

Bir Artıksıl Uzaysal Manipülatörün Modellenmesi ve Kinematik Analizinin İncelenmesi

Atilla BAYRAM

Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 65080 Van, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, bir artıksıl uzaysal manipülatörün modellenmesi yapılmıştır. Bu manipülatör, düzlemsel hareket yapan değişken geometri kafes (DGK) yapısına sahip olan iki modüllü bir yapıdır. Bu modüller son işlemciye ve sabit zemine dönel tahrik elemanları ile bağlanmış olup yapısal olarak bir hibrit manipülatör elde edilmiştir. Toplam sekiz serbestlik derecesine sahip olan bu yapı, DC motor ve vidalı hareket elemanlarıyla tahrik edilmektedir. Bu manipülatör için ileri kinematik denklemleri elde edilmiş ve bu denklemler kullanarak ters kinematik çözüm genetik algoritma ile yapılmıştır. Bu çözüm, son işlemcinin bir noktadan diğer bir noktaya hareketi sırasında tahrik elemanlarının boylarının değişiminin en az olması prensibine göre optimizasyonla elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Artıksıl manipülatör, artıksıl manipülatörlerin ters kinematiği, değişken geometri kafes, genetik algoritma.

Modeling of a Redundant Spatial Manipulator and Investigation of Kinematics Analysis

Abstract

In this paper, a redundant spatial manipulator has been modeled. This manipulator is hybrid and consists of two modules, which have a variable geometry truss (VGT) structure, and two rotational actuators, which connect the VGT parts to the base and the end-effector. This structure has totally eight degrees of freedom and actuated with DC motors and screws. The forward kinematics equations of this manipulator are obtained and its inverse kinematics is solved by using these equations and a genetic algorithm. The solution is acquired by optimizing the criteria which minimizes the joint lengths between the initial state and the final state.

Key Words: Redundant manipulator, inverse kinematics of redundant manipulator, variable geometry truss, genetic algorithm.

Giriş

Paralel manipülatörler kapalı çevrim mekanizmalarından oluşan ve hareketli bir platformun iki veya daha fazla seri kinematik zincirlerle bağlı olduğu yapılardır. Stewart platformu (Stewart, 1966), değişken geometri kafes yapıları (Farrow, 1994; Miura, 1984), düzlemsel hareketli kapalı çevrim mekanizmalar (Kock ve Schumacher, 1998) bu tür manipülatörlere örnek olarak verilebilirler. Bu tür manipülatörler yüksek hassasiyet, rijitlik, yük taşıma kapasitesi ve hız gerektiren taşıtlar imalat, tıbbi operasyonlar, uçuş simülatörleri gibi uygulamalarda kullanılırlar. Paralel manipülatörlerin yukarıda sayılan avantajlarının yanında küçük çalışma uzayına sahip olmaları ve kanşık kinematik yapılarından dolayı kontrollerinin zor olması ise sakıncalı yönlerindedir. Bu zorlukları bir miktar hafifletmek için manipülatörler üst üste paralel-paralel veya paralel-seri şekillerde yapılandırılırlar. Bu tür modüler yapılar literatürde (Robinson, 2008) hibrit manipülatörler olarak bilinirler (Robinson, 2008).

Bilinen altı serbestlik dereceli manipülatörler bazı uygulamalarda hareket kabiliyetinin sınırlı olmasından dolayı sınırlı kullanıma sahiptirler. Artıksıl manipülatörler verilen görev yada görevleri yerine getirmek için gerekli serbestlik derecesinden daha fazla serbestlik derecesine sahiptirler. Bu manipülatörlere bilindik en iyi örnek yedi

serbestlik dereceli (parmakların serbestliği hariç) insan kolu verilebilir (Lenarcic ve Klopčar, 2006). Bu tür manipülatörlerde ek serbestlik dereceleri ilave edilmesiyle daha iyi hareket kabiliyetine sahip olan artıksıl manipülatörler elde edilmiştir. Eklenen serbestlik dereceleri ile artıksıl manipülatörler temel görevlerinin yanı sıra kullanıcı tanımlı aşağıdaki ek görevleri de yerine getirebilirler:

- Mafsal kısıtlamalarını telafi etme (Alvarado, 2005),
- Çalışma ortamındaki engellerden kaçınma (Wunderlich ve Boncelet, 1996),
- Tekillik problemini giderme (Liu ve ark., 2001),
- Değişik optimizasyonlara izin vermesi (Hammond ve Shimada, 2009),
- Çalışma sırasında tamiri ve değiştirilmesi mümkün olmayan durumlarda uygun bir tasarımla arızalanan tahrik elemanlarından kaynaklanan olumsuz durumların telafisi (Lewis ve Maciejewski, 1994).

Artıksal olmayan manipülatörlerde manipülatörün son işlemcisinin ulaşması istenilen bir pozisyon (konum/yönelim) için, manipülatörün bağımsız mafsal değişkenlerine yönelik sadece bir çözüm vardır. Fakat

artıksılıktan dolayı artıksıl manipülatörlerin ters kinematiğinde sonsuz sayıda çözüm elde edilir. Literatürde çözüm için iki yaklaşım ileri sürülmüştür. Bu yaklaşımlarda verilen son işlemci birincil görevini (konum/yönelim) yerine getirirken artıksılıkla ikinci dereceden görevleri de çözmesi prensibine dayanmaktadır. Birinci yaklaşımda, enerji, zaman veya mafsal hareketlerinin minimizasyonu gibi artıksılığın optimizasyonuna dayanmakta olup bütün çözüm kümesini kapsayan bir yaklaşımdır. Diğer yaklaşım ise Sanki-ters matris (en küçük kareler metodu) yaklaşımı olup belli matrislerin tersini içeren yerel bir yaklaşım metodudur. Bu metod Jacobian matrisini kullanıp hız ve ivme boyutunda çözümler üretmektedir (Oh ve ark., 1998; Pretto, 2010). Evrensel optimizasyon yaklaşımları ise hem konum hem de hız boyutunda çözümler sunabilmektedir. Ding ve ark. (2000) konum boyutunda engellere olan mesafenin en fazla olması kriterine göre bir çözüm ileri sürerken, Cherif ve ark. (1996) ise mafsal hareketlerinin sınırlandırılmasını içeren ceza fonksiyonunun optimizasyonuna dayalı bir çözüm sunmuşlardır. Başka bir çalışmada ise artıksıl bir manipülatörün ters kinematiği sanal uzuv ve yer değiştirme dağılımına göre çözülmüştür (Chung ve ark., 1991). Klasik çözüm yöntemlerinin ötesinde yapay sinir ağları, genetik algoritma metodları gibi daha güncel kontrol stratejilerinin artıksıl manipülatörlerinin kinematik analizinde kullanıldığı görülmektedir (Khokhi ve ark., 2009; Luo, 2004). Bu metodlar evrensel bir optimizasyon ile çözümler sunarlar.

Bu çalışmada, uzaysal bir artıksıl manipülatörün modellenmesi yapılmıştır. Bu manipülatör üç serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan iki değişken geometri kafes (DGK) yapısından oluşmuştur. Bu manipülatörün DGK kısmı tahrik elemanları iki konumlu olan bir aşırı artıksıl manipülatörde de kullanılmıştır (Bayram, 2010). Kafes yapılı modüller üst üste eklenmiş olup hareket düzlemleri birbirlerine diktir. Bu yapı alt platformdan zemine ve üst platformdan da manipülatörün son işlemcisine bağlanması DC motorlarla gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, altı serbestlik derecesi DGK'lardan ve iki serbestlik derecesi de dönel tahrik elemanlarından olmak üzere toplam sekiz serbestlik derecesine sahip artıksıl bir manipülatör elde edilmiştir. DGK'larda ise DC motorla tahrik edilen vidalı hareket elemanları kullanılmıştır. Manipülatörün tüm ileri kinematik denklemleri elde edilmiş ve bu denklemler bir genetik algoritmada kullanılarak ters kinematik çözüm elde edilmiştir. Artıksıl olan bu manipülatörün kontrolü için gerekli olan ters kinematiğinin çözümü manipülatörün son işlemcisinin bir konumdan diğer bir konuma hareketi sırasında tahrik elemanlarının boylarının değişiminin en az olması prensibini kabul eden bir optimizasyona dayanmaktadır. Genetik algoritma ile evrensel bir optimizasyon yapılmıştır.

Materyal ve Yöntem

Manipülatörün Modellenmesi: Artıksıl uzaysal manipülatör Şekil-1'deki gibi modellenmiştir. Manipülatör, aynı yapısal karakteristiğe sahip iki değişken geometri kafes (DGK) modülünün üst üste eklenmesiyle oluşmuştur. Bu DGK'lar düzlemsel harekete sahip olup hareket düzlemleri birbirlerine diktir. Mesela, birinci DGK $\vec{u}_2^{(1)} - \vec{u}_3^{(1)}$ düzleminde hareket edip $\vec{u}_1^{(1)}$ eksenini etrafında dönme yaparken ikinci DGK $\vec{u}_1^{(1)} - \vec{u}_3^{(1)}$ düzleminde hareket edip $\vec{u}_2^{(1)}$ eksenini etrafında dönme yapmaktadır.

Bu yapı, Şekil-1'den de görülebileceği gibi alt platformdan zemine ve üst platformdan da manipülatörün son işlemcisine DC motorlarla bağlanmıştır. Bu bağlantılar sadece bir eksen etrafında dönme hareketine izin verip manipülatöre fazladan iki serbestlik derecesi ilave etmektedir. Aynı zamanda alttaki DC motoru DGK'lı kısma, üstteki DC motoru ise son işlemciye burulma hareketi özelliği kazandırmaktadır. Her bir DGK modülü, DC motorlarla tahrik edilen vidalı hareket elemanlarını kullanmaktadır. Bu yapıların her biri üç serbestlik derecesine sahip olup iki öteleme ve bir dönme serbestisine sahiptirler. Sonuçta, toplam sekiz serbestlik derecesine sahip bir artıksıl manipülatör elde edilmiştir. Aslında bu manipülatör paralel yapılı modüllerin üst üste eklenmesi ve seri olarak zemine ve son işlemcisine bağlanması ile bir hibrid yapı oluşturmaktadır.

Bu manipülatörde DGK yapılarındaki bacıklar her iki yönden de trapez bir şekilde tasarlanmıştır. Aynı zamanda orta bacağın dışındaki bacıklar özdeş olup hareketin olduğu orta düzleme göre simetrikler ve aynı hareketi yapmaktadırlar. Böylelikle reaksiyon momentlerine ek olarak reaksiyon kuvvetleri de manipülatörün DGK modüllerini desteklemekte ve manipülatörün rijitliğini arttırmaktadırlar.

Manipülatörün İleri Kinematik Analizi:

Manipülatörün verilen bağımsız mafsal değişkenleri için son işlemcinin yönelim matrisi ve uç noktasının konum vektörü ileri kinematik analiz ile elde edilir. Bu analiz aynı zamanda manipülatörün değişken geometri kafes yapısındaki pasif mafsal değişkenlerinin hesaplanmasını da içermektedir. Şekil-1'e göre, manipülatörün son işlemcisinin uç noktası için konum vektörü aşağıdaki gibi yazılır.

$$\vec{r}_p = \vec{r}_{0-23} = \vec{r}_{01} + \vec{r}_{1-11} + \vec{r}_{11-22} + \vec{r}_{22-23} \quad (1)$$

Burada, \vec{r}_{01} , \vec{r}_{1-11} , \vec{r}_{11-22} ve \vec{r}_{22-23} Şekil-1'den de görülebildiği gibi sırasıyla O_0 , O_1 , O_{11} , O_{22} ve ($O_{23}=P$) eksen takımlarının merkezlerini birleştiren konum vektörlerini göstermektedir. Bu vektör başlangıç referans eksenine göre matris olarak ifade edilebilir.

$$\vec{r}_{P/O}^{(0)} = h_1 \vec{u}_3^{(0)} + \hat{C}^{(0,1)} \vec{r}_{11/1}^{(1)} + \hat{C}^{(0,11)} \vec{r}_{22/11}^{(11)} + h_2 \hat{C}^{(0,22)} \vec{u}_3^{(22)} \quad (2)$$

Bu ifadede h_1 ve h_2 DC motorlardan kaynaklanan yüksekliklerdir. $\hat{C}^{(i,j)}$ ile belirtilen ise j referans eksenini i referans eksenine transfer eden yönelim matrisleri olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedirler.

$$\begin{aligned} \hat{C}^{(0,1)} &= e^{\vec{u}_3 \psi_0} \\ \hat{C}^{(0,11)} &= e^{\vec{u}_3 \psi_0} e^{\vec{u}_1 \theta_1} \\ \hat{C}^{(0,22)} &= e^{\vec{u}_3 \psi_0} e^{\vec{u}_1 \theta_1} e^{\vec{u}_2 \theta_2} \end{aligned}$$

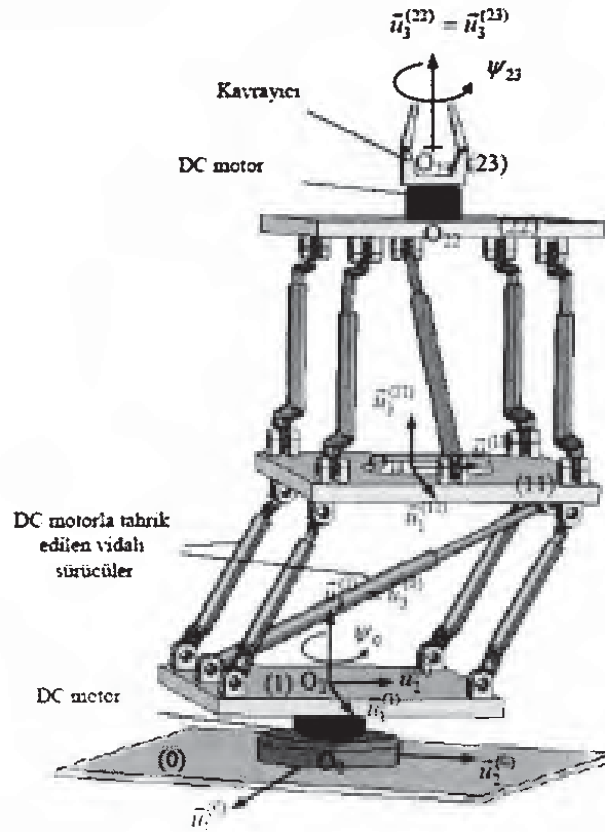
Manipülatörün son işlemcisinin yönelim matrisi, $\hat{C}^{(0,23)}$ ise yukarıdaki ardışık dönmelere ek olarak ikinci DC motorun dönmesinin eklenmesiyle bulunur.

$$\hat{C}^{(0,23)} = \hat{C}^{(0,1)}\hat{C}^{(1,11)}\hat{C}^{(11,22)}\hat{C}^{(22,23)}$$

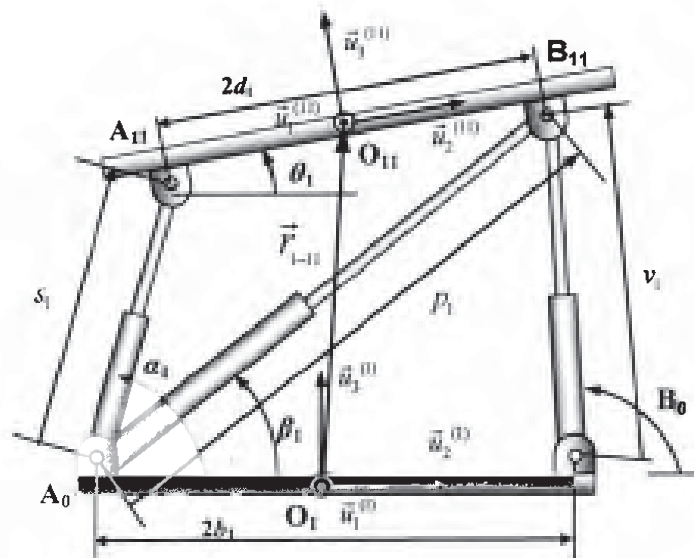
$$\hat{C}^{(0,23)} = e^{\vec{u}_3\psi_0} e^{\vec{u}_1\theta_1} e^{\vec{u}_2\theta_2} e^{\vec{u}_3\psi_{23}} \quad (3)$$

Yukarıdaki üssel dönme matrisi notasyonu kullanımı (Özgören, 2007)'de detaylı bir şekilde verilmiştir.

DGK yapılarına ait olan $\vec{F}_{11/1}^{(1)}$ ve $\vec{F}_{22/11}^{(11)}$ konumlarını yazmak için bu modüllere ait plan pasif mafsalsal değişkenlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şekil-2'de birinci DGK'nın şematik gösterimi verilmektedir. Pasif mafsalsal değişkenleri olan DGK açıları bağımsız mafsalsal değişkenleri cinsinden bulunacaktır.



Şekil 1. Artıksıl uzaysal sekiz serbestlik dereceli manipülatör



Şekil-2. Değişken Geometril Kafes (DGK) Modülü

Manipülatörün birinci DGK kısmında $A_0B_0B_{11}$ ve $A_0B_{11}A_{11}$ 'ne göre kapalı çevrim denklemleri (KÇD) yazılıp bileşenlerine ayrılarak aşağıdaki (4)-(7) denklemleri elde edilir.

$$2b_1 + v_1 \cos(\gamma_1) = p_1 \cos(\beta_1) \quad (4)$$

$$v_1 \sin(\gamma_1) = p_1 \sin(\beta_1) \quad (5)$$

$$s_1 \cos(\alpha_1) + 2d_1 \cos(\theta_1) = p_1 \cos(\beta_1) \quad (6)$$

$$s_1 \sin(\alpha_1) + 2d_1 \sin(\theta_1) = p_1 \sin(\beta_1) \quad (7)$$

Bu denklemlerden tüm açı değerleri tahrik elemanlarının boyları olan bağımsız mafsalsal değişkenleri cinsinden aşağıdaki gibi bulunur.

$$\gamma_1 = \text{atan2}(\sigma_1 \sqrt{1 - \xi_1^2}, \xi_1) \quad (8)$$

$$\cos \gamma_1 = \frac{p_1^2 - v_1^2 - 4b_1^2}{4b_1 v_1} = \xi_1, \quad \sin \gamma_1 = \sigma_1 \sqrt{1 - \xi_1^2}, \quad \sigma_1 = \pm 1$$

$v_1 \neq 0$ (Manipülâtörün tasarım şeklinden dolayı bu şart daima sağlanır.)

$$\beta_1 = \alpha \tan 2(\delta_1, \lambda_1) \quad (9)$$

$$\sin \beta_1 = \frac{v_1 \sin \gamma_1}{p_1} = \delta_1, \quad \cos \beta_1 = \frac{2b_1 + v_1 \cos \gamma_1}{p_1} = \lambda_1$$

($s_3 \neq 0$)

$$\theta_1 = \beta_1 + \text{atan2}(k_1, \sigma_2 \sqrt{1 - k_1^2}) \quad (10)$$

$$\cos \beta_1 \cos \theta_1 + \sin \beta_1 \sin \theta_1 = \frac{p_1^2 + 4d_1^2 - s_1^2}{4d_1 p_1} = k_1$$

$$\cos(\theta_1 - \beta_1) = k_1, \quad \sin(\theta_1 - \beta_1) = \sigma_2 \sqrt{1 - k_1^2}, \quad \sigma_2 = \pm 1$$

$$\alpha_1 = \text{atan2}(m_1, n_1) \quad (11)$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{p_1 \sin \beta_1 - 2b_1 \sin \theta_1}{s_1} = m_1$$

$$\cos \beta_1 = \frac{p_1 \cos \beta_1 - 2b_1 \cos \theta_1}{s_1} = n_1, \quad (s_1 \neq 0)$$

Aynı işlemler ikinci DGK kısmı için de uygulanır. Sadece alt indisleri aşağıdaki gibi değiştirmek ve hareketi $\vec{u}_1^{(11)} - \vec{u}_3^{(11)}$ düzleminde yazmak yeterli olacaktır.

$$\alpha_1 \rightarrow \alpha_2, \quad \beta_1 \rightarrow \beta_2, \quad \gamma_1 \rightarrow \gamma_2, \quad \theta_1 \rightarrow \theta_2, \quad s_1 \rightarrow s_2, \\ v_1 \rightarrow v_2, \quad p_1 \rightarrow p_2$$

Bu açıların hesaplanmasından sonra $\bar{F}_{11/11}^{(1)}$ ve $\bar{F}_{22/11}^{(11)}$ konumları aşağıdaki gibi matris şeklinde yazılır.

$$\bar{F}_{11/11}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ s_1 \cos(\alpha_1) + d_1 \cos(\theta_1) - b_1 \\ s_1 \sin(\alpha_1) + d_1 \sin(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\bar{F}_{11/22}^{(11)} = \begin{bmatrix} -s_2 \cos(\alpha_2) - d_1 \cos(\theta_2) + b_1 \\ 0 \\ s_2 \sin(\alpha_2) + d_1 \sin(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Yukarıdaki ileri kinematik denklemler ile manipülâtörün bağımsız mafsalsal değişkenlerine ($\psi_0, s_1, v_1, p_1, s_2, v_2, p_2$ ve ψ_{23}) verilen değişik değerler için manipülâtörün son işlemcisinin yönelimi ve uç noktasının (P) konumu denklem (2) ve denklem (3) kullanılarak elde edilir.

Manipülâtörün Ters Kinematik Analizi: Artıksıl manipülâtörlerin ters kinematığının çözümü için literatürde önerilen metotlarda çözüm genellikle hız ve ivme boyutunda yapılmaktadır. Bu çalışmada, sekiz serbestlik dereceli artıksıl manipülâtörün ters kinematığı, manipülâtör bir konumdan diğer konuma hareket ederken tahrik elemanlarının boylarının (bağımsız mafsalsal değişkenleri) değişiminin en az olması prensibine göre çözülecektir. Manipülâtörün ileri kinematığından son işlemcisinin konumu ve yönelimi aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\bar{X} = f(\bar{q}) \quad (14)$$

Burada, $\bar{X}_{[6 \times 1]}$ son işlemcisinin konum ve yönelimini bildiren matris ve $\bar{q}_{[8 \times 1]}$ mafsalsal değişkenlerini bildiren matristir.

Ters kinematik ile verilen bir \bar{X}_{verilen} için mafsalsal değişkenlerini, \bar{q} , denklem (15) ile tanımlanır.

$$\bar{q} = f^{-1}(\bar{X}_{\text{verilen}}) \quad (15)$$

Çözüm için denklem (2) ve (3) kullanılacaktır.

$$\text{Verilen yönelim matrisi, } \hat{C}^* = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}, \quad 123 \text{ Euler}$$

açısı notasyonuna göre elde edilir. Denklem (3)'ün kullanılmasıyla, (16), (17) ve (18) numaralı denklemler elde edilir.

$$\sin(\theta_1) = c_{31} \sin(\psi_{23}) + c_{32} \cos(\psi_{23}) \quad (16)$$

$$\sin(\theta_2) = c_{13} \cos(\psi_0) + c_{23} \sin(\psi_0) \quad (17)$$

$$\cos(\theta_1) \cos(\theta_2) = c_{33} \quad (18)$$

$$\text{Yine, verilen konum vektörü, } \bar{r}^* = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix}, \quad \text{için elde edilen}$$

kinematik denklemler, denklem (2) kullanılarak aşağıda verilmiştir.

$$r_1 = -S\psi_0 (s_1 C\alpha_1 + d_1 C\theta_1 - b_1) + C\theta_1 S\psi_0 (-s_2 C\alpha_2 - d_1 C\theta_2 + b_1) \\ + S\psi_0 S\theta_1 (s_2 S\alpha_2 + d_1 S\theta_2) + (C\psi_0 S\theta_2 + S\psi_0 S\theta_1 C\theta_2) h_2 \quad (19)$$

$$r_2 = C\psi_0 (s_1 C\alpha_1 + d_1 C\theta_1 - b_1) + S\psi_0 (-s_2 C\alpha_2 - d_1 C\theta_2 + b_1) \\ - C\psi_0 S\theta_1 (s_2 S\alpha_2 + d_1 S\theta_2) + (S\psi_0 S\theta_2 - C\psi_0 S\theta_1 C\theta_2) h_2 \quad (20)$$

$$r_3 = h_1 + s_1 S\alpha_1 + d_1 S\theta_1 + C\theta_1 (s_2 S\alpha_2 + d_1 S\theta_2) + C\theta_1 C\theta_2 h_2 \quad (21)$$

Burada $C\theta_i = \cos(\theta_i)$ ve $S\theta_i = \sin(\theta_i)$ ifade etmektedir.

Denklemler (16), (17), (18), (19), (20) ve (21) son işlemcinin konum ve yönelimi için yazılan altı adet denklemdir. (4), (5), (6) ve (7) denklemleri ise kapalı çevrim denklemi olup açılı bilinmeyenlerini bağımsız değişkenler cinsinden çözmek için kullanılıp çözümler ileri kinematik analizde verilmiştir. Sonuçta, verilen \hat{C}^* ve \hat{r}^* için $(\psi_0, s_1, v_1, p_1, s_2, v_2, p_2$ ve $\psi_{23})$ sekiz adet bağımsız mafsalsal değişkenlerinin çözülmesi istenmektedir. Bu manipülâtörün ters kinematığının çözümü, genetik algoritma kullanılarak pozisyon seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Genetik algoritma çok sayıda çözüm olabilecek olasılıkları araştırarak global optimizasyon işlemi gerçekleştirir.

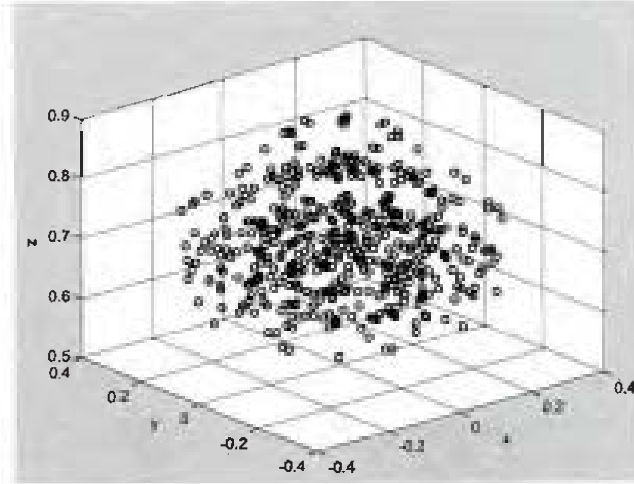
Genetik algoritma deterministik olmayan, olasılıksal doğal seçim ve doğal genetik mekanizmasına dayalı bir araştırma algoritmasıdır. Bu algoritma bilinen optimizasyon metodu ile çözülemeyen zor optimizasyon problemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılır. Çözüm uzayı oldukça geniş olsa da genetik algoritma en iyi çözüme kısa süre içinde yaklaşır. Genetik algoritma genel olarak beş temel bileşene sahiptir. Bunlar; potansiyel çözümlerin genetik temsili, popülasyon oluşturma şekli, değerlendirme fonksiyonu, genetik operatörler (çaprazlama, mutasyon, seçme) ve parametrik değerlerdir. Genetik algoritma ile ilgili daha fazla bilgi için (Goldberg, 1989)'a bakılabilir.

Genetik algoritma diğer metotlardan farklı olarak tek bir başlangıç çözümü yerine birden fazla başlangıç çözümünden oluşan bir başlangıç kümesini kullanır ve buna da başlangıç popülasyonu denir. İyi bir başlangıç popülasyonu hem hızlı hem de daha etkin bir sonuç verir. Bundan dolayı başlangıç popülasyonu için manipülâtörün ayırık çalışma uzayından faydalanılacaktır. Doğrusal hareket elemanlarının boylarının en uzun ve en kısa konumları ve dönel hareket elemanlarının her 45° lik açısal konumları için ayırık çalışma uzayı Şekil.3'deki gibi oluşturulmuştur. Bu çalışma uzayı toplam $9 \times 2^6 \times 9 = 5184$ olası manipülâtör şeklini içermektedir. Başlangıç popülasyonu, bu çalışma uzayından, denklem (22)'deki şartı sağlayan çözüm kümelerini içerir.

$$\Delta = \|\bar{X}_{verilen} - f(\bar{q}_j)\| < \varepsilon \quad (22)$$

Burada, norm operatörü,

$\|(a_i - b_i)\| = \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + \dots + (a_n - b_n)^2}$ ifadesiyle temsil edilmektedir. $\bar{X}_{verilen}$, manipülâtörün son işlemcisinin ulaşması istenilen pozisyonu, $f(\bar{q}_j)$, her bir \bar{q}_j için ileri kinematikten bulunan son işlemcinin pozisyonudur. ε ise ulaşılmaması istenilen verilen ve her bir olası çözümün ulaştığı pozisyon farkı için atanan küçük bir değeri temsil etmektedir. Her bir popülasyon dizisi "0" ve "1" içeren ikilik sayı sistemi ile temsil edilmektedir. Örneğin bir bağımsız mafsalsal değişkeni [0 1 0 0 0 1 1 1 1 0] gibi 10 bitlik bir ikilik sistem ile temsil edilir.



Şekil 3. Manipülâtörün ayırık çalışma uzayı

Çözüm için aşağıdaki adımlar sırası ile takip edilir.

- Son işlemcinin ulaşması istenilen pozisyon (konum ve yönelim), $\bar{X}_{verilen}$, atanır.
- Atanan $\bar{X}_{verilen}$, için ayırık çalışma uzayından başlangıç popülasyonu, \hat{W}_i , denklem (22) 'ye göre seçilir.
- Genetik algoritma ile çözüm Matlab paket programında yazılan bir programla yapılmıştır.

Başlangıç popülasyonu bu programa $\bar{X}_{verilen}$ ile birlikte geniş olarak atanır. Bu program bir değerlendirme fonksiyonuna göre ardışık olarak çözümler üretmektedir. Değerlendirme fonksiyonu aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$F = \frac{1}{\|\bar{X}_{verilen} - f(\bar{q}_i)\|} \quad (23)$$

Burada amaç, F fonksiyonunu en büyük yapan çözüm kümesini elde etmektir. Bu işlemin sonucunda $F > f_0$ şartını sağlayan N adet çözüm elde edilir. f_0 için öyle bir değer seçilmelidir ki hem manipülatörün son işlemcisi istenilen pozisyona yeterince yaklaşıp hem de çok sayıda olası çözüm kümesi içermiş olsun.

- Bu N adet çözüm kümesinden, $\Delta_2 = \sum_{i=1}^8 |\bar{q}_{bas} - \bar{q}_i|$ optimizasyon kriterinin değerini en küçük yapan manipülatör şekli, $(\bar{q}_i)_{opt}$ çözüm olarak alınmaktadır.

Bulgular

Örnek olarak manipülatör, aşağıdaki başlangıç pozisyonundan harekete başlamaktadır. $\bar{r}_{ilk} = [0 \ 0 \ 0.644](m)$ ve 123 Euler açılan notasyonuna göre $(\Phi_1 = 0^\circ, \Phi_2 = 0^\circ, \Phi_3 = 0^\circ)_{ilk}$. Aşağıda beş adet örnekleme için son işlemcinin alması gereken pozisyonunun ([konum/yönelim açıları]) değerleri, $X_{verilen} = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ \Phi_1 \ \Phi_2 \ \Phi_3]$ Çizelge1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Beş adet örnekleme için pozisyon değerleri

	$r_1 (m)$	$r_2 (m)$	$r_3 (m)$	Φ_1	Φ_2	Φ_3
1)	0	0	0.91	0°	0°	0°
2)	0.223	0.027	0.725	0°	30°	60°
3)	-0.188	-0.156	0.669	10°	10°	-10°
4)	-0.188	0.294	0.648	-30°	-30°	-30°
5)	0.009	0.081	0.778	25°	10°	-25°

Çizelge 2. Beş adet örnekleme için pozisyon değişiminin hata değerleri, mafsalsal değişkenlerinin % değişimi

	$\ \bar{X}_{verilen} - \bar{X}_{bulunan}\ $	% hata ve % değişim değerleri							
		ψ_0	s_1	v_1	P_1	s_2	v_2	P_2	ψ_{23}
1)	1.35	0.1	47.8	47.8	24.1	47.8	47.8	24.1	0.1
2)	1.08	63.4	46.7	9.5	5.3	40.8	6.2	24.1	47.8
3)	11.8	0.3	18.3	38.6	0.09	0	6.0	24.1	3.2
4)	4.65	0.09	47.8	0	24.1	47.8	0	24.0	8.4
5)	6.61	18.6	35.6	34.3	22.1	0	35.8	24.1	2.5

Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada uzaysal 8 serbestlik derecesine sahip hibrid bir artıksıl manipülatörün modellenmesi yapılmıştır. Bu manipülatör değişken geometri kafes (DGK) yapısından dolayı oldukça rijit bir yapıya sahip olup aynı zamanda altı serbestlik dereceli DGK yapısına eklenen iki serbestlik dereceli dönel tahrik elemanları ile manipülatörün çalışma uzayı artırılmıştır. Manipülatör artıksıllığından dolayı hem temel görevler (veren konum ve yönelim) yerine getirirken hem de değişik optimizasyonlara izin vermektedir. Örneğin bu makalede, manipülatör iki farklı konum arasında hareket ederken tahrik elemanlarının boylarındaki değişimin en az yapılması sağlanmıştır. Bu manipülatör için ileri kinematik

Ters kinematik analizin sonuçlarını değerlendirmek için, aşağıdaki ifadelerle göre hem pozisyon hatası hem de mafsalsal değişkenlerinin değişim yüzdeleri hesaplanmıştır.

$$\text{Pozisyon Hatası}(\%) = \frac{\|\bar{X}_{verilen} - \bar{X}_{bulunan}\|}{\bar{X}_{verilen}} \times 100 \quad (24)$$

$$(\text{Mafsalsal Değişimi})_i(\%) = \frac{\|(q_i)_{bul} - (q_i)_{bas}\|}{(q_i)_{ort}} \times 100 \quad (25)$$

Burada, $\bar{X}_{verilen}$ ulaşılmaması istenilen pozisyon matrisini ve $\bar{X}_{bulunan}$ ise elde edilen pozisyon matrisini ifade etmektedir. Yine aynı şekilde, $(q_i)_{bul}$ bulunan bağımsız mafsalsal değişkenlerini, $(q_i)_{bas}$ bu değişkenlerin başlangıçtaki değerlerini ve $(q_i)_{ort}$ ortalama boylarını ifade etmektedir. Denklem (24) ve (25)'ten elde edilen sonuçlar yukarıda verilen beş adet örnekleme için Çizelge 2'de verilmektedir.

denklemleri çıkarılmış ve bu denklemlerle birlikte ters kinematik için genetik algoritma metodu uygulanmıştır. Genetik algoritmanın başlangıç popülasyonunu başlangıç ile atamak için manipülatörün aynı çalışma uzayından faydalanılmıştır. Bu metod pozisyon düzeyinde olup verilen ekstra kriterlere göre bir global optimizasyon yapmaya çalışmaktadır. Fakat sonuçlarda pozisyon hatasının beklenenden üzerinde olduğu görülmektedir. Bu sonucun bir nedeni konum ve yönelimin birlikte değerlendirilmiş olmasıdır. Aynı zamanda bu metodla global bir çözüm aranması göreceli olarak uzun bir süre aldığından gerçek-zamanlı uygulamalarda kullanılması zordur. Gelecekteki çalışmalar, bu makaledeki gibi karışık manipülatörlerin daha hassas ve daha hızlı çözüm metodları üzerine olabilir.

Kaynaklar

- Alvarado J. G., 2005, Kinematics of a hybrid manipulator by means of screw theory, *Multibody System Dynamics*, Vol.:14, No: 3-4, pp.:345-366.
- Bayram, A., 2010, Modeling and control of a hyper redundant manipulator, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, The Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2010.
- Cherif, A.R., Perdereau, V. and Droin, M., 1996, Penalty approach for a constrained optimization to solve on-line to the inverse kinematic problem of redundant manipulators, *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis-Minnesota, April.
- Chung, W.J., Chung, W.K. and Youm, Y., 1991, Inverse kinematics of planar redundant manipulators using Virtual link and displacement distribution schemes, *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, California, April.
- Ding, M. Z., Ong, C.J. and Poo, A.N., 2000, Resolution of redundant manipulator via distance optimization, *Proc. of the Inst. Of Mech. Eng, Journal of Mechanical Engineer Science*, Vol. 204, No: 8.
- Farrow, W.C., 1994, Motion Model for a Variable Geometry Truss (VGT) Manipulator, PhD Thesis, Marquette University, Wisconsin.
- Goldberg, D., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Hammond, F.L. and Shimada, K., 2009, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, December 19 -23, Guilin, China.
- Khoukhi, A., Baron, L., Balazinski, M. and Demirli, K. 2009, Hybrid neuro-fuzzy multi-objective trajectory planning of redundant manipulators, *Journal of Control and Intelligent Systems*, Vol.37, No:2.
- Kock, S., and Schumacher, W., 1998, A Parallel X-y Manipulator with Actuation Redundancy for High Speed and Active Stiffness Applications," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2295-2300, Louvain.
- Lernarcic, J. and Klopčar, N., 2006, Positional kinematics of humanoid arms, *Robotica*, Vol. 24, pp. 105-112, Cambridge Univ. Press., UK.
- Lewis, C.L. and A.A. Maciejewski, 1994, An example of failure tolerant operation of a kinematically redundant manipulator, *Proc IEEE Int Conf Robot and Automat*, pp. 1380-1387.
- Liu, G.F., Wu, Y.L., Wu, X.Z., Kuen, Y.Y. and Li, Z.X., 2001, Analysis and control of redundant parallel manipulators, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, May 21-26.
- Luo, X., and Wei, W., 2004, A New Immune Genetic Algorithm and Its Application in Redundant Manipulator Path Planning, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 21(3), pp. 141-151.
- Miura, K., 1984, Variable geometry truss concept, 18th Aurospace Mechanism Symposium, NASA, Report No:614, Greenbelt-Maryland, May 2-4.
- Oh, Y., Chung, W. and Youm, Y., 1998, Extended impedance control of redundant manipulators based on Weighted Decomposition of Joint Space, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 15(5), pp. 231-258.
- Özgören, M. K., 2007, Kinematic Analysis of Spatial Mechanical Systems Using Exponential Rotation Matrices, *Journal of Mechanical Design, ASME*, Vol 129, pp. 1144-1152. 101
- Pretto, I., 2010, Base reaction control of space manipulators, PhD Thesis, Sciences Technologies et Measurements for Space, University of Padova, Italy.
- Robinson, J.D., 2008, Direct and inverse kinematics of a new class of serial-parallel hybrid manipulator, Master Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University, Ottawa-Ontario, Canada.
- Stewart, D.A., 1966, Platform with Six Degrees-of-freedom, *Proceedings of Mechanical Engineering Part I*, Cilt:180, s: 371-386.
- Wunderlich, J. and Boncellet, C., 1996, Local optimization of manipulator kinematics within constrained workspaces, *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis-Minnesota, April.