} \end{bmatrix}, C^* = \begin{bmatrix} m_o I_3 & -m_o V_i \\ O_3 & I_o \end{bmatrix}, C = C^* J(q_1)$$

$$V_i = \begin{bmatrix} 0 & r_{iz} & r_{iy} \\ r_{iz} & 0 & -r_{ix} \\ -r_{iy} & r_{ix} & 0 \end{bmatrix}, D = C^* J(q_1, \dot{q}_1) - \begin{bmatrix} m_o R_M^{3T}(q_1)g - m_o K_1 \\ K_2 \end{bmatrix}$$

$$K_1(q_1) = \omega_1 x(\omega_1 x r_1), K_2(q_1) = (I_o \omega_1) x(R_1^{0T} \omega_1), f_i = \begin{bmatrix} F_i \\ M_i \end{bmatrix}$$

Yukarıda tanımlanan notasyonlara bağlı olarak cismin hareket denkleminin genel karakteri aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\sum_{i=1}^n B_i f_i = C \ddot{q}_1 + D \quad (4)$$

Burada,

B_i : Dönüşüm matrisi.

f_i : Cisme etkiyen kuvvet ve moment vektörü,

q_1 : Genelleştirilmiş koordinatlarda manipülatör eklem değişkenleri,

$C \ddot{q}_1$: 1'nolu robot eklem koordinatlarında eşdeğer atalet kuvveti,

D : Cismin coriolis, santrifüj ve yer çekim kuvvetleri,

I_3 : Üç satırlı sütün matrisi,

O_3 : Boş matris (sıfır matris) ,

J : Jacobian matrisi,

4. Yörünge İzlemede Robust Kontrol Tekniği Uygulanması

Ortak manipülasyonun dinamik modelini elde etmek için (4) nolu denklemlerle tanımlı hareket denklemleri ve bu hareketi sağlayacak manipülatörlerin dinamik modelleri birlikte dikkate alınarak, manipülatörün karşılaması gereken kuvvet-moment vektörü manipülatör dinamik modeline uyarlanırsa;

$$H_i(q_i)\ddot{q}_1 + h_i(q_i, \dot{q}_i) = P_i - J_i^T(q_i)f_i \quad (5)$$

f_i vektörünün (4) denkleminde bulunan değeri burada yerine konularak aşağıdaki sonuca ulaşılır.

$$(H_1 + J_1^T B_1^{-1} C)\ddot{q}_1 + h_1 + J_1^T B_1^{-1} D = P_1 + J_1^T B_1^{-1} \sum_{i=2}^n B_i (J_i^T)^{-1} P_i \quad (6)$$

Elde edilen son ifade de gerekli düzenleme ile ortak manipülasyonun dinamik modelini, genel karakteri ile matris formunda yazabiliriz [9].

$$X\ddot{q}_1 + x = \sum_{i=1}^n \varnothing_i P_i \quad (7)$$

burada;

$$\varnothing_i = J_1^T B_1^{-1} B_i (J_i^T)^{-1}$$

$$X = H_1 + J_1^T B_1^{-1} C$$

$$x = h_1 + J_1^T B_1^{-1} D$$

$X \ddot{q}_1$: Ortak manipülasyon sisteminin atalet kuvvetlerini,

x : Ortak manipülasyon sisteminin coriolis, santrifüj ve yerçekim kuvvetlerini,

$\varnothing_i P_i$: Ortak manipülasyon sisteminde, i. manipülatör tarafından sisteme uygulanması gereken tork değerini ifade eder.

Ortak robotik manipülasyonun genel denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$X(q)\ddot{q} + x(q, \dot{q}) = P_i \quad (8)$$

burada;

$$x(q) = h(q, \dot{q}) + G(q)$$

Robust kontrol tekniği uygulamasına yönelik olarak, dinamik modelde, manipülatör ve cisim parametreleri için π değerleri aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\pi_1 = 2m_1 l_1^2 + 2m_2 l_1^2 + I_{yy}$$

$$\pi_2 = 2m_2 l_2^2$$

$$\pi_3 = 2m_2 l_1 l_2$$

$$\pi_4 = I_{zz}$$

$$\pi_5 = 2m_1 l_1 g$$

$$\pi_6 = 2m_2 l_1 g$$

$$\pi_7 = 2m_2 l_2 g$$

$$\pi_8 = m_0$$

$$\begin{aligned}
H &= \begin{bmatrix} \pi_1 + \pi_2 + 2\pi_3 \cos(q_2) & \pi_2 + \pi_3 \cos(q_2) \\ \pi_2 + \pi_3 \cos(q_2) & \pi_2 + \pi_4 \end{bmatrix} \\
h &= \begin{bmatrix} -\pi_3 \sin(q_2) \dot{q}_2 & -\pi_3 \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \pi_3 \sin(q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \\
G &= \begin{bmatrix} (\pi_5 + \pi_6) \cos q_1 + \pi_7 \cos(q_1 + q_2) \\ \pi_7 \cos(q_1 + q_2) + \pi_8 g \end{bmatrix} \quad (9)
\end{aligned}$$

Denklem (8) ve (9) için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$X(q) \ddot{q} + h(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \pi = u \quad (10)$$

Burada π sabit olup, (8x1) boyutlu atalet vektörü, Y ise (2x8) boyutlu olup, bilinen eklem konumunun, hızının ve ivmenin fonksiyonu olan bir matris, u ise (2x1) boyutlu kontrol giriş vektörüdür. Robust kontrol kuralı aşağıdaki gibi seçilirse [11],[12],[13];

$$u = X(q) \ddot{q}_r + h(q, \dot{q}) \dot{q}_r + g(q) + K_D \sigma \quad (11)$$

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d + \Lambda \tilde{q} \quad \dot{\sigma} = \dot{\tilde{q}} + \Lambda \tilde{q} \quad \tilde{q} = q_d - q$$

K_D ve Λ pozitif tanımlı matris, σ hata fonksiyonudur. (11) denklemi $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r) \pi = u$ şeklinde yazılacak olursa Y matrisinin bileşenleri aşağıdaki değerlere dönüşür.

$$\begin{aligned}
y_{11} &= \ddot{q}_{r1} & y_{12} &= \ddot{q}_{r1} + \ddot{q}_{r2} & y_{13} &= \cos(q_2)(2\ddot{q}_{r1} + \ddot{q}_{r2}) + \sin(q_2)(\dot{q}_1 \dot{q}_{r2} + \dot{q}_1 \dot{q}_{r2} + \dot{q}_2 \dot{q}_{r2}) \\
y_{14} &= 0 & y_{15} &= g \cos(q_1) & y_{16} &= g \cos(q_1) & y_{17} &= g \cos(q_1 + q_2) & y_{18} &= 0 \\
y_{21} &= 0 & y_{22} &= \ddot{q}_{r1} + \ddot{q}_{r2} & y_{23} &= \cos(q_2) \ddot{q}_2 \ddot{q}_{r1} + \sin(q_2) (\dot{q}_1 \dot{q}_{r1}) & y_{24} &= \ddot{q}_2 \\
y_{24} &= 0 & y_{26} &= 0 & y_{27} &= g \cos(q_1 + q_2) & y_{28} &= 0 \quad (12)
\end{aligned}$$

Hesaplanan model ile manipulator dinamiği aynı yapıya sahip olduğu ve parametre değerlerinin tam olarak bilinmediği kabul edilirse, (11) nolu denklem aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$u = \hat{X}(q) \ddot{q}_r + \hat{h}(q, \dot{q}) \dot{q}_r + \hat{g} + K_D \sigma = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r) \hat{\pi} + K_D \sigma \quad (13)$$

$\hat{\pi}$ hesaplanan parametre değerlerini, \hat{X} , \hat{h} , \hat{G} ise hesaplanan robot parametrelerini göstermektedir. (13) denklemi (10) yerine yazılırsa aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\hat{X}(q)\dot{\sigma} + \hat{h}(q, \dot{q}) + K_D \sigma = -\tilde{X}(q)\ddot{q}_r - \tilde{h}(q, \dot{q})\dot{q}_r - \tilde{G}(q) = -Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r)\tilde{\pi} \quad (14)$$

$\tilde{\pi} = \hat{\pi} - \pi$ parametre hata vektörüdür. Hata aşağıdaki gibi ifade edilir ise;

$$\tilde{H} = \hat{H} - H, \quad \tilde{h} = \hat{h} - h, \quad \tilde{G} = \hat{G} - G \quad (15)$$

Lyapunov fonksiyonunu aşağıdaki gibi alırsak,

$$V(\sigma, \tilde{q}, \tilde{\pi}) = \frac{1}{2} \sigma^T H(q) \sigma + \tilde{q}^T \Lambda K_D \tilde{q} + \frac{1}{2} \tilde{\pi}^T K_\pi \tilde{\pi} > 0 \quad (16)$$

sistemin yörüngesi boyunca V ' nin zamana göre türevi alınırsa,

$$\dot{V} = -\dot{\tilde{q}}^T K_D \tilde{q} - \tilde{q}^T \Lambda K_D \Lambda \tilde{q} + \tilde{\pi}^T (K_\pi \dot{\tilde{\pi}} - Y^T(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r) \sigma) \quad (17)$$

denklem 18 in sonucu olarak, adaptif parametre değişim fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir [12].

$$\dot{\tilde{\pi}} = K_\pi^{-1} Y^T(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r) \sigma \quad (18)$$

Robust kontrol tekniği parametre yönüyle yukarıda tanımlanan adaptif kontrol parametresi ile aynı değerlere sahiptir. Ancak, robust kontrolde nominal kontrol giriş vektörü, u_0 , sabit parametre değerlerine göre belirlenmiş olup, değişken değildir. Dolayısıyla, parametre değerleri, adaptif kontrolde olduğu gibi değişken olmayıp sabittir. Yalnız parametre değerlerinde belirsizlik vardır ve belirsizlik aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\|\tilde{\pi}\| = \|\hat{\pi} - \pi\| \leq \rho \quad (19)$$

u , kontrol vektörü, u_0 , nominal kontrol vektörü göz önüne alınarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$u = u_0 + Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r) \tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r)(u_0 + \tau) + K_D \sigma \quad (20)$$

τ parametre belirsizliği olarak tanımlanan $\tilde{\pi}$ değerlerinden oluşan hatayı gidermek için tasarlanmış ek kontrol vektörüdür. (20) ifadesi, (10) denkleminde yerine yazılırsa, çeşitli işlemler sonucu aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$X_0(q)\dot{\sigma} + h_0(q, \dot{q})\sigma + G_0(q) + K_r = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r)(\tilde{\pi} + \tau) \quad (21)$$

$\varepsilon > 0$ değerleri için aşağıdaki eşitliğe göre τ kontrol vektörü seçilirse [13];

$$\tau = \begin{cases} -\rho \frac{Y^T r}{\|Y^T r\|} & \text{eğer } \|Y^T r\| > \varepsilon \\ -\rho \frac{Y^T r}{\varepsilon} & \text{eğer } \|Y^T r\| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (22)$$

Ortak cismin ağırlığı ve robotun parametre değerleri bilindiği kabul edilerek, atalet parametreleri Tablo1' de verilmiştir.

Robust kontrol tekniğinin ortak manipülasyona uygulamasında, modele uygulanması güçlük gösteren çeşitli etkiler için aşağıda açıklanan yaklaşım esas alınacaktır.

Robot manipülatör eklemlerinde ve tutucu ile cisim arasında meydana gelen sürtünme kayıpları ve robot kollardaki esneklikten dolayı oluşan kayıplar bir belirsizlik meydana getirmektedir. Bu belirsizlikleri giderebilmek için, manipülatör eklemlerindeki sürtünmeleri karşılamak amacıyla, eklemlere %5 'lik ilave bir tork, çeşitli deneysel sonuçlara dayalı olarak esneklik kayıplarını karşılamaya yönelik olarak da eklemlere %5 'lik ilave tork uygulanmalıdır[14]. Robotik manipülasyon sisteminde toplam sürtünme ve esneklik kayıplarını karşılayabilmek için 2 nolu robot eklemlerine %10 'luk ilave bir tork ve 1 nolu robot manipülatör eklemlerinde ise kendi sürtünme ve esneklik kayıpları ile 2 nolu robot manipülatör kayıplarını karşılamak amacıyla %12 'lik ilave tork uygulanması gerektiği belirlenmiştir [14].

Robotik manipülasyonda taşınan cismin kütle sınır değeri ise; cismin dört tutucu çene ile tutulduğu, tutucu ile cisim arasındaki sürtünme katsayısının 0.2 olarak seçilmesi ve cismi tutmak için birim kuvvet uygulanması durumunda, taşınan cismin kütlesi için üst sınır değeri olarak aşağıdaki sınır tanımlanabilir.

$$\Delta m_0 \leq 2.616 \quad (23)$$

Belirsizliklerden dolayı uygulamamız gereken ilave eklem tork değerlerinin, manipülatör kütleleri ve taşınan cismin kütlesine ilave kütle artımı ile karşılandığı kabul edilmiştir. Buna bağlı olarak, manipülatör uzuvları için parametre değişim aralığı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$0 < \Delta m_1 < 0.48 \quad (24)$$

$$0 < \Delta m_2 < 0.50$$

Burada hesaplanan kontrol parametre vektörleri π_0 , (23) ve (24) eşitliğinde tanımlanan belirsizlik sınırı dikkate alınarak Tablo 1 ve Tablo 2 değerleri hesaplanır. Tablo 3 ise, Tablo 2 ile Tablo 1 arasındaki farkı şeklinde hesaplanan ρ değerlerini göstermektedir.

Tablo 1. Ortak manipülasyon sistemindeki robot manipülatörlerin hesaplanan parametre değerleri.

$\hat{\pi}_1$	$\hat{\pi}_2$	$\hat{\pi}_3$	$\hat{\pi}_4$	$\hat{\pi}_5$	$\hat{\pi}_6$	$\hat{\pi}_7$	$\hat{\pi}_8$
1.5018	0.32	0.4	0.012	2	1	0.8	0.5

Tablo 2. Ortak manipülasyon sistemindeki robot manipülatörlerin nominal parametre değerleri.

π_{01}	π_{02}	π_{03}	π_{04}	π_{05}	π_{06}	π_{07}	π_{08}
2.3524	0.48	0.6	0.165	3.2	1.5	1.2	0.6875

Tablo 3. Belirsizlik sınırları

ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8
0.8507	0.16	0.2	0.045	1.2	0.5	0.4	0.1875

5. Örnek Tasarım Sonuçları

İki serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan iki robot manipülatörle cismin taşınması hareketi ile ilgili olarak geliştirilen dinamik modelin bazı önemli özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Ortak manipülasyon modelinin tek robotlu manipülasyon modeliyle büyük benzerlik göstermesine rağmen, tek robotlu manipülasyon modeline göre farkı, cisim ve robot manipülatörlerin karşılıklı etkilerinin dinamik modelde yer almasıdır.

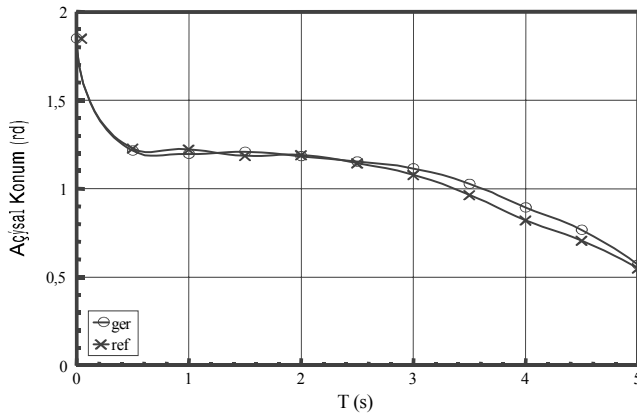
Ortak manipülasyon dinamik model parametreleri; robot manipülatörler ve taşınan cismin atalet etkileri, Coriolis ve merkezkaç kuvvetleriyle, ağırlık kuvvetleri ve eklemlere uygulanması gereken tork büyüklüklerinden meydana gelmektedir.

Ortak manipülasyonda taşınan cisim geometrisi veya ağırlığındaki değişimin, dinamik modelin temel karakteristikleri üzerinde bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, taşınan cisme uygun olarak eklem torklarındaki değişim beklenen sonuçtur.

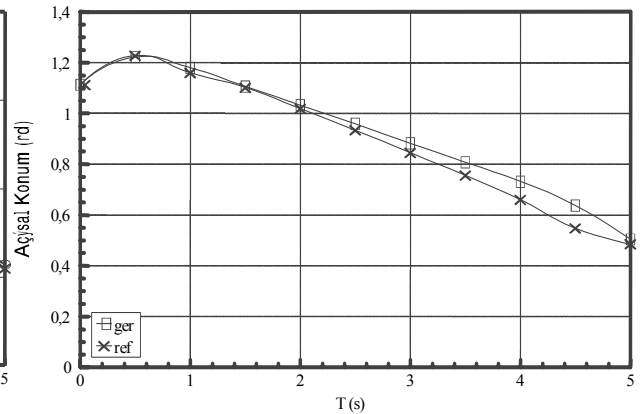
Tanımlanan yörünge boyunca ortak manipülasyonu gerçekleştiren robotların eklem değişkenlerine yönelik olarak uygulanan robust kontrol uygulamasında, $\Lambda = \text{diag}([150 \ 100])$, $K_D = \text{diag}([100 \ 25])$ değerlerine göre elde edilen sonuçlar Şekil.2 ve Şekil.3'de sunulmuştur. Robust kontrolde parametre belirsizliğinden dolayı oluşan bazı yörünge izleme hataları ek kontrol vektörü ile giderilmektedir.

Ortak robotik manipülasyonda; cismin tanımlanan yörüngede hareketini gerçekleştirebilmek için robot manipülatör eklemlerine uygulanması gereken eklem torkları; uzuv esnekliği, cismin kavranması veya tutulması işleminde ve eklem yataklarındaki sürtünme gibi faktörlerden kaynaklanan kayıpları karşılayacak şekilde robust kontrol vektörü kullanılarak belirlenmektedir.

Böylelikle, dinamik modelde yer almayan, anılan belirsizliklerin olumsuz etkisi en aza indirgenerek, mümkün olan en küçük sapma ile istenen yörünge izlenmektedir.



Şekil-2. 1. Eklemden istenilen ve gerçekleşen açısal konumlar.



Şekil-3. 2. Eklemden istenilen ve gerçekleşen açısal konumlar.

Şekillerden görüleceği gibi robot manipülatörlerin eklem değişkenleri için istenilen ve gerçekleşen konumlar arasındaki hatanın oldukça küçük değerlere çekilebildiği gözlenmiştir. Bu değerlerin ise % 2-4 arasında değiştiği belirlenmiştir.

Ayrıca, robust kontrol tekniğinin de, ortak robotik manipülasyona uygulanabilirliği görülmüştür. Birinci eklemden

gerçekleşen konum hataları, ikinci eklem hatalarına göre biraz daha büyük gerçekleştiği görülmüştür. Bu da, birinci eklem her iki robot uzvunun atalet, coriolis ve ağırlık kuvvetlerinin ve cismin atalet ve ağırlık kuvvetlerinin bozucu etkilerinden kaynaklanmaktadır.

6. Sonuçlar

Düzlemsel ortak robotik manipülasyonlu yörünge izlemede robust kontrol için, kontrol parametrelerinin belirlenmesinde, uzuv esnekliği ve eklem sürtünme kayıpları gibi dış bozucuların etkisinin dikkate alınması gereklidir. Dış bozucu olarak adlandırılabilir bu gibi faktörlerin dinamik modele uyarlanabilmesi güçlüğü söz konusudur.

Dinamik modele uyarlanamayan ve sınırlı değerlerde kalan bu gibi belirsizliklerin olumsuz etkilerini bilinen kontrol girdilerini kullanarak gidermek güçtür. Dolayısıyla, yörünge kontrolunda açıklanan bozucu etkiler geliştirilen robust kontrol vektörü karşılamakta ve istenen yörüngeye oldukça yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Eklem değişkenleri için ortaya çıkan hatanın %2÷4 gibi değerlerle sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

Kaynaklar

1. Han-Pang Huang and Ruey-Sheng Chen, Modeling and adaptive coordination control of Two-robot system, *Journal of Robotic Systems* **9**, 1, 65-92, 1992.
2. Tsuneo Yoshikawa, Xin-Zhi Zheng, Coordinated dynamic hybrid position/force control of for multiple robot manipulators handling one constrained object , *The Int. Journal of Robotics Research*, **1**, 3, 319-230. 1993 ,
3. Kleinfinger, J.F., Khalil, W., Developed an Algorithm For Dynamic Modeling of Robot Containing Closed Kinematic Chains, *Proc.16th ISIR, Brussels, Belgium*, 45-56, 1986.
4. Vukobratović, M. and Potkonjak, V., *Applied Dynamics and CAD of Manipulation Robots*, Springer, Berlin, 1985.
5. Alford C.O. and Belyeau S. M., Coordinated control of two robot arms, *Proc. Of. IEEE Int. Conf. On Robotics*, 468-473, 1984.
6. Arimoto S., Miyazaki F. And Kawamura S., Cooperative motion control of multiple robot arms or fingers, *IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, 1407-1412, 1987.
7. Weibing Gao and Mian Cheng , A new control strategy for robotics system in tracking task *Mechatronics*, **1**, 3, 353-366, 1991.
8. Li Z., Hsu P., Sastry S. , Grasping and Coordinated Manipulation by a Multifingered Robot Hand, *The International Journal of Robotics Research*, **8**, 4 1989.
9. Sarıkaya, H., İki Serbestlikli Düzlemsel Manipülörlerin Ortak Manipülasyonu, Doktora Tezi, Erciyes Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1995.
10. Djurovic, M.D. and Vukobratovic, M.K., A Contribution to Dynamic Modeling of Cooperative Manipulation, *Mech.Mach.Theory*, **25**, 4, 407-415, 1990.
11. J. J. Slotine, Weiping Li, On the Adaptive Control of Robotic manipulators, *Int.J. Robotics Research*, **6**, 3, 49-59, 1987.
12. Sciavicco, L. and Siciliano, B., *Modern and Control of Robot Manipulators*, The McGraw-Hill Companies, Inc. 1996.
13. M. W. Spong, On the robust control of robot manipulators *IEEE Trans. Automat. Cont.*, **37**, 1782-1786, 1992.
14. Ertaş, H., Tek Kollu Esnek Manipülörlerde Uç Sapmalarının Simülasyonu, Doktora Tezi, Erciyes Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1995.