



# Sensörsüz Seri Elastik Tekniği ile Bir Kablo Sürümlü Düzlemsel Mekanizmanın Kontrolü

İrfan Kunduz<sup>1</sup>, Atakan Durmaz<sup>2\*</sup>, Özlem Albayrak<sup>3</sup>, Tilbe Alp<sup>4</sup>, Perin Ünal<sup>5</sup>, Mustafa Mert Ankaralı<sup>6</sup>

<sup>1</sup> TEKNOPAR Endüstriyel Otomasyon, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-3131-0039), [kunduz@teknopar.com](mailto:kunduz@teknopar.com)

<sup>2\*</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0002-7573-2412), [atakand@metu.edu.tr](mailto:atakand@metu.edu.tr)

<sup>3</sup> TEKNOPAR Endüstriyel Otomasyon, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0001-9517-3227), [albayrak@teknopar.com.tr](mailto:albayrak@teknopar.com.tr)

<sup>4</sup> TEKNOPAR Endüstriyel Otomasyon, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0001-8253-023X), [alp@teknopar@metu.edu.tr](mailto:alp@teknopar@metu.edu.tr)

<sup>5</sup> TEKNOPAR Endüstriyel Otomasyon, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0003-1357-2430), [punal@teknopar.com.tr](mailto:punal@teknopar.com.tr)

<sup>6</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0002-1235-5373), [mertan@metu.edu.tr](mailto:mertan@metu.edu.tr)

(İlk Geliş Tarihi 08 Mart 2022 ve Kabul Tarihi 26 Ekim 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1072206)

**ATIF/REFERENCE:** Kunduz, İ., Durmaz, A., Albayrak, Ö., Alp, T., Ünal, P., Ankaralı, M.M. (2022). Sensörsüz Seri Elastik Tekniği ile Bir Kablo Sürümlü Düzlemsel Mekanizmanın Kontrolü. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (41), 324-330.

## Öz

Bu çalışmada, sensörsüz elastik seri tekniği ile kablo sürümlü bir düzlemsel mekanizmanın kontrolü incelenmektedir. Kablo sürümlü robotlar, gösteri alanlarında örümcek kamera olarak yatay düzlemde çalışan şekilde hali hazırda kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada ise düşey düzlemde çalışan bir kablo sürümlü robot üzerinde çalışılmaktadır. Mekanizmanın düşey düzlemde çalışması sebebiyle de örümcek kameralardaki gibi her motora eşit kuvvet uygulanmamaktadır. Kablo sürümlü robotların kontrolü için kullanılan, sensörlerden alınan bilgilerin işlenmesine dayalı yöntemleri kullanmak yerine, sensörlerden elde edilen bilgilerde oluşabilecek herhangi bir gecikmeden veya hatadan etkilenmemek için bu çalışmada sensörsüz bir kontrol tekniği kullanılmaktadır. Sırasıyla, mekanizmanın mekanik, donanım ve yazılım kısımlarının açıklanmasının ardından, kontrol stratejimizin matematiksel olarak derinlemesine çalışılacağı modellenme ve varsayımlar sunulmaktadır. Çalışmanın sonuç bölümünde simülasyon ve gerçek çıktılar karşılaştırılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Kablo sürümlü düzlemsel mekanizma, Sensörsüz elastik seri tekniği, Matematiksel model

## Sensorless Series Elastic Control of a Cable-Driven Planar Mechanism

### Abstract

This paper will study the control of a cable-driven planar mechanism with the sensorless elastic series technique. Cable-driven robots are used in performance areas as spider cameras operating in the horizontal plane. On the other hand, in this study, we are working on a cable-driven robot operating in the vertical plane. Since the mechanism operates in the vertical plane, unlike the spider cameras, each motor's forces are different. Different from the control methods, depending on the usage of the information obtained from the sensors used for the cable driven robots, we use a sensorless control technique not to be affected by any delay or error in the sensory information. We will explain the mechanism through mechanical, hardware, and software means. The modeling and assumptions follow these. We will study the mathematical explanation of our control strategy deeply. Then, the simulation and the actual outputs will be shown and compared.

**Keywords:** Cable-driven planar mechanism, Sensorless elastic series technique, Mathematical model

\* Sorumlu Yazar: [atakand@metu.edu.tr](mailto:atakand@metu.edu.tr)

## 1. Giriş

Kablo sürümlü robotlar, birden çok eylecinin bir uç efektörde birleştiği paralel robotların bir türüdür. Diğer paralel robotlarda katı parçaların uç efektörde buluşmasına rağmen, kablo ile çalışan robotlarda her köşede eyleciler tarafından kontrol edilen kablolar bulunmaktadır (Jin ve ark., 2013), (Pott,2004). Uç efektörüne katı eyleyiciler bağlı olan paralel robotlara kıyasla, kablolar makaraların etrafına sarılabildiği için, çalışma alanının tüm mekanizmanın alanına oranına bakıldığında kablolu robotların daha yüksek bir orana sahip olduğu ve bu yüzden de aynı görevi yerine getirmek için kablolu robotların daha uygun bir çözüm sunduğu görülebilir (Gosselin, 2014).

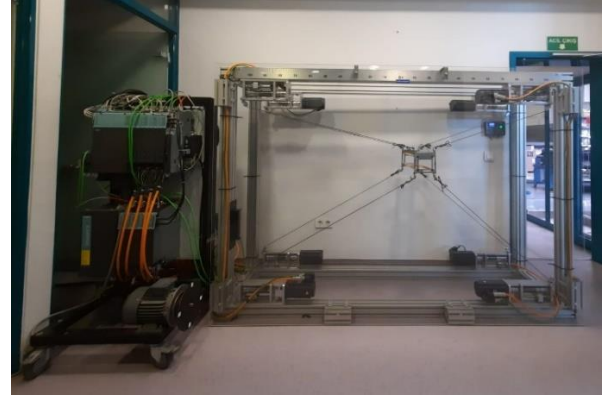
Hali hazırda kameramanlar veya drone'lar ile kaydedilemeyen futbol maçları, konserler ve performans sanatları gibi etkinliklerin kaydı için kablo ile çalışan robotlar, örümcek kamera olarak kullanılmaktadır. Tüm etkinliği kaydetmek için geniş açılı çekim gerektiğinden ve kapalı bir performans alanında bir grup insanın üstünde drone kullanılmasının riskinin yüksek olması da bizi kablo ile çalışan robotlar kullanmaya yöneltmektedir.

Çalışmamızda amacımız inşaat alanında kullanılması planlanan bir kablo sürümlü bir robot tasarlamak ve kontrol etmektir. Robotun, sıva uygulamak veya düz bir duvar boyamak vb. gibi çok büyük iş gücü ve zaman gerektiren görevleri yapabilmesi planlanmaktadır. Bu görevler için bir kablolu robot kullanılarak, aynı iş gücünün diğer görevleri gerçekleştirmek üzere kullanılabilmesi sağlanabilmektedir.

Kablolu robotların analizi ve kontrolü için birbirinden farklı birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, ileri kinematik denklemin çözümünde kullanılan Newton-Raphson metodudur (Zi, Duan ve Du, 2008). Bu yöntemde sonucun doğruluğu başlangıç koşullarına güçlü derecede bağlıdır. Bu yüzden doğru başlangıç koşulları elde etmek için yapay sinir ağları ile birlikte kullanılarak doğru başlangıç koşulları elde etmeyi amaçlayan çalışmalar da bulunmaktadır (Sancak, Yamaç ve İtik, 2019). Bahsedilen çalışmalarla birlikte birçok çalışmada uç efektörden farklı sensörler ya da kamera ile gerçek zamanlı olarak konum bilgisi elde edilmektedir. Hem bilgi iletimi sırasında yaşanabilecek gecikmeler hem de bu sistemlerin gerektirdiği ekstra maliyet ve bakım masrafları gibi problemler bulunmaktadır. Çalışmamızda sensörsüz bir kontrol yaklaşımı izleyerek bahsedilen problemlerin elenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla robotumuz, paralel ileri beslemeli ve geri beslemeli kontrol yöntemlerini kullanarak verilen referans güzergahını takip edebilmektedir.

Bu yazıda, oluşturduğumuz ve Şekil 1'de gösterilen bir kablo sürümlü robotun kontrolü, kinematiği ve test sonuçlarını sunuyoruz.

Bu çalışma şu şekilde düzenlenmiştir; bölüm 2.1'de çalışılmış olan sistemin mekaniksel, donanımsal ve yazılımsal altyapıları açıklanmaktadır. Bölüm 2.2'de, mekanizmanın modellenmesi, kinematiği ve dinamiği açıklanmış ve ilgili varsayımlar belirtilmiştir. Bölüm 3'te ise kullanılan kontrol yöntemi açıklanmaktadır. Bölüm 4, sonuç bölümünde ise çalışma sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Üstünde çalışılan kablo sürümlü düzlemsel mekanizma.

(Figure 1. The cable-driven planar mechanism on which we worked.)

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Genel Yapı

#### 2.1.1 Mekanik Sistem

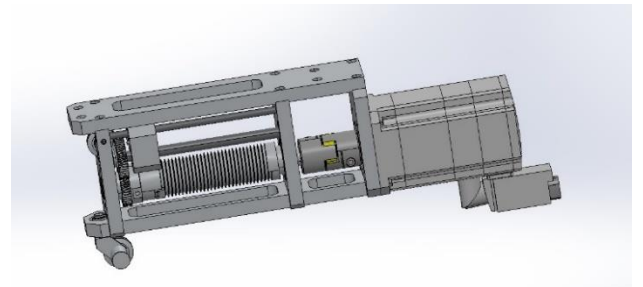
Mekanizmada ISO 10325 standardına uygun olan 3 mm çapındaki kevlar kablolar kullanılmıştır. Mekanizmanın düzeni Tablo 1'de sunulmaktadır. Bu çalışma boyunca, genel kabul olduğu üzere, orijin noktası mekanizmanın merkezi olarak tanımlanmıştır. Dişli mekanizmasının tasarımı Şekil 2'de görülebilir.

Tablo 1. Mekanizmanın yerleşimi.

(Table 1. The layout of the mechanism.)

Kısım	1.Köşe	2.Köşe	3.Köşe	4.Köşe
Gövde	(1.05,0.58)	(-1.05,0.58)	(-1.05,-0.58)	(1.05,-0.58)
Uç efektör	(0.08,0.095)	(-0.08,0.095)	(-0.08,-0.095)	(0.08,-0.095)

Kabloların döndürüldüğü çembere ait olan dişlinin yarıçapı, 0.0195 m'dir. Ayrıca kabloların yarıçapının 1.5 mm ve dişliler üzerindeki boşlukların da 1.6 mm olması, kabloları aşınmaya karşı korumaktadır. İlk testlerde çekme kuvvetine bağlı olarak radyal yönde oluşan sıkışma kuvvetinden dolayı 2 mm yarıçaplı kablolar ile ihmal edilebilir sıkıştırma etkisine sahip olabilmek için deneylere başlanmıştır. Ancak kablolardaki aşınma nedeniyle oluşabilecek güvenlik sorunları göz önüne alınarak kablo yarıçapı 1,5 mm olarak değiştirilmiştir. Yöntemimiz kablolardaki sıkıştırma kuvvetini hesaba kattığından bu değişikliğin sonuçları etkilemeyeceği öngörülmüştür.



Şekil 2. Dişli mekanizmasının tasarımı.

(Figure 2. Design of the gear mechanism.)

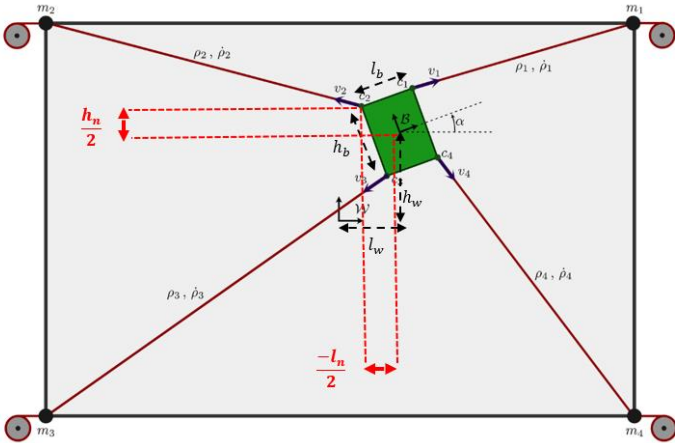
### 2.1.2 Donanım Altyapısı

Mekanizmayı kontrol etmek için Siemens Simotion D445-2'ye bağlı sekiz adet Siemens 1fk7042-2af71-1qa0 servo motor kullanılmıştır. Mekanizmada altıdan fazla motorumuz olduğu için arka taraftaki dört servo motor için Siemens S120 sürücüsü kullanılmıştır. Ön ve arka motorları Siemens Simotion D445-2 ile Siemens S120 sürücüsü arasında bölmemiz, aynı düzlemde bulunan motorlar arasında yaşanabilecek herhangi bir gecikmeyi önlemek amacıyla yapılmıştır. Öte yandan ön ve arka düzlemler arasında ihmal edilebilir bir gecikme olduğu gözlemlenmiş, ancak bu durumun hedeflediğimiz sonuçlar üzerinde herhangi bir etki yarattığı gözlemlenmemiştir.

### 2.1.3 Yazılım Altyapısı

Programlama için Siemens Simotion Scout v5.1 IDE'si ve kullandığımız tüm görevleri yerine getirebilen ST (Structured Text) programlama dili kullanılmıştır.

## 2.2 Modelleme ve Varsayımlar



Şekil 3. Kablo sürümlü düzlemsel mekanizmanın çizimi.  
(Figure 3. Illustration of the cable-driven planar mechanism.)

Bu bölümde, seri kablolu düzlemsel mekanizmanın modellenmesi, kinematiği, dinamiği ve ilişkili basitleştirmeler ve varsayımlar açıklanmıştır.

Şekil 3'te görülen model, I (eylemsizlik momenti), m (kütle), l\_b (B koordinat sistemine göre, uç efektörün genişliği) ve h\_b (B koordinat sistemine göre, uç efektörün yüksekliği) parametrelerine sahip esnemeyen bir gövdeyi göstermektedir. Gövdenin köşelerine dört adet elastik kablo bağlanmıştır. Gövdenin pozisyon ve oryantasyonu, gövdeyi sabit kabul ederek eylemsizlik gösteren dünyaya bağlı tanımlanmış bir W koordinat sistemine göre tanımlanmış olan B koordinat sisteminde gösterilmektedir. B koordinat sistemi, çalışma alanının merkezine yerleştirilmiştir. Aynı zamanda W koordinat düzlemindeki (l\_w (W koordinat sistemine göre B koordinat sisteminin orijinin yatay bileşeninin uzunluğu), h\_w (W koordinat sistemine göre B koordinat sisteminin orijinin düşey bileşeninin uzunluğu)) noktası, B koordinat düzleminin orijini olacak şekilde B koordinat sistemi tanımlanmıştır. Gövdenin Kartezyen koordinatlardaki pozisyon ve oryantasyonunu yani W'ya bağlı olarak tanımlanmış olan B'yi sırasıyla  ${}^W P_B = [x_B \ y_B]^T$  ve  $\alpha$  ile gösteriyoruz. Bu

bağlamda, W ve B arasındaki bazı kinematik rotasyonları modelleyebilmek için rotasyon matrisini  ${}^W R_B$  ve türevini de  $D_\alpha({}^W R_B)$  ile tanımlayabiliriz;

$${}^W R_B(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$D_\alpha[{}^W R_B(\alpha)] = \begin{bmatrix} -\sin\alpha & \cos\alpha \\ \cos\alpha & -\sin\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

Şekil 3'te görüldüğü gibi uç efektörün köşelerinin konumları, B'ye göre aşağıdaki denklem 3'te görüldüğü şekilde ifade edilebilmektedir;

$${}^B P_{c_1} = \begin{bmatrix} \frac{l_n}{2} \\ \frac{h_n}{2} \end{bmatrix}, \quad {}^B P_{c_2} = \begin{bmatrix} -\frac{l_n}{2} \\ \frac{h_n}{2} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$${}^B P_{c_3} = \begin{bmatrix} -\frac{l_n}{2} \\ -\frac{h_n}{2} \end{bmatrix} \quad \& \quad {}^B P_{c_4} = \begin{bmatrix} \frac{l_n}{2} \\ -\frac{h_n}{2} \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki ifade, denklem 4'teki esnemeyen kabul edilen uç efektör dönüşümünün, her köşenin koordinatlarını, her köşenin W referans düzlemine göre i ile gösterildiği şekilde hesapladığı durumda geçerlidir;

$${}^W P_{c_i} = {}^W R_B(\alpha) {}^B P_{c_i} + {}^W P_B \quad (4)$$

Ayrıca W referans düzlemine göre tanımlanmış olan uç efektör hızlarını, köşeler üzerine eşleştiren kinematik dönüşümü de üretmemiz gerekmektedir. Hem uç efektörün ötelenme hızı  ${}^W \dot{P}_B$  hem de dönme hızı olan  $\dot{\alpha}$ , köşelerin hızlarını etkilemektedir. Her i köşesi için yapılmış olan aşağıdaki denklem 5'teki dönüşüm bahsedilen eşleştirmeyi gerçekleştirmektedir.

$${}^W \dot{P}_{c_i} = D_\alpha[{}^W R_B(\alpha)] {}^B P_{c_i} \dot{\alpha} + {}^W \dot{P}_B \quad (5)$$

Mekanizmanın kontrol ve sürüşü, çalışma alanının köşelerine yerleştirilmiş olan dört motor sayesinde gerçekleşmektedir. Motor sürücülerin pozisyonları W referans düzlemine göre denklem 6'da görülen şekilde ifade edilebilmektedir;

$${}^W P_{m_1} = \begin{bmatrix} \frac{l_w}{2} \\ \frac{h_w}{2} \end{bmatrix}, \quad {}^W P_{m_2} = \begin{bmatrix} -\frac{l_w}{2} \\ \frac{h_w}{2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$${}^W P_{m_3} = \begin{bmatrix} -\frac{l_w}{2} \\ -\frac{h_w}{2} \end{bmatrix} \quad \& \quad {}^W P_{m_4} = \begin{bmatrix} \frac{l_w}{2} \\ -\frac{h_w}{2} \end{bmatrix}$$

Dinamik hareket denklemlerini üretmek ve kontrol algoritmasını geliştirebilmek için kablo uzunlukları ve kablo uzunluklarının değişim hızlarının da bilinmesi gerekmektedir, başka bir deyişle, her bağlantı için p\_i & p\_i değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Her bir kablonun uzunluğu aşağıda denklem 7'de belirtildiği şekilde hesaplanabilmektedir;

$$p_i = \| {}^W P_{m_i} - {}^W P_{c_i} \|_2 \quad (7)$$

Kablo uzunluklarının değişim hızlarını hesaplamak ve Jacobean matrisi üretmek için öncelikle her kablo tarafından

uygulanan kuvvetlerin yönlerini gösteren  $v_i, i \in \{1,2,3,4\}$  birim vektörlerini 8. denklemdeki şekilde bulmalıyız;

$$v_i = \frac{{}^W P_{m_i} - {}^W P_{c_i}}{p_i} \quad (8)$$

Bu vektörleri Şekil 3'te koyu mavi oklar ile gösteriyoruz. Bu vektörlere bağlı olarak basit iç çarpımlarının iz düşümü bize tek bir kablonun, kablo uzunluğunun değişim hızını vermektedir:

$$\dot{p}_i = -\langle v_i, {}^W P_{c_i} \rangle = -v_i^T {}^W \dot{P}_{c_i} \quad (9)$$

Daha önce bahsedildiği üzere kablolar sadece gerilme kuvveti uygulayabilmektedirler. Bu yüzden  $i$  kablosu tarafından uç efektör üzerindeki kuvvet vektörü aşağıdaki denklem 10'daki şekilde gösterilebilmektedir.

$$F_i = f_i v_i, \quad f_i \in \mathbb{R}^+ \quad (10)$$

Bu bağlamda, sistemin öteleme ve dönme dinamikleri denklem 11 ve 12'deki şekilde türetilmektedir;

$$m {}^W \ddot{P}_B = \sum_{i=1}^4 f_i v_i + \begin{bmatrix} 0 \\ -mg \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$I \ddot{\alpha} = \sum_{i=1}^4 [{}^W R_B(\alpha) {}^W P_{c_i}] X v_i f_i \quad (12)$$

Ayrıca dinamik hesaplamaları, Jacobean matrisi oluşturarak matrisler şeklinde tekrar yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} m {}^W \ddot{P}_B \\ I \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & v_i & \dots \\ \dots & [{}^W R_B(\alpha) {}^W P_{c_i}] X v_i & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -mg \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} m {}^W \ddot{P}_B \\ I \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = Jf + \begin{bmatrix} 0 \\ -mg \\ 0 \end{bmatrix}$$

Daha önce belirtildiği üzere motorlar, sistemi bir dizi elastik sistem içinde sürmektedir. Bu bağlamda, motorlar kabloların geride kalan uzunluklarını ve onların değişim hızlarını değiştirerek kabloları, çalışma alanının köşelerinden çekerler. Bu çerçevede, her motor kendi dinamikleri çerçevesinde iki çıktı üretmektedir,  $p_{o_i}$  ve  $\dot{p}_{o_i}$  (geride kalan kablo uzunluğu ve değişim hızı). Bu çıktıları da plant dinamiklerine iletir.

Dikkat edilmelidir ki kabloların sıkıştırma kuvveti uygulamaları mümkün değildir. Bu yüzden eğer kablolar üzerindeki hesaplanan efektif kuvvetler negatif çıkarsa (sıkıştırma kuvveti uygulamaya başlanması demektir) 13. denklemdeki minimum ifadesi,  $f_i$  değeri 0 yapılmalıdır.

Ayrıca motorların yüksek ama sınırlı bir bant genişliği olan hareket kontrolcülerini ile kontrol edildiğini varsayıyoruz, öyle ki motorlar  $\dot{p}_{o_i}^*(t)$  ile gösterilen referans hız sinyali takip edebilmektedirler.

## 2.3. Kontrol Yöntemi

Projemizde uç efektörden doğrudan ölçüm almamızın mümkün olmayacağını varsayarak yola çıktık. Bu yüzden "sensörsüz" kontrol terimini, izlediğimiz yöntem olarak tanımlayabiliriz. Kablo sürümlü sistemlerde uç efektörden geri dönüt almanın en yaygın yöntemi (genellikle pahalı yöntemi) dışarıdan sistemi takip ederek uç efektörün anlık parametrelerini (konum ve hız) görüntü temelli bir ölçüm/tahmin yöntemi ile gerçek zamanlı olarak belirlemektir. Bir diğer yaklaşım ise uç efektörün üzerinde bazı ekipman ve sensörler (doğrusal enkoderler, IMU sensörleri) kullanmak ve yüzey kontrol istasyonu ile uç efektörü kablosuz iletişim protokolleri kullanarak haberleştirmektir. Yukarıda bahsedilen her iki yöntemin en belirgin dezavantajı ekstra maliyetli olmasıdır. Bu maliyet, örnek alma sıklığı ve iletişim sırasındaki gecikmeler proje için kritik ve önemli gereklilik unsurları ise tasarım aşamasında önem arz etmektedirler. Bir diğer yandan da ekstra ölçüm ve donanım kullanılması tasarım, üretim ve bakım süreçlerinin de zorluğunu arttırmaktadır.

Sensörsüz bir kontrol yöntemi izleyerek teknik açıdan yukarıda bahsedilen problemleri eleyp, kontrol açısından problemi daha zor bir hale getirmekteyiz. Bu çalışmada paralel ileri beslemeli ve geri beslemeli kontrol yöntemlerini kullanarak verilen referans güzergahını takip edebilmekteyiz.

### 2.3.1 İleri Beslemeli Hız Kontrolü

İleri beslemeli/ açık döngülü bir kontrol yöntemi geliştirmek için bazı varsayımlarda bulduk ve tamamen kinematik temelli bir kontrolcü tasarladık. Her şeyden önce, motor kontrol dinamiklerinden kaynaklanan gecikmeler yok sayıldı ve  $\dot{p}_i(t) \approx \dot{p}_{o_i}(t)^*$  şeklinde kabul edildi,  $\dot{p}_{o_i}(t)$  kablo uzunluğunun gerçek zamanlı değişim hızını göstermektedir ve  $\dot{p}_{o_i}(t)^*$  ise kontrolcümüz tarafından üretilen kontrol girdisini göstermektedir. Ayrıca bu aşamada, kablodaki esnekliği ihmal ettik yani kabloları neredeyse esnemeyen katı bir malzeme gibi varsaydık. Bu varsayımlar ışığında 14. denklemdeki koşul elde edilmektedir;

$$\dot{p}_i(t) \approx \dot{p}_{o_i}(t) \approx \dot{p}_{o_i}^*(t) \quad (14)$$

Teknik olarak motor hızlarının doğrudan / kinematikselsel olarak kablo uzunluğunun değişim hızını kontrol edebileceğini varsaydık. Bu varsayımdan sonra uç efektörün referans güzergahına bağlı olarak tanımlanan koordinat sistemi üzerinden gerekli kablo uzunluklarını hesaplayarak kinematik hareket kontrolcüsünü oluşturabiliriz. Varsayalım ki  ${}^W P_B^*(t)$  türevlenebilir ve sürekli bir referans güzergahı olsun ve  ${}^W P_B^*(0) = {}^W P_B(t)$ . Zamana bağlı güzergahtaki uç efektörün hızını takip edebilmek için, 15. denklemdeki şartın sağlanması gerekmektedir;

$${}^W \dot{P}_B(t) = \frac{d}{dt} [{}^W P_B^*(t)], \quad \forall t \quad (15)$$

Dikkat edilmelidir ki çalışmamızda uç efektörün orijinal oryantasyonunu her zaman korumasını istemekteyiz yani;

$$\alpha^*(t) = 0 \text{ \& } \dot{\alpha}^*(t) = 0, \quad \forall t \quad (16)$$

Anlık olarak kablo hızları üzerinde doğrudan kontrolümüz olduğunu varsaydığımız için sadece gerekli motor hızlarını hesaplıyoruz, başka bir deyişle  $\dot{p}_i(t)$  parametresi, uç efektörün

istenen hız değişkenlerine doğrudan bağlıdır.  ${}^W P_B^*(t)$  ve  $\dot{\alpha}^*(t)$ , 2.2. bölümde türetilen kinematik hesaplarını kullanmaktadır. Ayrıca uç efektörün hız parametrelerini kablo uzunluğunun değişim hızına çevirmek için, 13. denklemden türetilmiş olan Jacobean matrislerini, kablolar üzerindeki kuvvetleri uç efektörün üzerindeki kuvvetler üzerine iz düşümünü alırken kullanıyoruz. Bu bağlamda, ilgili ileri besleme kontrol girdilerini 17. denklemden görüldüğü şekilde hesaplayabiliriz;

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_{o_1}^*(t) \\ \dot{p}_{o_2}^*(t) \\ \dot{p}_{o_3}^*(t) \\ \dot{p}_{o_4}^*(t) \end{bmatrix} = -J^T * \begin{bmatrix} {}^W \dot{P}_B^*(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

17. denklemden eksi işaretinin sebebi, kablo uzunluklarının kısalmasına sebep olan gerilme kuvvetini pozitif olarak kabul etmemizdir. İleri beslemeli kontrolcü, kontrol girdilerinden oluşan matrisi bir sonraki kontrol yöntemine iletir.

### 2.3.2 Geri Beslemeli Tork Kontrolü

Algoritmanın ileri beslemeli hız kontrol kısmının temelini oluşturmak için başlangıç seviyesinde bazı varsayımlarda bulunduk. Özellikle, hem motor dinamiğindeki düşük geçirimli filtreyi ve kablolardaki esnekliği ihmal ettik. Halbuki, diğer olası dinamik belirsizlikler ve etkileri ile birlikte bu varsayımlar, istenen ve gerçekleşen uç efektör güzergahları arasında bazı farklılıklara yol açmaktadır. Açıkça görülebileceği üzere bu sapmaları düzeltecek şekilde bazı geri beslemeli kontrol temelli düzeltmelerin kullanılması gerekmektedir. Normal şartlarda, en bariz çözüm yolu çıktılarından (uç efektörün pozisyon ve hızı) geri bildirim alınmasıdır. Buna karşın uygulamamızda uç efektörden doğrudan bir ölçüm almamaktayız, ki bu yüzden de yaklaşımımızı “sensörsüz” olarak adlandırıyoruz.

Her ne kadar kabloları seri elastik hız kontrol yaklaşımına dayanarak kontrol etsek de hala kablolar üzerindeki kuvvetleri, her bir motor üzerindeki akım ve tork değerlerini ölçerek elde edebiliriz. Bu ölçümlere dayanarak geri beslemeli bir kontrol uygulayabilmek için elde ettiğimiz bu değerler ile bazı referans/istenen kuvvet değerlerini karşılaştırmamız gerekmektedir. Bahsedilen referans güzergahlarını iki koşula bağlı olarak hesaplamaktayız. İlk olarak referans kuvvet vektörünün, uç efektör üzerindeki statik dengeyi sağladığından emin olmalıyız. Bu yüzden, verilen t zamanında referans kuvvet vektörü 18. denkleminde sağlanmalıdır;

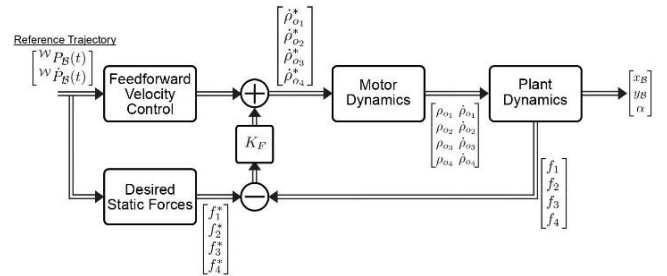
$$\begin{bmatrix} 0 \\ mg \\ 0 \end{bmatrix} = J^* f^* \quad , f^* \in \mathbb{R}^4 \quad (18)$$

$J^*$ 'yi hesaplamak için referans güzergahın kullanılması gerekmektedir.  $f^* \in \mathbb{R}^4$  olduğu için 18. denklemin dört farklı serbestlik derecesi içermektedir, ancak sağlanması gereken üç eşitlik bulunmaktadır. Bu yüzden fazla tanımlı bir doğrusal problem oluşmakta ve bu denklem sistemi sonsuz sayıda çözüme sahip olmaktadır. Kablolar sadece gerilme kuvveti uygulayabildikleri için (pozitif kuvvet), hesaplanan kuvvet değerlerinin pozitif olduğundan emin olmak için fazladan serbestlik ölçüsüne ihtiyaç duymaktayız. Ayrıca, pratik olarak kablo sürümlü sistemlerde, kablolar üzerindeki kuvvetlerin minimum bir eşik değerden her zaman fazla olması tercih

edilmektedir. Bu bağlamda 19. denklemindeki doğrusal şartın sağlanması gerekmektedir;

$$\min \{f_1^*, f_2^*, f_3^*, f_4^*\} \geq f_{min} > 0 \quad (19)$$

19. denklemindeki şart, eldeki denklemin doğrusal bir programlama problemine dönüştürmektedir ki bunu da standart optimizasyon yöntemleri ile çözebileceğiz. Daha sonra algoritmamız istenen ve ölçülen değerler arasındaki hatayı hesaplamaktadır yani  $e_f = f^* - f$ , hatayı skalar bir katsayı olan  $K_f$  (P kontrol değeri) ile çarpıp geri beslemeye gelen düzeltme etkisini toplama bloğuna iletmektedir. Toplama bloğu, ileri besleme ve geri besleme kontrolcülerinden gelen çıktıları toplayarak motor hareketlerine iletir. Şekil 4'te tüm sistemin blok diyagramı görülebilmektedir.



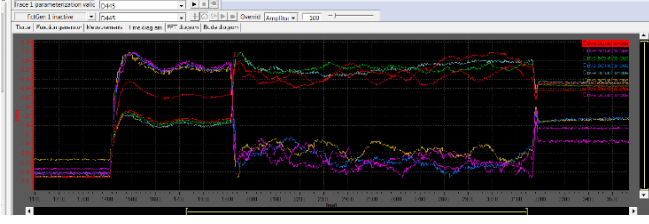
Şekil 4. Tüm sistemin blok diyagramı.

(Figure 4. Block diagram structure of the whole system.)

## 3. Sonuçlar ve Tartışma

Deneyler sırasında hataları en aza indirmeyi ve uç efektör kontrolünü optimize etmeyi amaçladık. Uç efektör daha uzun mesafeler hareket ettikçe, hatalarda bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Ancak hatalar her zaman %10'un altında kalıyor ki bu da inşaat alanındaki uygulamalar için kabul edilebilir düzeydedir. Ayrıca güvenli koşullarda çalışmamız gerektiğinden kabloları maksimum 1000 N çekme kuvveti altında güvenle çalışabilecek şekilde seçtik ve bazı gerilim kuvveti limitlerini aşmayacak şekilde motorlarımızı maksimum 10 Nm tork değerlerinde sınırladık. Bu sınırlamalar, x ekseninde -40 cm'den +40 cm'ye, y ekseninde ise -30 cm'den +30 cm'ye uzanan alanda güvenle çalışmamızı sağladı.

Tüm deneylerimizde (0.0 m, 0.0 m) noktasından başlayıp istenilen noktalara ( $x_d, y_d$ ) şeklinde hareket ettik. Burada (0.25 m, 0.0 m) noktasına gitmeyi hedefleyen bir deneyin sonuçlarını görebilirsiniz. Şekil 5'te görebileceğiniz gibi, deneyde tork değerlerinin maksimum büyüklüğü 2.6 Nm'dir ve daha önce açıkladığımız gibi güvenli koşullar altındadır. Şekil 6'da görebileceğiniz gibi, 8 adet motor vardır ve 4 motorlu gruplar halinde temelde 2 şekilde davranmaktadırlar. Pozitif x eksenine doğru hareket ettiğimiz için her düzlemde 1 ve 4 numaralı motorlar olan 4 motor tork değerlerini maksimum 2.6 Nm'ye çıkararak tepki verdiler. Diğer 4 motor ise daha küçük bir değerde zirveye sahipti. Şekil 6'daki y eksenindeki eksi işareti sadece saat yönünü ve saat yönünün tersini temsil etmektedir, bu nedenle işaretli değerler yerine sadece büyüklüklere odaklanıyoruz.

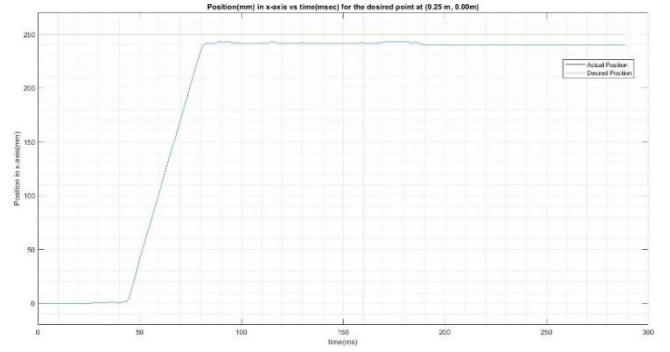


Şekil 5. Her motor üzerindeki ölçülen tork değerleri.

(Figure 5. Actual torque values on each motor.)

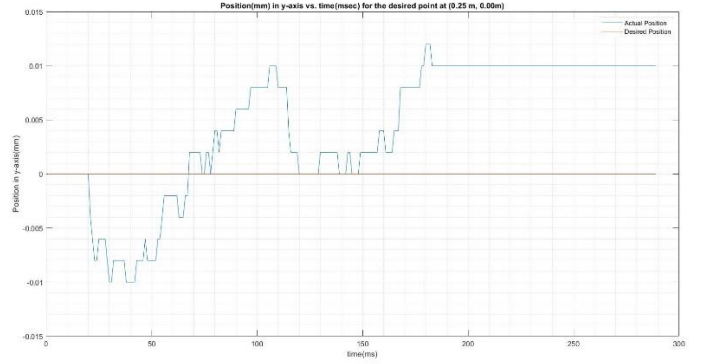
Ayrıca, bu deneyin sonucu, sırasıyla Şekil 6 ve 7'de sırasıyla x ve y eksenlerindeki gerçek konumlar olarak görülebilir. Şekil 6 ve 7'de görünen gerçek konum değerleri, mekanizmanın karşına yerleştirilen ve sadece ölçüm alma amaçlı olarak kullanılan bir kamera ile OpenCV kütüphanesi ve filtreleme teknikleri kullanılarak elde edilmiştir (Diniz, 1997), (Humphrey ve Jolicoeur, 1993), (Bradski ve Kaehler, 2008) ve (Huang, Pedoeem ve Chen, 2018). Bu örnek için gözlemimize göre sonuç (0.24 m, 0.01 m) idi. Kontrol edebileceğiniz gibi, x eksenindeki hata yüzde 4'tür, bu da daha önce söylediğimiz gibi yüzde 10'un altındadır. Öte yandan y ekseninde 0.01 m'lik bir hata vardır, bu hata, ölçüm cihazımızın 0.01 m olarak belirtilen hata payı içinde olup ve mm seviyesinde olduğu için bu anlamda pratik olarak önemsizdir.

Bu araştırmada kablo ile çalışan bir robotun kontrolü üzerinde çalıştık ve robotun kontrolünü optimize ederek hataları en aza indirmeye çalıştık. Öte yandan mevcut halihazırdaki kablo sürümlü düzlemsel mekanizmalarda sahada dört motor yerine sekiz motor ile yapılan kablo sürümlü düzlemsel bir mekanizma üzerinde çalışıp, daha iyi bir kontrol stratejisi ve bu anlamda daha az hata elde ettik. Khosravi ve Taghirad tarafından yürütülmüş çalışmanın sonuçlarına bakılacak olursa (Khosravi ve Taghirad, 2014), temelde x ve y eksenlerindeki gerçek konumlarla ilgili rakamların karşılaştırılması ile çözümümüzün etkilerinin gözlemlenmesi mümkün olacaktır. Şekil 6 ve 7, dört motorlu sistemlere ve diğer kontrol stratejilerine kıyasla her defasında hedefi aşırmanın önüne geçip aynı zamanda hata aralığının %10'dan daha az olmasını sağlayarak çözümümüzün nasıl çalıştığını açık bir şekilde örneklemektedir. Son olarak, sistem birçok kez istenen farklı noktalarda test edilmiş ve tüm sonuçlar burada bildirilen sonuçlarla uyumludur ki bu da önerilen çözümün verimliliğini göstermektedir.



Şekil 6. (0.25 m, 0.00m) hedef noktası için x-eksenindeki pozisyon(mm) vs. zaman(ms).

(Figure 6. Position(mm) in x-axis vs time(msec) for the desired point at (0.25 m, 0.00m).)



Şekil 7. (0.25 m, 0.00m) hedef noktası için y-eksenindeki pozisyon(mm) vs. zaman(ms).

(Figure 7. Position(mm) in y-axis vs. time(msec) for the desired point at (0.25 m, 0.00m).)

## Kaynakça

- Bradski, G., & Kaehler, A. (2008). *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. " O'Reilly Media, Inc."
- Diniz, P. S. (1997). *Adaptive filtering* (Vol. 4). Berlin, Germany:: Springer.
- Gosselin, C. (2014). Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives. *Mechanical Engineering Reviews*, 1(1), DSM0004-DSM0004.
- Huang, R., Pedoeem, J., & Chen, C. (2018, December). YOLO-LITE: a real-time object detection algorithm optimized for non-GPU computers. In *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)* (pp. 2503-2510). IEEE.
- Humphrey, G. K., & Jolicoeur, P. (1993). An examination of the effects of axis foreshortening, monocular depth cues, and visual field on object identification. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 46(1), 137-159.
- Jin, X., Jun, D. I., Pott, A., Park, S., Park, J. O., & Ko, S. Y. (2013). Four-cable-driven parallel

- robot. *제어로봇시스템학회 국제학술대회 논문집*, 879- 883.
- Khosravi, M. A., & Taghirad, H. D. (2014). Robust PID control of fully-constrained cable driven parallel robots. *Mechatronics*, 24(2), 87-97.
- Pott, A. (2010). An algorithm for real-time forward kinematics of cable-driven parallel robots. In *Advances in Robot Kinematics: Motion in man and machine* (pp. 529-538). Springer, Dordrecht.
- Sancak, C., Yamaç, F., & Mehmet, İ. T. İ. K. Kablo ile sürülen düzlemsel paralel bir robotun ileri kinematik çözümü ve kontrolü. *Konya mühendislik bilimleri dergisi*, 7, 862-874.
- Zi, B., Duan, B. Y., Du, J. L., & Bao, H. (2008). Dynamic modeling and active control of a cable-suspended parallel robot. *Mechatronics*, 18(1), 1-12.