



Konjuge elektroaktif bir polimer eyleyicinin mikro düzeyde yer değiştirmesinin görüntü tabanlı kayan kipli denetimi

Vision based sliding mode control of micro displacement of a conjugated electroactive polymer actuator

Caner SANCAK¹, Mustafa Yavuz COŞKUN¹, Mehmet İTİK^{1*}

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
csanca@ktu.edu.tr, mycoskun@ktu.edu.tr, mitik@ktu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 23.05.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 27.06.2016
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.14554
Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Bu çalışmada, üç katmanlı konjuge elektro-aktif bir polimer eyleyicinin yer değiştirme denetimi mikrometre seviyesinde görüntü tabanlı olarak yapılmıştır. Denetleme yöntemi olarak modellenmemiş belirsizliklere dayanıklı olan kayan kipli denetim farklı erişim kurallarıyla uygulanmıştır. Eyleyicinin uç noktasının yer değiştirmesini mikrometre seviyesinde gözlemlemek için mikroskop ve geri besleme sinyali oluşturmak amacıyla görüntü işleme sistemi kullanılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar konjuge elektroaktif polimer eyleyicinin yer değiştirme kontrolünün mikrometre seviyesinde başarı ile yapılabildiğini ve hücre enjeksiyonu gibi mikro hareket ettirme (manipulation) içeren uygulamalarda kendine yer bulabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Kayan kipli denetim, Konjuge elektroaktif polimer eyleyici, Mikro yer değiştirme kontrolü, Görüntü tabanlı kontrol

Abstract

In this paper, vision based displacement control of a tri-layer conjugated electro-active polymer actuator has been performed in micrometer resolution. Sliding mode control with different reaching laws which is robust to unmodeled uncertainties has been used as the control method. A microscope has been used to observe position of the free end point of the actuator and a vision based system has been employed for feedback signal. Experimental results show that the conjugated electro-active polymer actuators can be successfully controlled in micrometer resolution and can be used in applications which includes micromanipulation like cell injection.

Keywords: Sliding mode controller, Conjugated electroactive polymer actuator, Micro displacement control, Vision based control

1 Giriş

Elektroaktif polimer (EAP) eyleyiciler elektriksel uyarım sonucunda boyut ve şekil değişikliği gösteren polimer esaslı akıllı malzemelerden yapılmış yeni nesil eyleyicilerdir. EAP eyleyiciler elektrik enerjisini bir takım elektro-kimyasal dönüşüm sonucunda mekanik enerjiye dönüştürürler. Bu esnada gerçekleştirdikleri hareket gerçek kaslara benzediğinden dolayı yapay kas olarak da adlandırılmaktadırlar [1]-[3].

EAP eyleyiciler çalışma mekanizmalarına göre elektronik ve iyonik olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedirler. Elektronik EAP eyleyiciler Coulomb kuvvetlerinin etkisi altında çalışmakta olup etkinleşme eşikleri 100 V/μm seviyesindedir, buna karşın iyonik EAP eyleyiciler iyon taşınımını temel alan hareket mekanizmalarıyla 5 V'un altında etkinleşmektedirler [2],[4]. İyonik EAP eyleyicilerin bir türü olan konjuge EAP (KEAP) eyleyiciler görece düşük etkinleşme enerjisi gereksinimi ve hava ortamında çalışabilmeleri ile diğer iyonik EAP eyleyicilerden ayrılmaktadırlar. Ayrıca, bu tip eyleyicilerin biyo-uyumlu [5] olmaları biyomedikal uygulamalarda kullanılmalarının önünü açmaktadır. Bunun yanı sıra, KEAP eyleyiciler kolay şekillendirilebilmeleri, uygulanan elektriksel uyarıya nazaran büyük gerinim sergilemesi, güç yoğunlukları ve mekanik uyumluluklarının yüksek, yapısal olarak basit ve düşük maliyetli olmaları başta mikro hareket ettirme [6],[7] olmak üzere biyomedikal mühendislik uygulamaları [1],[8],

robotik, akışkan gücü kontrolü [9] gibi geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmaktadır.

KEAP eyleyiciler çevresel faktörlerden dolayı iç yapılarındaki değişimler neticesinde açık çevrim olarak kullanılmaya uygun değildir. Bu eyleyicilerin uygulamalardaki kullanımı yaygınlaştırmak için hassas olarak geri beslemeli şekilde kontrol edilmeleri gerekmektedir. Literatürde KEAP eyleyicilerin geri beslemeli denetimi üzerine farklı yöntemler önerilmiştir. Bu çalışmalara örnek olarak, PD+I bulanık mantık ve uyarlamalı bulanık mantık tabanlı akıllı denetleyiciler [10], uyarlamalı gürbüz denetim [11] ve tekrarlamalı denetim [12] çalışmaları verilebilir. Yapılan çalışmaların ortak noktası eyleyicinin belirsizliklerine dayanıklı yöntemlerle milimetre seviyesinde yer değiştirme denetiminin yapılmasıdır. Bunun yanı sıra KEAP eyleyicilerin konum verisinin elde edilmesinde genel olarak lazer konum ölçerler kullanılmaktadır. Lazer konum ölçerler çok yer kaplamaları, konumlandırılma problemleri, ve yüksek maliyetleri gibi bir çok dezavantajdan dolayı KEAP eyleyicilerin özellikle mikro hareket ettirme gibi uygulamalarda yaygınlaşmasının önünde ki bir diğer engeldir.

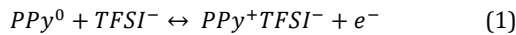
Bu çalışmada, ankastre bağlantılı 3 katmanlı polipirol polivinylidene fluoride (PPy(PVDF)) KEAP eyleyicinin serbest ucunun yer değiştirme denetimi kayan kipli denetim (KKD) yöntemi ile mikrometre seviyesinde yapılmıştır. KKD yönteminin seçimiyle parametrik model belirsizliklerinin ve modellenemeyen bozucuların kontrol performansı üzerindeki olumsuz etkileri en düşük seviyede tutulmuştur. Özellikle lazer

konum ölçerin getirdiği olumsuzlukların ortadan kaldırılması için konum verisi bir kamera yardımı ile elde edilerek KEAP eyleyicinin geri beslemeli kontrolü görüntü tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın içeriği sırasıyla şöyledir. Bölüm 2'de üç katmanlı KEAP eyleyici tanımlanmıştır. KEAP eyleyicinin yer değiştirme kontrolünde kullanılan KKD yöntemi Bölüm 3'te açıklanmıştır. Bölüm 4 kontrol işleminde kullanılan geri besleme sinyalinin görüntü işleme yöntemi ile nasıl elde edildiğini irdelemektedir. Bölüm 5'te ise KEAP eyleyicinin modellenmesi, kontrolcü tasarımı ve elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir. Son olarak sonuçlar irdelenmiş ve gelecekte yapılacak çalışmalara değinilmiştir.

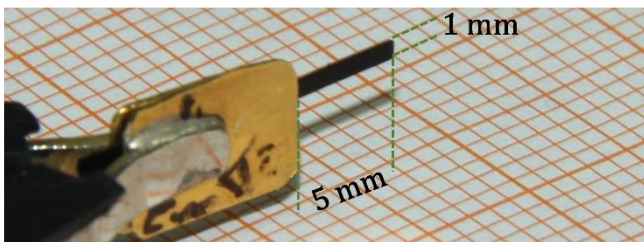
2 Üç katmanlı konjuge elektroaktif polimer eyleyici

Bu çalışmada kullanılan KEAP eyleyici üç katmanlı bir yapıya sahip olup boyutları 5x1x0.17 mm'dir. Eyleyicinin dış katmanları ~30 µm kalınlığında iletken polipirol (PPy) ve iki dış katmanın arasındaki katman ise ~110 µm kalınlığında yalıtkan polyvinylidene fluoride'dir (PVDF) (Şekil 1). İletkenliği artırmak amacıyla PPy katmanlar ile PVDF katmanın arasında 0.2 µm kalınlığında altın kaplama bulunmaktadır [13]. PVDF katman gözenekli yapısı sayesinde elektrolit sıvı içerisinde tutarak hareket anında gerekli olan iyon ihtiyacını karşılamakta ve eyleyicinin kuru ortamlarda çalışabilmesini sağlamaktadır [2], [14]. Bu çalışmada kullanılan elektrolit sıvı lithium trifluoromethanesulfonimide (Li+TFSI-) ve propylene carbonate (PC) çözümü içermektedir.

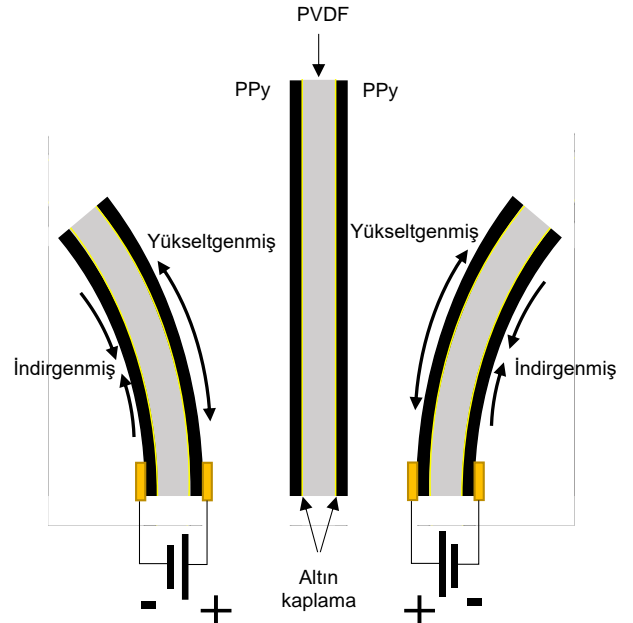
Eyleyiciye yeterli gerilim uygulanması durumunda yükseltgenme-indirgenme (redoks) tepkimeleri meydana gelmektedir. Tepkimelerin sonucunda elektronların ve iyonların katmanlar arasında hareket etmeleri dış katmanlarda genişmeye ve daralmaya sebep olmakta ve meydana gelen hacimsel değişimler sonucunda eyleyici bükülme hareketi yapmaktadır [15]. Ankastr olarak kısaç şeklindeki elektrotlara bağlanan eyleyicinin anot tarafındaki PPy katman yükseltgenirken katot tarafındaki PPy katman indirgenir, uygulanan elektrik geriliminin kutupsallığına bağlı olarak bükülme yönü değişir (Şekil 2). Bükülmeyi oluşturan redoks tepkimesi Denklem (1)'de verilmiştir. KEAP eyleyicide meydana gelen redoks tepkimesi sonucunda artı kutba bağlı PPy tabakaya TFSI⁻ anyonlarının girmesiyle bu tabaka yükseltgenerek genişlemektedir. Bu sırada eksi kutba bağlı PPy tabakadan TFSI⁻ anyonlarının çıkmasıyla indirgenen tabaka büzülme hareketi yapmaktadır [13].



PPy	~30 µm
PVDF	~110 µm
PPy	~30 µm



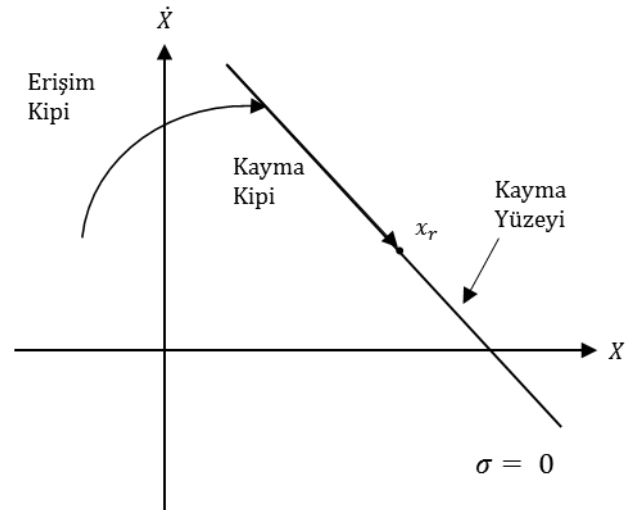
Şekil 1: Üç katmanlı PPy(PVDF) KEAP eyleyicinin yapısı (Üst şekil) ve çalışmada kullanılan eyleyici (Alt şekil).



Şekil 2: Üç katmanlı PPy(PVDF) KEAP eyleyicinin redoks tepkimesi sonucu bükülme hareketi.

3 Kayan kipli denetim

Değişken yapıli kontrol (Variable structure control) sistemlerinin bir alt türü olarak KKD, bir sistemin durum vektörünün istenilen bir dinamik davranışa çekilmesi ve bu davranışın korunarak denge durumuna ulaşılması temeline dayanmaktadır. Bu dinamik davranış sistemin faz düzleminde belirlenen bir kayma yüzeyi etrafında gerçekleşmektedir [16]. İkinci mertebeden tek girişli ve tek çıkışlı bir sistemin referans takibi için zamanla değişen kayma yüzeyi ve yüzeye çekilme durumu Şekil 3'te verilmiştir [17].



Şekil 3: İkinci mertebeden bir sistemin kayan kipli denetimi.

Burada $x_r = [x_r, \dot{x}_r]$ sistemin ulaşması istenilen referans durum vektörüdür.

KKD tasarımında ilk olarak sistemin referans noktasına ulaşmasını sağlayan ve $\sigma = 0$ ile tanımlanan bir kayma yüzeyinin tasarımı yapılmakta ve ardından sistemin bu yüzeye ulaşmasını ve yüzeyde tutulmasını sağlayan bir kontrol kuralı oluşturulmaktadır [16]. Bu kapsamda KKD tasarımı kayma yüzeyi ve yüzey dışı dinamikler olmak üzere iki ayrı kısımda

incelenmektedir. Yüzey dinamikleri σ fonksiyonu tarafından belirlenirken yüzey dışı dinamikler sistemin kayma yüzeyine ulaşmasını sağlayacak şekilde Denklem (2)'de gösterilen yapıda olabilir [18].

$$\dot{\sigma} = -f(\sigma) \quad (2)$$

Burada $f(\sigma)$ azalmayan tek bir fonksiyondur. Buradan görüleceği üzere mevcut durumun kayma yüzeyine olan mesafesini veren σ fonksiyonundaki değişim, daima σ fonksiyonunun zıttı işarete sahiptir. Bu denklem kararlı bir kontrolün uygulanması için gereklidir ve bu şekilde bir kontrolün uygulanabilmesi için $\dot{\sigma}$ fonksiyonu, kontrol girdisinin bir fonksiyonu olmalıdır. Bu durumun uygulanabilmesi için $\dot{\sigma}$, hatanın ikinci türevinin bir fonksiyonu olmalıdır. Böyle bir durumda σ fonksiyonu; yalnızca hata ve hatanın birinci türevini içeren bir fonksiyonu olabilmektedir. En basit şekilde; zaman sonsuza giderken hata değerinin sifıra gitmesini garantileyen kayma yüzeyi fonksiyonu ise Denklem (3)'te verildiği gibi seçilebilmektedir.

$$\sigma = \dot{e} + \lambda e = 0 \quad (3)$$

Burada λ sabit bir pozitif katsayıdır ve hata, sistem durum vektörü ile referans vektörü arasındaki farktır ($e = x - x_r$). Sonuç olarak eğer σ sifıra götürülürse tırmanma hatası da sifıra gidecektir [17].

Kayma yüzeyinin belirlenmesinin ardından kontrol girdisi, ikinci mertebe bir sistem için aşağıdaki şekilde elde edilebilir [17].

İkinci dereceden bir sistem Denklem (4) ile ifade edilsin;

$$\ddot{x} = (-a_1\dot{x} - a_2 x)\xi(t) + bu \quad (4)$$

Burada x çıktı, u ise girdi parametreleri, a_1 , a_2 ve b sabit katsayıları göstermektedir. $\xi(t)$ fonksiyonu alt ve üst sınırları belirli olan model belirsizliği olarak kabul edilmiştir. Referans değişkeninin takibinin sağlanması için kayma yüzeyi ise Denklem (5)'te verildiği şekilde hata ve türevinin bir fonksiyonu olarak seçilsin;

$$\sigma = \dot{e} + \lambda e = \dot{x} - \dot{x}_r + \lambda(x - x_r) \quad (5)$$

Kontrol değerinin bulunabilmesi için yüzeyin türevi Denklem (6)'da ki gibi sifıra eşitlenirse

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \ddot{x} - \ddot{x}_r + \lambda(\dot{x} - \dot{x}_r) \\ &= (-a_1\dot{x} - a_2 x)\xi(t) + bu - \ddot{x}_r \\ &\quad + \lambda(\dot{x} - \dot{x}_r) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

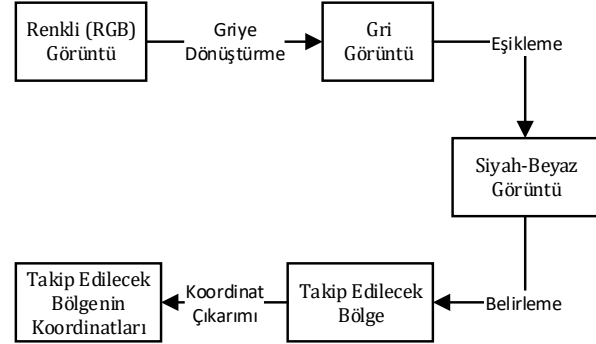
ve erişim kuralı olarak Denklem (2) gibi bir fonksiyon belirlenirse Denklem (2) ve Denklem (6) kullanılarak toplam kontrol girdisini veren eşitlik Denklem (7)'deki gibi elde edilir.

$$u = \frac{1}{b} [\ddot{x}_r - \lambda(\dot{x} - \dot{x}_r) - f(\sigma) + (a_1\dot{x} + a_2 x)\xi(t)] \quad (7)$$

4 Görüntü işleme

Sistemden gerçek zamanlı olarak elde edilen görüntüler işlenerek eyleyicinin serbest ucunun yer değiştirme bilgisi elde edilmiş ve geri besleme sinyali olarak kontrol sisteminde kullanılmıştır. Görüntü işleme için kullanılan algoritmalar iki seviyede incelenebilir: Düşük ve orta seviyeler. Düşük seviye olarak uygulanan kesme, griye dönüştürme, eşikleme ve

kapama işlemleri ile görüntü orta seviyeye uygun hale getirilmektedir. Orta seviyede, görüntüye alan belirleme ve koordinat çıkarım işlemleri uygulanarak eyleyicinin yer değiştirme kontrolünde kullanılacak olan geri besleme sinyali elde edilmiştir. Uygulanan işlemler Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4: Koordinat çıkarımı için kullanılan görüntü işleme adımları.

4.1 Düşük seviye işlemler

İlk olarak kameradan RGB renk formatında $M \times N$ piksel boyutunda renkli görüntü alınarak griye dönüştürme işlemi ile 3 kanallı renkli görüntü 1 kanallı gri seviye görüntüye dönüştürülmektedir.

Yapılan çalışmada 640x480 piksel boyuta sahip görüntü içerisinde hareketin gerçekleştiği alan 290x180 piksellik alanı kapsamaktadır. İlgili alanı yaklaşımı ile sadece bu alan seçilerek görüntünün boyutu azaltılmıştır. Gerçek zamanlı görüntü işlemenin en büyük dezavantajlarından birisi ihtiyaç duyduğu işlem gücüdür. Griye dönüştürme adımından sonra ilgi alanı yaklaşımının uygulanmasıyla sonraki adımlarda işlenmesi gereken veri miktarı ~%95 oranında azaltılarak her bir görüntünün işlenmesi için gereken işlem gücü ve süresi azaltılmaktadır.

İlgili alanı yaklaşımının uygulanmasından sonra elde edilen görüntüye eşikleme işlemi uygulanmaktadır. Bu işlem ile birbirinden farklı renklerde olan arka plan (siyah) ile KEAP eyleyicinin serbest uç noktası (beyaz) birbirinden ayırt edilmektedir. Eşik değeri seçimi Otsu'nun [19] önerdiği yöntemle işlenecek her görüntü için otomatik olarak yapılabilmesine rağmen bu çalışmada statik eşik değeri kullanılmaktadır. Böylelikle işlenecek her görüntü için ilave işlem yükü oluşmasının önüne geçilmektedir. Statik eşik değeri kullanımı sebebiyle ortamın aydınlatmasının daima aynı olması önem arz etmektedir. Bu sebepten dolayı deneysel çalışmanın yapıldığı ortam uygun ışıklandırma ile aydınlatılmıştır.

4.2 Orta seviye işlemler

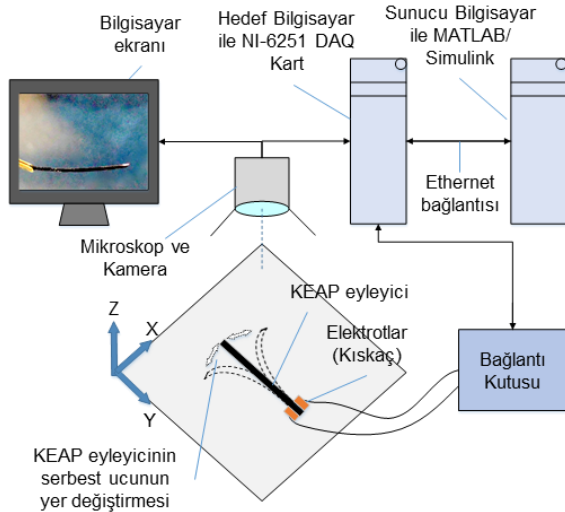
Deney sistemi hazırlanırken kullanılan bütün öğeler görüntü işlemeyi kolaylaştırması için seçilmesine rağmen aydınlatmadan ve diğer çevresel etmenlerden dolayı elde edilen görüntü gürültülü olabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı ilgililenen alan (eyleyicinin serbest ucu) dışında bölgeler görüntüde belirmektedir. Takip edilmesi istenen bölge dışındaki alanları elemek için görüntü içerisinde bütünlük arz eden her bir alanın büyüklüğü hesaplanmakta ve önceden belirlenen bir aralığın dışında kalan alanlar görüntüden çıkartılmaktadır. Alan aralığının seçimi ilgililenen alan göz önünde bulundurularak yapılmaktadır.

Son işlem olarak görüntüde kalan alanın ağırlık merkezinin koordinatları hesaplanarak takip edilecek bölgenin konumu

görüntü düzleminde belirlenmektedir. Takip edilen alanın başlangıç konumuna göre yer değiştirilmesi Öklid uzaklığı kullanılarak piksel cinsinden bulunmakta ve bu değer pikselden mm'ye dönüşüm katsayısı ile çarpılması sonucunda kontrolcüye beslenecek olan geri besleme sinyali elde edilmektedir.

5 Deneysel çalışmalar

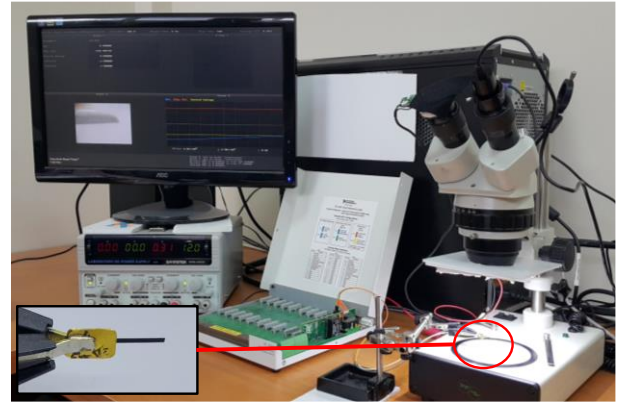
Bu çalışmada boyutları 5x1x0.17 mm olan bir ucu elektrotlar arasında sabitlenmiş diğer ucu ise serbest bırakılmış bir KEAP eyleyici kullanılmış ve elektrik gerilimi eyleyiciye sabitlenmiş uçta bulunan elektrotlar vasıtasıyla uygulanmıştır (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**). Uygulanan elektrik gerilimi sonucu eyleyici bükülerek serbest ucun yer değiştirmesini sağlamıştır. Meydana gelen yer değiştirme ise sistem çıktısı olarak kabul edilmiştir. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 5'te ve resmi Şekil 6'da verilmiştir. Deney düzeneğinde biri hedef diğeri sunucu olmak üzere iki bilgisayar bulunmaktadır. MATLAB/Simulink yazılımı çalıştıran sunucu bilgisayar kontrol sisteminin tasarımı, hedef bilgisayara aktarımı ve hedef bilgisayardan verileri alınması amacıyla kullanılmıştır. Hedef bilgisayar MATLAB tarafından sağlanan Simulink Real-Time altyapısını kullanmaktadır. Görüntü işleme, denetleyici sistemin yürütülmesi ve üretilen denetim çıktısının National Instruments firmasına ait NI-6251 PCI veri toplama kartı ve NI SC-2345 sinyal kutusu yardımıyla eyleyiciye iletilmesi hedef bilgisayar ile gerçekleştirilen işlemlerdir. İki bilgisayar arasındaki bağlantı TCP/IP ağ bağlantısı ile sağlanmıştır. Görüntü almak için Logitech firmasına ait C310 web kamerası ve Prior / James Swift firmasına ait mikroskop kullanılmıştır. Kamera USB 2.0 arayüzü üzerinden hedef bilgisayara bağlanmıştır ve uygun ışıklandırmanın sağlanması amacıyla beyaz LED ışıklardan faydalanılmıştır. Görüntü işleme esnasında eyleyicinin uç noktasının ayırt edilebilmesi için uç kısmını beyaza boyanmış ve statik eşik değeri 150 olarak seçilmiştir.



Şekil 5: Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Bu çalışma kapsamında eyleyicinin serbest ucunun yer değiştirme kontrolü kayan kipli denetim sistemi ile yapılmıştır. Hedef bilgisayar 290x180 piksel çözünürlükte saniyede 25 kare'yi gerçek zamanlı olarak işleyebilmektedir. Görüntü işleme hızı sistemin dar boğazı olduğu için hem sistem tanılama hem de kontrol sistemi için örnekleme zamanı 0.04 saniye olarak seçilmiştir. Kayan kipli denetleyiciyi tasarlamak

amacıyla sistem tanılama yöntemi ile KEAP eyleyicinin modeli girdisi elektrik gerilimi, çıktısı yer değiştirme olarak elde edilmiştir.



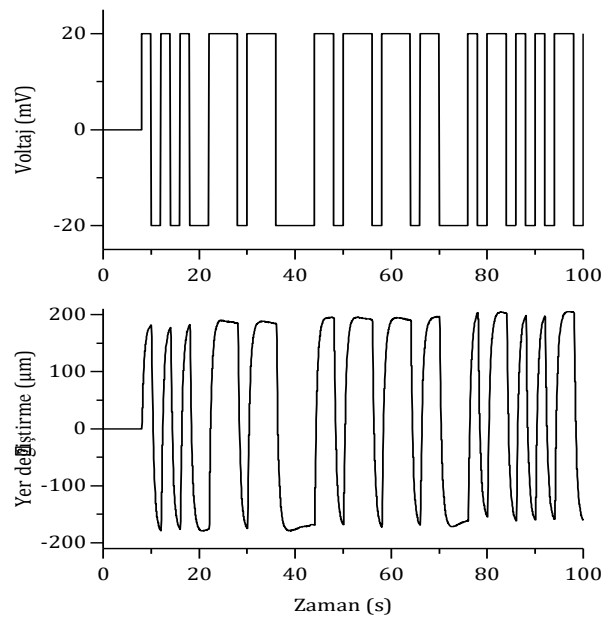
Şekil 6: Deney düzeneğinin ve kullanılan eyleyicinin resmi.

5.1 Sistem tanılama

Eyleyicinin serbest ucunun yer değiştirmesinin modellenmesi sırasında modelleme için kullanılacak sinyalin seçimi takip edilmesi istenen referans sinyaline göre yapılmalıdır. Bu durum göz önünde bulundurularak modelleme sinyali için 20 mV genliğinde ve 0.5 Hz bant genişliğinde rastgele bit dizisi (Pseudorandom Binary Sequence, PRBS) kullanılmıştır. Seçilen modelleme sinyaline karşılık elde edilen açık çevrim sistem cevabı Şekil 7'de verilmiştir. Yer değiştirme modelinin eldesi için doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi kullanılmış ve ARX (Autoregressive Exogeneous) biçiminde 2. dereceden bir model elde edilmiştir. Elde edilen model Denklem (8)'de verilmiştir.

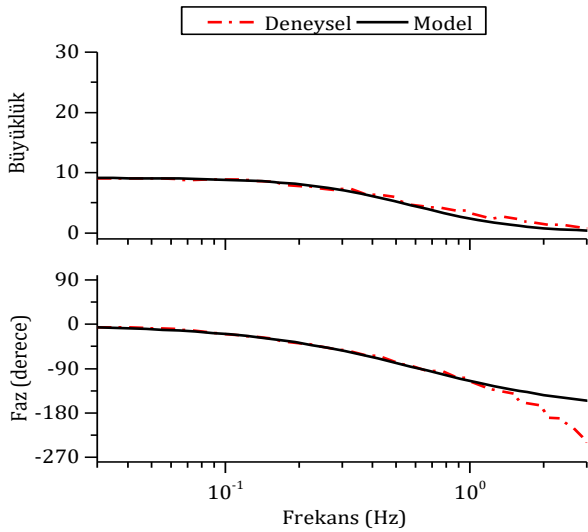
$$G(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{138.9}{(s + 5.656)(s + 2.689)} \quad (8)$$

Burada G(s), sistem çıkışını y(t)'nin Laplace dönüşümü Y(s) ve giriş voltajı v(t)'nin Laplace dönüşümü V(s)'ye bağlı sistemin transfer fonksiyonunu ifade etmektedir.

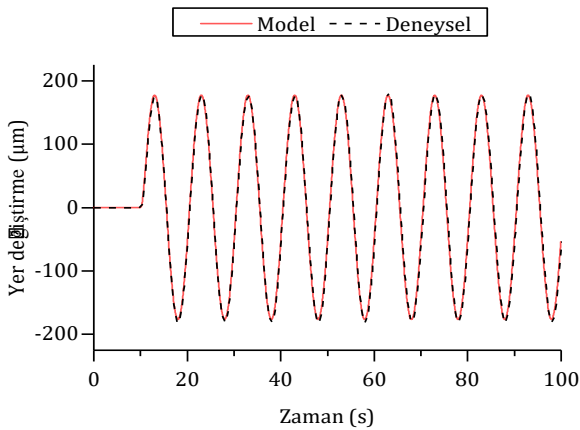


Şekil 7: Eyleyicinin 20mV genlik ve 0.5 Hz bant genişliğine sahip PRBS girdisine verdiği açık çevrim yer değiştirme cevabı.

Denklem (2)'de verilen modelin doğrulanması için eyleyicinin ve modelin frekans cevapları ile 20 mV genlikli 0.1 Hz bant genişliğine sahip sinüs sinyaline verdikleri cevaplar karşılaştırılmıştır. Şekil 8'de model ve deneysel olarak elde edilen frekans cevaplarının 0.04–0.6 Hz arasında büyük oranda uyduğu görülmektedir. Şekil 9'da ise model ile eyleyicinin sinüs sinyaline verdiği deneysel cevabın frekans cevaplarında olduğu gibi büyük oranda uyduğu görülmektedir. Elde edilen model farklı verilerle doğrulanarak uygunluğu ortaya konulmuştur (Tablo 1). Kullanılan deneysel verilerle sağlanan yüksek uyumun modelin kontrolcü tasarımı için yeterli olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 8: Yer değiştirme modeli ile deneysel olarak elde edilen verinin frekans cevabı karşılaştırması.



Şekil 9: 20 mV genlik ve 0.1 Hz bant genişliğine sahip sinüs sinyali ile elde edilen model ve deneysel cevap.

Tablo 1: Yer değiştirme modelinin normalleştirilmiş ortalama karesel hata (Normalized Root Mean Square Error, NRMSE) cinsinden deneysel veri ile uyumu.

Karşılaştırılan girdi veriler	Model cevabının uyum oranı (%)
20 mV - 0.5 Hz PRBS	94.88
20 mV - 0.1 Hz Sinüs	97.53

5.2 Kontrolcü tasarımı ve deneysel çalışmalar

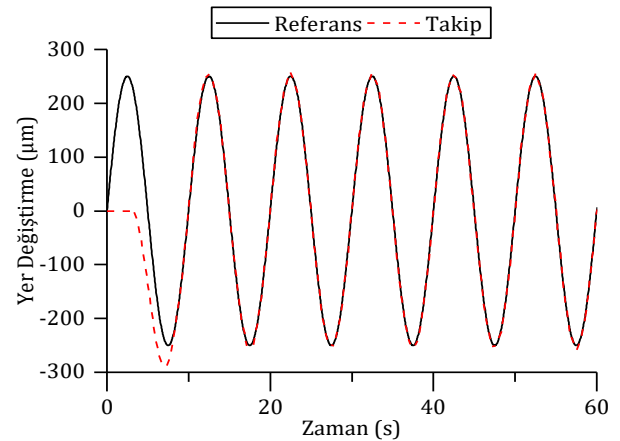
Bu çalışmada kullanılan KKD'nin parametre seçimi için Denklem (8)'de verilen model kullanılmıştır. Kayma yüzeyi Denklem (3) ve $\lambda = 10$ kullanılarak oluşturulmuştur. Denetim sisteminin erişim kuralı için Denklem 9 ve Denklem 10 olmak üzere 2 farklı yaklaşımdan faydalanılmıştır:

$$\dot{\sigma} = -K\sigma \quad (9)$$

$$\dot{\sigma} = -Q \text{sign}(\sigma) \quad (10)$$

Burada sign , işaret fonksiyonudur. K ve Q , tek girdili 2. mertebeden bir sistem için pozitif sabit katsayılar olarak seçilebilmektedir.

K ve Q parametrelerinin seçimi, model belirsizliklerinden kaynaklanan takip hatalarını giderebilecek şekilde yapılmalıdır. Uygun büyüklükte parametre seçimi ile yüzeye ulaşma koşulu sağlanacaktır. Bu parametrelerin yüksek belirlenmesi yüzeye ulaşma süresini kısaltacaktır fakat bu durumda Denklem (9)'daki erişim kuralı ile başlangıç durumunda uygulanacak olan kontrol voltajının da yüksek olacak olması ve ayrıca Denklem (10)'daki erişim kuralı ile kontrol voltajının sürekli yüksek voltajlar aralıklarında değişecek olması EAP benzeri eyleyiciler açısından zararlı olacaktır. Bu kapsam doğrultusunda deneysel çalışmalar sonucu Denklem (9)'da belirtilen erişim kuralı için $K = 5$ ve Denklem (10)'da belirtilen erişim kuralı için ise $Q = 300$ değerleri belirlenmiştir. K , Q ve model katsayıları ile toplam denetim girdisi Denklem (7) kullanılarak belirlenmiştir. Tasarlanan denetçiler 250 μm genliğinde iki farklı frekanslardaki (0.05 Hz ve 0.1 Hz) sinüs dalgaları ile test edilmiştir. Kayma yüzeyine erişme dinamiklerinin görülebilmesi amacıyla denetim sistemi referans sinyali verildikten 3 saniye sonra etkinleştirilmiştir. Elde edilen denetim cevapları Şekil 10-13'te verilmektedir.



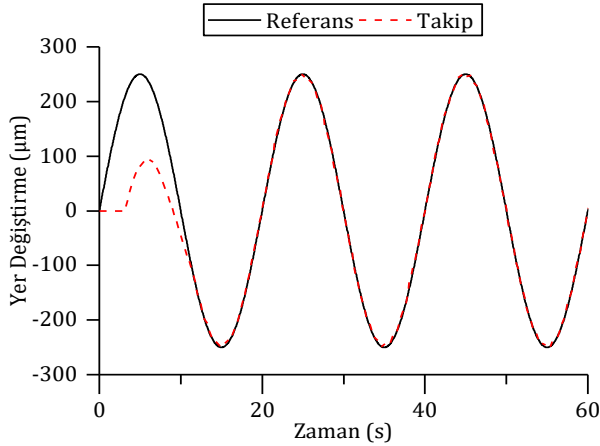
Şekil 10: $\dot{\sigma} = -Q \text{sign}(\sigma)$ erişim kuralı için 0.1Hz sinüs referans sinyali takibi.

Şekil 10'da görüldüğü üzere denetleyici 3. saniyede devreye girdikten sonra sistemin kayma yüzeyine ulaşması için yaklaşık altı saniyelik bir süre geçmiştir. Sistem kayma yüzeyine ulaştıktan sonra yüzeye tutularak verilen referans sinyali takip edilmiştir. Referans takibinde oluşan en büyük hata %15.2 seviyesindedir ve denetleyicinin 3 saniye geç devreye girmesi bu durumda etkin rol oynamıştır.

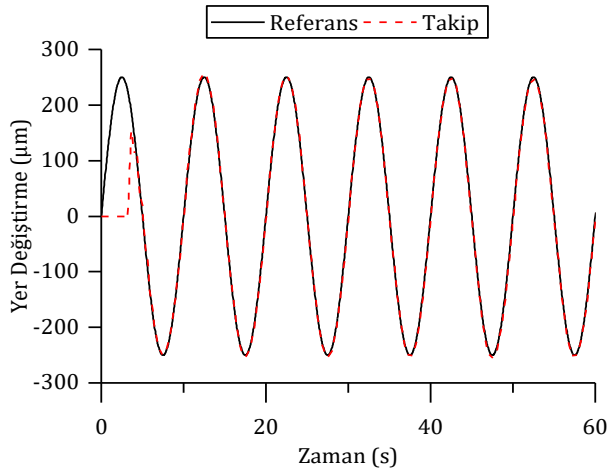
Şekil 11'de düşük frekanslı referans sinyalinin takibinde sistem için kayma yüzeyine ulaşma süresinin arttığı görülmektedir.

Buna karşın Şekil 10'daki gibi bir aşma durumu oluşmamış ve RMS hatası 3.5255 μm olarak ortaya çıkmıştır.

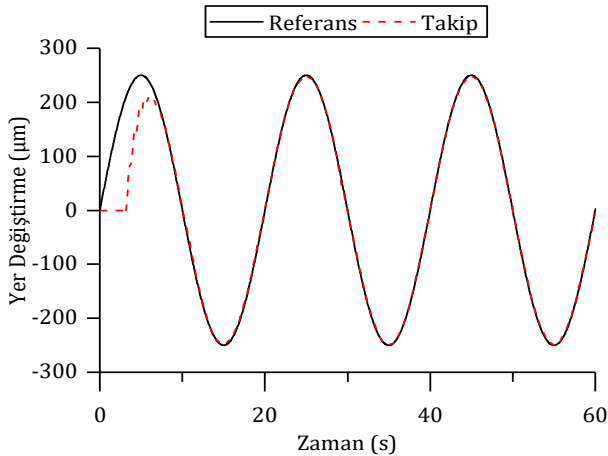
Erişim kuralının oransal olarak seçilmesi sabit değişimli kayma kipi kuralına göre ulaşma süresi bakımından daha iyi bir performans sergilemiştir. Şekil 12'de sabit değişimli kayma yüzeyi ile elde edilmiş 0.1 Hz frekanslı sinüs sinyalinin takip performansı verilmiştir.



Şekil 11: $\dot{\sigma} = -Q \text{sign}(\sigma)$ erişim kuralı için 0.05Hz sinüs referans sinyali takibi.



Şekil 12: $\dot{\sigma} = -K\sigma$ erişim kuralı için 0.1Hz sinüs referans sinyali takibi.



Şekil 13: $\dot{\sigma} = -K\sigma$ erişim kuralı için 0.05Hz sinüs referans sinyali takibi.

Şekil 13'de ise 0.05 Hz frekanslı referans sinyalinin takibinde sistemin kayma yüzeyine ulaşma süresinin arttığı gözlenmiştir. Benzer bir durum Şekil 11'de de gözlenmektedir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen denetim cevapları için takibe başlama süresi ve kalıcı hal RMS (root mean square) hata değerleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2: Sinüs referans sinyalinin farklı erişim kurallarıyla takip edilmesi esnasında elde edilen değerler.

Erişim kuralı	Bant genişliği [Hz]	Referansa ulaşma süresi [s]	RMS hatası [μm]
$\dot{\sigma} = -Q \text{sign}(\sigma)$	0.1	5.4	3.2668
$\dot{\sigma} = -Q \text{sign}(\sigma)$	0.05	8.4	3.5255
$\dot{\sigma} = -K\sigma$	0.1	2.2	4.1750
$\dot{\sigma} = -K\sigma$	0.05	4.7	2.4750

6 Sonuçlar ve gelecek çalışmalar

Bu çalışmada, KEAP eyleyicinin serbest uç kısmının yer değiştirmesi farklı erişim kuralları kullanılarak kayan kipli denetim yöntemi ile denetlenmiştir. Bu çalışmanın bir diğer özgünlüğü ise denetimin görüntü tabanlı olarak mikro hassasiyette yapılmış olmasıdır. Elde edilen veriler ışığında KEAP eyleyicilerin mikro hassasiyetle konum denetiminin yapılabileceği gösterilmiştir. Bu sonuç KEAP eyleyicilerin özellikle mikro-enjeksiyonlama sistemlerinde kullanılabilirliğini göstermesi açısından önemlidir. Yazarlar halen bir KEAP eyleyici kullanarak hücre enjeksiyonlama sistemi tasarımı üzerine çalışmalarını sürdürmektedir.

7 Teşekkürler

Bu çalışma 114M781 nolu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir. Çalışmada kullanılan konjuge EAP eyleyicilerin temin edilmesindeki yardımlarından dolayı Wollongong Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Gürsel Alıcı'ya teşekkür ederiz.

8 Kaynaklar

- [1] Smela E. "Conjugated polymer actuators for biomedical applications". *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 15(6), 481-494, 2003.
- [2] Bar-Cohen Y. *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles reality, potential, and challenges*. Wash, USA, SPIE Press, 2004.
- [3] Bar-Cohen Y. *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies*. Boca Raton, USA, CRC Press, 2005.
- [4] Carpi F, Kornbluh R, Sommer-Larsen P, Alici G. "Electroactive polymer actuators as artificial muscles: are they ready for bioinspired applications?". *Bioinspiration & Biomimetics*, 6(4), 045006, 2011.
- [5] George PM, Lyckman AW, LaVan D, Hegde A, Leung Yi Avasare T, Testa C, Alexander PM, Langer R, Sur M. "Fabrication and Biocompatibility of Polypyrrole Implants Suitable for Neural Prosthetics". *Biomaterials*, 26(17), 3511-3519, 2005.
- [6] Lee KK, Munce NR, Shoa T, Charron LG, Wright GA, Madden JD, Yang VX. "Fabrication and characterization of laser-micromachined polypyrrole-based artificial muscle actuated catheters". *Sensors and Actuators A: Physical*, 153(2), 230-236, 2009.
- [7] McDaid AJ, Haemmerle E, Xie SQ, Aw KC. "Design, analysis, and control of a novel safe cell micromanipulation system with IPMC actuators". *Journal of Mechanical Design*, 135(6), 061003, 2013.

- [8] Berdichevsky Y, Lo YH. "Polymer microvalve based on anisotropic expansion of polypyrrole". *Cambridge University Materials Research Society*, 782, A4.4.1-7, 2003.
- [9] Low LM, Seetharaman S, He KQ, Madou MJ. "Microactuators toward microcalves for responsive controlled drug delivery". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 67(1-2), 149-160, 2000.
- [10] Druitt CM, Alici G. "Intelligent control of electroactive polymer actuators based on fuzzy and neurofuzzy methodologies". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(6), 1951-1962, 2014.
- [11] Fang Y, Tan X, Alici G. "Robust adaptive control of conjugated polymer actuators". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(4), 600-612, 2008.
- [12] İtik M. "Repetitive control of a trilayer conjugated polymer actuator". *Sensors and Actuators A: Physical*, 194, 149-159, 2013.
- [13] Alici G, Devaud V, Renaud P, Spinks G. "Conducting polymer microactuators operating in air". *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(2), 025017, 2009.
- [14] Carpi F, DeRossi D. "Electroactive polymer-based devices for e-textiles in biomedicine". *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 9(3), 295-318, 2005.
- [15] Madden JW. *Conducting Polymer Actuators*, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2000.
- [16] Hung JY, Gao W, Hung JC. "Variable structure control: a survey". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40(1), 2-22, 1993.
- [17] Slotine JJ, Li W. *Applied Nonlinear Control*, New Jersey, USA, Pearson, 1991.
- [18] Fernandez B, Hedrick JK. "Control of multivariable nonlinear systems by the sliding mode method". *International Journal of Control*, 46(3), 1019-1040, 1987.
- [19] Otsu N. "A threshold selection method from gray-level histograms". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 9(1), 62-66, 1979.