

Origami Tabanlı Robot Kontrolü için Mürekkep Püskürtmeli Yazıcı ile Basılı Algılayıcı Geliştirilmesi

Development of Inkjet-Printed Sensor for Origami-Based Robot Control

Merve Acer Kalafat, Dila Türkmen

Makina Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
acerm@itu.edu.tr, turkmend@itu.edu.tr

Özetçe

Robotların kullanım alanlarına göre efektif bir şekilde özelleştirilmesi ve ölçeklendirilmesi günümüzde önemli bir konudur. Origami-tabanlı mekanizma tasarımı ve iki boyutlu imalat yöntemleri ile robotların minyatürleştirilmesi sağlanabilmektedir. Ancak bu robotların kontrollerinde kullanılan algılayıcıların da yapıyı bozmayacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı geleneksel algılayıcılar kullanmak yerine mekanizma içerisine gömülebilir algılayıcılara ihtiyaç vardır. Bu çalışmada da tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş, origami-tabanlı, katlanabilir Pantograf ve Delta mekanizmaların pozisyon kontrolleri üzerine çalışılmıştır. Algılayıcılar gümüş mürekkep kullanılarak mürekkep püskürtmeli yazıcı ile basılmıştır. Böylece esnek ve mekanizma içerisinde bir katman olarak yerleştirilebilir algılayıcılar elde edilmiştir. Basılı algılayıcılar kullanılarak mekanizmaların pozisyon kontrolleri gerçekleştirilmiş ve mekanizmaların tahrikinde kullanılan motorların encoder ile performansları karşılaştırılmıştır.

Abstract

Today, scaling and customizing of robots according to their applications is an important issue. Miniaturization of robots can be achieved with origami-based mechanism design and two-dimensional manufacturing methods. However, the sensors used in the controls of these robots should be chosen in a way that does not disturb the structure. Therefore, instead of using conventional sensors, there is a need for sensors that can be embedded in the mechanism. In this study, position control of designed, origami-based, foldable Pantograph and Delta mechanisms were studied. The sensors were printed with an inkjet printer using silver ink. Thus, the sensors are flexible and can be embedded in the mechanism by placing a sensor layer. By using these printed sensors, the position controls of the mechanisms are achieved and the performances are compared with the encoders of the motors used for driving the mechanisms.

1. Giriş

Endüstride yaygın olarak kullanılan büyük ölçekli paralel mekanizmalı robotik sistemlerin minyatürleştirilip cm ve altı boyutlarında üretilmeleri ile mevcut avantajları çoğaltılabilir. Böylece yeni uygulama alanlarında kullanılmaları mümkün olabilir. Bunun için yeni nesil paralel robotları; mekanik yapı, eyleyici, algılayıcı ve kontrol algoritması elemanlarını

kapsayacak şekilde tasarlamak ve imal etmek gerekmektedir. Yeni nesil robotların üretiminde kullanılan metotlardan biri de origamiden ilham alınarak gerçekleştirilen tasarımlardır. Bu yöntem düşük maliyetlerle paralel robotların küçültülebilmesini, katlanarak kolay taşınabilmesini ve kullanıldıkları alana göre yeniden kolayca yapılandırılabilmesini sağlamaktadır.

Origami tabanlı tasarım metodunda iki boyutlu (2B) üretim teknikleri kullanılıp üç boyutlu (3B) yapılar oluşturulmakta ve özellikle küçük ölçekli sistemlerin yaratılmasına olanak sağlamaktadır. Bu yöntemdeki standart üretim yapısı, belirli görevleri yerine getirmek için ince profilli malzemelerin üst üste istiflenerek fonksiyonel kompozit yapılar oluşturmak üzerinedir. Bu teknikle karmaşık mekanizma yapıları küçültülebilmektedir. Literatürde bu teknikle üretilen mobil robotlar [1, 2], cerrahi robotlar [3, 4], haptik robotlar [5], al-ve-yerleştir robotlar [6-8] üzerine çalışmalar bulunmaktadır.

Origami tabanlı robotların hareket kontrollerinin sağlanabilmesi için pozisyon geri bildirim sağlamak üzere gömülebilir, ince profilli algılayıcılara (sensörlere) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu robotların hareketleri esnasında esnek katmanlarda meydana gelen birim uzamalar uzama ölçerler ile ölçülebilmektedir. Literatürde serigrafî ve mürekkep püskürtmeli (inkjet) baskı teknikleri ile robot içerisine gömülebilir, ince ve esnek algılayıcılar üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Firouzeh vd. [9], karbon mürekkebi ve serigrafî baskı tekniğini kullanarak piezorezistif algılayıcıları üretilen "Robogami" adlı bir origami robotuna entegrasyonunu sağlamıştır. Kwak vd. [10] ise yine serigrafî baskı yöntemini kullanarak, katlanabilir esnek bir bağlantının bükülme açısını tespit etmek için esnek alt tabakalar üzerinde iki zıt iletken alan oluşturacak şekilde iletken polimer mürekkep baskısı oluşturmuşlardır. Ancak serigrafînin malzeme israfı, kalıp gereksinimi, düşük desen çözünürlüğü ve yüksek minimum baskı kalınlığı gibi bazı dezavantajları vardır. Bu nedenle inkjet baskılı algılayıcılar, kalıp gerektirmemeleri, yüksek çözünürlük ve düşük profil sağlamaları, çok daha az malzeme israfına sahip olmaları ve özelleştirmelerinin daha kolay olması nedeniyle popüler hale gelmiştir [11, 12]. Sun vd. [13] bir masaüstü ticari yazıcı ile karbon mürekkebi kullanarak bir ucu sabit ve diğer ucu kaydırıcı ile lamine yapıya gömülerek mafsal büküldüğünde yuvasında serbestçe hareket ederek rezistans değişimi sağlamaktadır. Vadgama vd. [14], bir mürekkep püskürtmeli yazıcı ile PET alt-katmanlar üzerine

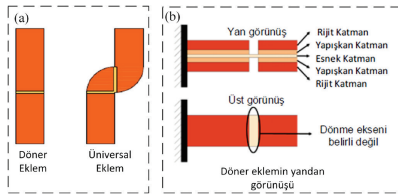
gümüş nanopartikül (Ag NP) mürekkebi basarak, farklı ölçeklerdeki prototipler için algılayıcılar üretmiştir.

Bu çalışmada, daha önce tasarımını gerçekleştirdiğimiz origami-tabanlı, katlanabilir Pantograf [15] ve Delta [8] mekanizmalarında gömülü rezistans tabanlı algılayıcılar kullanılarak pozisyon kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Algılayıcılar inkjet yazıcı kullanılarak PET üzerine Ag NP mürekkep baskısı ile üretilmiştir [16]. Pantograf mekanizmasında tek bir algılayıcı kullanılarak pozisyon kontrolü aç-kapa kontrol ve oransal kontrol ile sağlanmıştır. Delta mekanizması ise daha karmaşık bir yapı olup mekanizma içerisinde gömülü olan üç algılayıcı ve farklı kalibrasyon tekniklerini kullanarak aç-kapa pozisyon kontrolü gerçekleştirilmiştir.

2. Metodoloji

2.1. Origami Tabanlı Mekanizma Tasarımı ve Üretimi

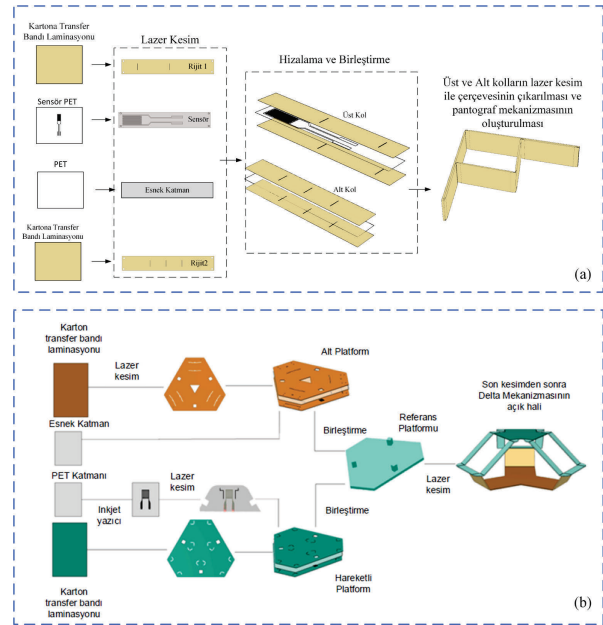
Paralel mekanizmalar, birden fazla zincire sahip olup farklı yapıdaki kolları birleştirebilmektedir. Bu durum, paralel mekanizmaları origami tabanlı tasarım ve 2B'li üretim yöntemlerine elverişli hale getirmektedir. Bu çalışmada da katmanlı üretim yöntemi ile üretimi gerçekleştirilebilen Pantograf ve Delta mekanizmaları ile çalışılmıştır. Bu mekanizmaları tasarlamak ve üretmek için, eklemlerin geleneksel paralel mekanizmalar için kullanılan gerçek eklemlerin yerini tutabilen katmanlı esnek eklem tasarımı yapmak gerekmektedir. Şekil 1a'da gösterilen 1 serbestlik dereceli (SD) döner eklem, oluşturulabilecek en yaygın ve basit eklemdir. İki katı katman arasında birbirinden bağımsız olarak tek eksende dönmelerini sağlayan basit bir kesime sahiptir. Pantograf mekanizması tamamen 1 SD döner mafsallardan oluşmaktadır. Delta mekanizmasında ise 1 SD döner eklemlerin yanı sıra Şekil 1a'da gösterilen 2 SD üniversal eklemler de kullanılmıştır. Bu eklemler genellikle aralarında farklı bir açı veya farklı bir düzlemlerle yerleştirilmiş iki 1 SD döner eklemin birleşiminden oluşmaktadır. Böylece eklemlerin birden fazla eksende bükülmesine izin verilir. Şekil 1b'de gösterildiği gibi eklemler, rijit tabaka, esnek tabaka ve tabakaların birleştirilmesi için yapışkan tabakalardan oluşmaktadır.



Şekil 1: (a) 1 SD Döner eklem ve 2 SD üniversal eklem, (b) 1SD'li döner eklemin katmanlı yapısı.

Origamiden esinlenilmiş minyatür paralel robotların üretimi, 2B'li katman-katman (layer-by-layer) üretim tekniği kullanılarak yapılmaktadır. Bu üretim yöntemi, birkaç tekrarlayan eylemden oluşur. İlk adım, tüm katmanları lazer kesim makinesi veya diğer uygun kesme yöntemleriyle kesmektir. Sonraki adımlar, yapıyı oluşturan katmanların üst üste hizalanması ve birleştirilmesinden oluşur. Gerekirse kesme, hizalama ve birleştirme adımları tekrar edilebilir. Şekil 2'de tasarlanmış Pantograf [15] ve Delta [8] mekanizmalarının

üretimi gösterilmektedir. Mekanizmaların üretilmiş halleri de Şekil 3'te gösterilmiştir. Her iki mekanizmada da toplam 11 katman vardır: alt (sabit) ve hareketli platformlar için 5'er katman ve bu platformları bir araya getirmek için de 1 adet yapışkan katman. Mekanizmaları üretmek için seçilen malzemeler, rijit tabakalar için karton (cardboard) ve esnek tabakalar için plastik tabakalardır. Kartonun adı, kağıt ağırlığı 400 gsm olan "American Bristol" dür. Karton kullanımının nedenleri kolay elde edilmesi, denenmesi ve maliyetinin düşük olmasıdır. Rijit katmanda aranan en önemli özellik, kuvvet altında bükülmeyecek kadar sert olması ve kendini tutabilmesidir. Karton bu özellikleri bu paralel mekanizmalarda sağlamaktadır. Her mekanizmanın esnek algılayıcı katmanı, inkjet baskı için özel bir kaplamaya sahip olduğundan aynı PET tabakasını (Novacentrix - Novelle Printing Media) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Pantograf mekanizması katlandığında 20x160 mm² alanı kaplamaktadır. Mekanizmanın efektif çalışma alanı 50x50 mm²'dir. Delta mekanizması katlandığında 175 mm çaplı bir dairenin içine sığabilmektedir. Mekanizmanın efektif çalışma hacmi 20x20x20 mm³'tür. Mekanizmaların detaylı tasarımları [8] ve [15] makalelerinde açıklanmıştır.

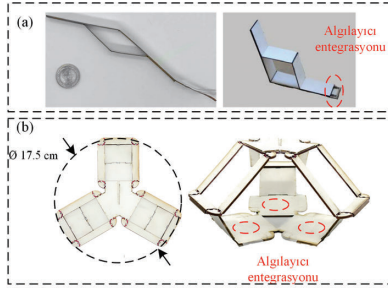


Şekil 2: Origami tabanlı Pantograf (a) ve Delta (b) mekanizmalarının 2B'li imalat yöntemleri ile üretim şeması.

2.2. Algılayıcı Tasarımı ve Üretimi

Mekanizmaların kontrolünün sağlanabilmesi için tahrik kollarının açılarının ölçülebilmesi gerekmektedir. Katmanlı üretim metodu ile üretilmiş mekanizmalardaki tahrik kollarını içeren kısımların esnek bağlantı elemanı algılayıcı elemanı olarak tasarlanmıştır. Bu esnek bağlantı elemanı serbest bir şekilde eğilme sağlayabildiği için hem iki kol arasında izafi hareket oluşmasını sağlamakta hem de iki kolu birbirine bağlamaktadır. Buna karşılık, esnek bağlantı elemanının eğilme noktasında alt ve üst yüzeylerde uzama ve kısalmalar, buna bağlı olarak da çekme ve basma gerilmeleri oluşmaktadır. Esnek bağlantı elemanı iki kola, parçalar arasında hareket etmeyecek şekilde konumlandırılırsa oluşan

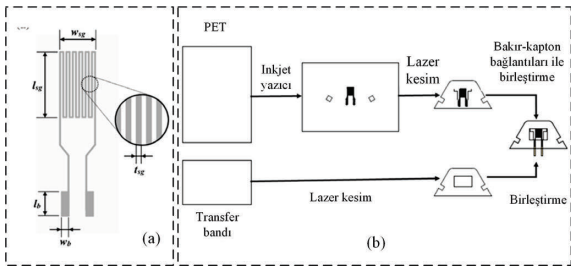
bu gerilmelerin iki kol arasındaki açığa bağlı olarak gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu gerilmelerden yararlanarak parçalar arasındaki açı belirlenebilmektedir. Bu da uzama ölçer (strain-gauge) algılayıcılar kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3: Üretilmiş Pantograf (a) ve Delta (b) mekanizmaları.

Uzama ölçer tasarımında en önemli faktörler şunlardır: bacak uzunluğu, l_{sg} , bacak kalınlığı, t_{sg} , bacak sayısı, n_{sg} , ve bacakların arasındaki mesafedir, d_{sg} (Şekil 4a). Üretilmek istenen mekanizmanın kalınlığına göre bacak sayısı ayarlanabilmektedir. Bacak uzunluğu ve sayısı genel olarak algılayıcıların durağan haldeki direnç değerlerini belirlemektedir. Bacaklar arasındaki mesafe ve bacak kalınlığı ise kullanılacak olan yazıcının baskı kalitesine bağlı olmaktadır. Yazıcının çözünürlüğünden daha düşük bir baskı yapılması mümkün olmamaktadır. Bacaklar arası mesafe, hareket boyunca bacak teması olmayacak şekilde, bacak kalınlığını ise basım sırasında bacaklar arası süreksizlik ve kopukluk olmayacak şekilde belirlenmiştir. Bu hususlar göz önüne alındığında, bacak kalınlığı, t_{sg} , ve bacaklar arası bırakılan aralığın, d_{sg} , 0.4 mm olmasına karar verilmiştir.

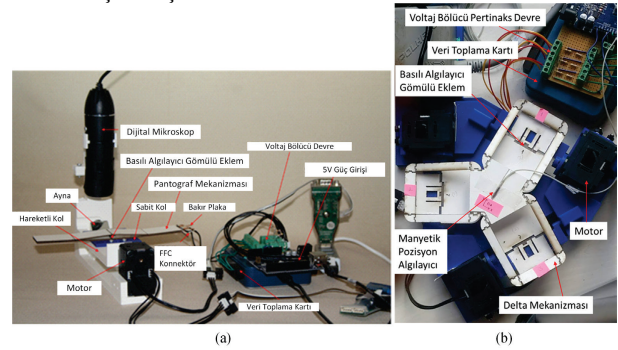
Delta mekanizması için algılayıcının üretim şeması Şekil 4b'de gösterilmiştir. Pantograf mekanizması için de benzer şekildedir. Algılayıcılar bir mürekkep püskürtmeli yazıcı (Epson L382) kullanılarak gümüş nano partikül mürekkebin (Novacentrix-metalon JS-B25P) tutması için ön işlem görmüş özel bir PET kağıda (Novacentrix-Novelle Printing Media) yazdırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Yazdırılan algılayıcılara kütleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çıkış elektrotlarından kablolama yapmak için bakır-kapton filmler ile bağlantı sağlanmıştır. Algılayıcının mekanizma içerisinde konumlandırılması hakkında daha detaylı açıklamalar [16]'da yapılmıştır. Üretilen algılayıcıların açı değişiminden kaynaklı oluşan şekil değişiminin ölçümünü yapmasını istendiğinden dolayı, algılayıcıların mekanizmadaki yerleşimi büyük önem arz etmektedir. [15] ve [16]'da yapılan çalışmalar sonucunda algılayıcılar eklemimin hemen altı kısmında, sabit kolların bulunduğu orta esnek katmanda konumlandırılmıştır.



Şekil 4: (a) Algılayıcının önemli geometrik parametreleri, (b) Algılayıcı üretim şeması.

2.3. Deneysel Düzenekleri

Mekanizmaların deneyleri her mekanizma için tasarlanan deney düzenekleri ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5a'da Pantograf mekanizması için tasarlanmış deney düzeneği sunulmuştur. Bu düzende mekanizmasının tahriki servo motorla (Dynamixel XL430-W250-t) gerçekleştirilmiştir. Algılayıcının görüldüğü esnek katmanı mekanizma çalıştığında yakından göstermek için dijital bir mikroskop yerleştirilmiştir. Algılayıcının çıkış sinyalleri için pertinaks üzerine voltaj bölücü devre kullanılarak veriler National Instruments'ın USB-6003 veri toplama kartı ile toplanmıştır. Şekil 5b'de gösterilen deney düzeneği Delta mekanizması için tasarlanmıştır. Mekanizma tahrikinde de 3 adet Dynamixel'in aynı servo motorları kullanılmıştır. Mekanizma hareketli platformunun ortasına manyetik mikroprob (Polhemus - Patriot) yerleştirilmiştir. Böylece mekanizmanın hareketli platformunun pozisyonu 6 SD olarak ölçülebilmektedir. Bu deney düzeneğinde 3 algılayıcının çıkışları pertinakslı devre ve daha sonra mekanizmaya özel olarak üretilmiş olan FFC kartı ile voltaj bölücü devre kullanılmıştır. Devreden alınan sinyaller yine National Instruments'ın USB-6003 veri toplama kartında işlenmiştir.

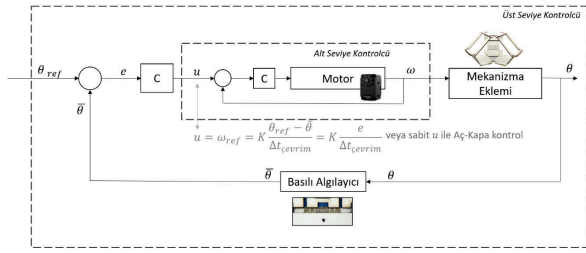


Şekil 5: Pantograf (a) ve Delta (b) mekanizmaları için geliştirilen deney düzenekleri.

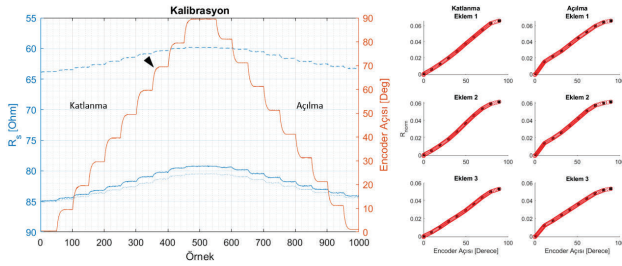
2.4. Kontrolcü Mimarisi ve Algılayıcı Kalibrasyonu

Servo motorlar ile basılı algılayıcıların entegre olarak kullanılabilmesi için, motorlar hız kontrol modunda kullanılarak, hız referans girişlerinin bir üst seviyede basılı algılayıcılardan alınan konum geri beslemesi ve konum kontrolü ile yapılmıştır. Bu kontrol mimarisini gösteren blok diyagramı Şekil 6'da verilmiştir. Eyleyiciye verilecek olan hız referansı 4 bitlik bir değere sahiptir. Basılı algılayıcılardan alınan Volt cinsinde voltaj sinyali önce voltaj bölücü devre denklemi kullanılarak algılayıcı direncine (Ohm) çevrilir. Daha sonra, açı tahmini için kalibrasyon fonksiyonunda kullanılmak üzere algılayıcı dirençleri, düz durumdaki algılayıcının direnç değerine göre normalize edilirler (dR/R_0). Kalibrasyon fonksiyonu belirlenirken farklı mekanizmalarda kullanılacak farklı algılayıcıların etkin karşılaştırılması esas alınmıştır. Farklı histerezis ve lineerlik davranışları gösteren algılayıcıların bu etkilerinin saf dışı bırakılarak yalnız geri besleme performanslarının karşılaştırılabilmesi için, 0-90 derece arası 10'ar derecelik 10 adımdan oluşan, katlanma ve açılma yönleri için ayrı ayrı toplanmış datalar kullanılarak kalibrasyon fonksiyonları oluşturulmuştur. Algılayıcı geri beslemesinin hesaplanmasında aşağıdaki adımlar izlenir.

- Kalibrasyon aşamasında, her 10° 'lik adımdan sonra t_s saniye kadar beklenir, ardından t_m saniye boyunca toplanan verilerin (Şekil 7, sol) R_s cinsinden ortalaması alınarak R_0 'a göre normalize edilir. Bu değer, ilgili açı değeri için katlanma ve açılma yönleri için ayrı ayrı olarak kaydedilir (Şekil 7, sağ).
- Kontrol aşamasında, gerçek zamanlı olarak algılayıcı verisi alınır ve normalize değerleri hesaplanır.
- Mevcut referans konum ve önceki adımdaki referans konum karşılaştırılarak, eklem katlama yönünde mi yoksa açılma yönünde mi hareket ettiği tespit edilir.
- Tespit edilen yöne göre ilgili yönün kalibrasyon verileri kullanılarak lineer interpolasyon ile hesaplanan normalize dirence karşılık gelen açı değeri hesaplanır.
- Hesaplanan açı referans açıdan çıkartılarak hata değeri kontrolciye beslenir.



Şekil 6: Kullanılan kontrolcü mimarisini blok diyagramı.



Şekil 7: Algılayıcılar için kalibrasyon fonksiyonlarının oluşturulması.

Algılayıcı performansının belirlenmesi için, basılı algılayıcıların performansını, esnek olmayan sert bileşen bir algılayıcı olan encoder performansını ile karşılaştırılması tercih edilmiştir. Şekil 6'da açıklanan kontrol yapısı, basılı algılayıcı sinyali yerine encoder verisi kullanılmak kaydı ile aynı hali ile uygulanmıştır. Böylece, ideal bir algılayıcı olarak ele alınan encoder algılayıcısına kıyasla basılı algılayıcı performansı elde edilmiştir. Basılı algılayıcı geri beslemeli takip performansları, tek katlı pozisyon kontrolü yerine çift katlı encoder geri beslemeli kontrol sonuçları ile karşılaştırılarak, kontrolcü yapısı kaynaklı hataların etkisi eleştirilmiştir.

Algılayıcı deneylerinde Şekil 7'de siyah ok ile gösterilmiş yumuşak frenlemeli statik kalibrasyon profilinde daha düşük histeresis gözlenmiş olması sebebi ile, kontrol uygulamalarında da bu profil tercih edilmiştir.

3. Deney Sonuçları

3.1. Pantograf Mekanizması Aç-Kapa Kontrol Sonuçları

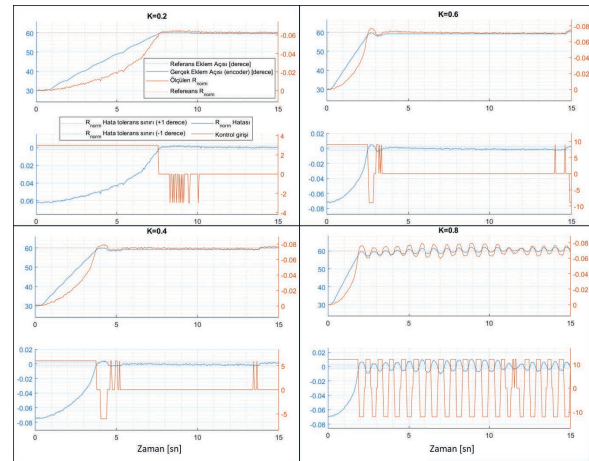
Pantograf mekanizmasının pozisyon kontrolü öncelikle aç-kapa kontrolü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan

kontrol girişi u (motor hızı); $e_{tolerans}$ hata toleransı $\pm 1^\circ$, dt çevrim süresi 0.05 sn olmak üzere (1)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$u = K \cdot \frac{e_{tolerans}}{dt} \quad (1)$$

Aç-kapa kontrol katsayısı K 'nın dört farklı değeri için (0.2, 0.4, 0.6, 0.8) aç-kapa kontrol performansları incelenmiştir (Şekil 8). En düşük kalıcı hata 0.3 derece ile $K=0.2$ için elde edilmiştir. Bu doğruluk değeri uç-eyleyici konumu cinsinden, denklem (2)'deki ifadesine göre (e_t görev uzayındaki hata, e_θ açısal hata (radyan), r_e uç eyleyicinin eklem eksenine uzaklığı (40 mm)) 0.2 mm olarak elde edilmiştir.

$$e_t = e_\theta \cdot r_e \quad (2)$$



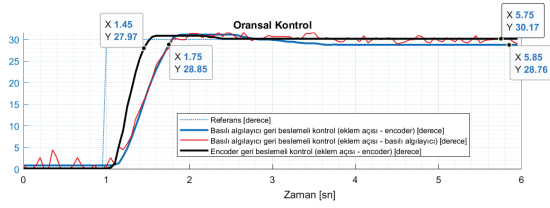
Şekil 8: Pantograf mekanizması ile farklı aç-kapa kontrol katsayıları için aç-kapa kontrol deney sonuçları.

3.2. Pantograf Mekanizması Oransal Kontrol Sonuçları

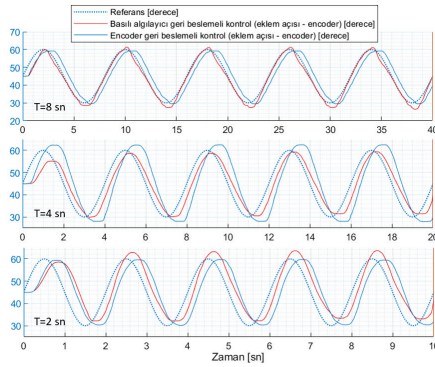
Pantograf mekanizmasında gerçekleştirilen oransal kontrol sonuçları Şekil 9'da sunulmuştur. Oransal kontrolcü katsayısının belirlenmesi için ise Ziegler-Nichols deneysel yöntemi kullanılarak kararlılık limiti belirlenmiştir [17]. Daha ince katsayı ayarı ise deneysel olarak belirlenmiştir ve 0.04 olarak seçilmiştir. Encoder ve basılı algılayıcı geri beslemeli kontrol performansları karşılaştırıldığında, kalıcı hataları arasında 1.5° fark olduğu görülmektedir. Zaman ekseninde ise, %5 oturma zamanının encoder geri beslemesi ile basılı algılayıcı geri beslemesi kıyasla 0.3 saniye daha kısa olduğu görülmüştür.

Yörünge takibi performansını ölçmek için pantograf mekanizması eklemlerinden bir tanesine üç farklı frekansta sinüs dalgası referansları verilmiştir (Şekil 10). Hem basılı algılayıcı hem de encoder geri beslemesi ile elde edilen takip performanslarında sinüs frekansı arttıkça cevaptaki gecikmenin de arttığı görülmüştür. Her üç giriş için de, basılı algılayıcı ile sağlanan hareketteki gecikme encoder geri beslemesine göre daha düşük değerdedir. Ancak bunun nedeni, basılı algılayıcıya bağlı açı tahmin hataları ile dalga cevabına bağlı gecikme hatasının birbirlerini kompanse edecek şekilde oluşmuş olmalarıdır. 8 saniye periyotlu dalga takibinde üçlü içerisindeki en yüksek takip performansı olan 1.9° root-mean-square (RMS) hata elde edilmiştir. En düşük performans ise en yüksek frekansa sahip olan giriş sinyali için 6.5° RMS

olarak hesaplanmıştır. Encoder ve basılı algılayıcı geri beslemeli kontrol performansları karşılaştırıldığında ise RMS hataları düşük frekanstan yüksek frekansa doğru sırasıyla 4.6°, 3.8° ve 4.4° olarak hesaplanmıştır. Her iki hata tipi için de üç dalga için ortalama hata 4.3° RMS'tir.



Şekil 9: Pantograf mekanizmasının oransal kontrol ile set noktası kontrol performansı.



Şekil 10: Pantograf mekanizmasının oransal kontrol ile yörünge takibi kontrol performansı.

3.3. Delta Mekanizması Kontrol Sonuçları

Delta mekanizmasına entegre edilmiş 3 algılayıcı kullanılarak pozisyon kontrolü için 3 farklı kalibrasyon senaryosu uygulayarak aç-kapa kontrolü ile gerçekleştirilmiştir.

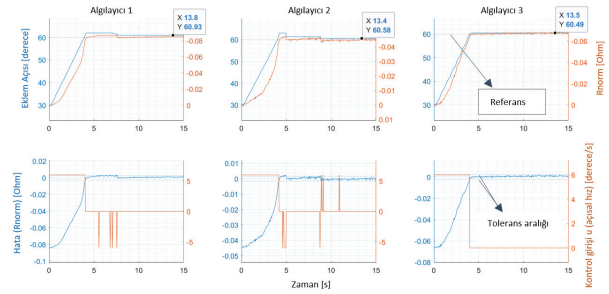
3.3.1. İki değerli kalibrasyon & eş referans yörünge

Bu senaryoda, algılayıcı kalibrasyonunda toplam iki pozisyon (30° ve 60°) kullanılmıştır. Algılayıcının 60°deki direnç değeri, 30°deki direnç değerine göre normalize edilmiştir. Kalibrasyon sonrasında, eklem yeniden 30° konumuna döndüğünde, yeni ham değeri kaydedilerek, kontrol esnasında alınan geri besleme sinyalinin normalize edilmesinde kullanılmıştır. Bu şekilde uygulanan kontrolün sonuçları Şekil 11'de gösterilmiştir. Birinci satır kontrol sonucunda eklem açısını ve bu sırada algılayıcının normalize direnç değerini göstermektedir. İkinci satır ise, bu esnada uygulanan kontrol girişini ve normalize algılayıcı direnci cinsinden hata sinyalini göstermektedir. Kontrolcünün chatter davranışı göstermemesi için, grafiklerde gösterildiği şekilde $\pm 1^\circ$ bir tolerans değeri belirlenmiştir. Hata değeri tolerans aralığının dışında olduğunda işaretine göre pozitif ya da negatif u , aralık içinde iken ise 0 değerinde u üretmiştir. Her 3 algılayıcı için kalıcı hata ortalaması 0.55° 'dir.

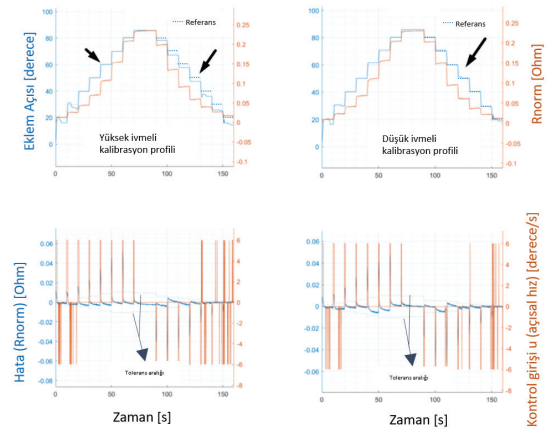
3.3.2. Tam skala kalibrasyon & eş referans yörünge:

İkinci senaryo olarak kalibrasyon ve referans yörüngeleri iki nokta arasında değil tüm hareket skalası boyunca seçilmiştir

(0°-90°). Bu senaryoda önceki senaryodan farklı olarak, hem katlanma hem açılma yönlerinde hareket gerekliliği mevcuttur. Katlanma yönü performansı kalibrasyon hız profillerine göre değişmezken, açılma yönünde hareketlerin kontrol performanslarının değişikliği gösterdiği görülmüştür. Şekil 12'de iki farklı kalibrasyon profili için elde edilen kontrol performansları gösterilmiştir. 20°-90°-20° profili 10'ar derecelik adımlar halinde verilmiştir. Hem kalibrasyon hem kontrol için aynı yörünge kullanılmıştır. Şekil 12'de sol sütunda verilen grafiklerin açılma yönünde kalıcı hatalar görülürken, sağ sütunda bu hatalar gözlenmemektedir. Katlanma ve açılma için ayrı iki kalibrasyon eğrisi kullanılmasına rağmen, açılma yönündeki kalıcı hataların ancak kalibrasyon profili düşük ivme değeri ile uygulandığında kaybolduğu görülmüştür. Düşük ivmeli kalibrasyon profili kullanıldığında, ortalama kalıcı hatanın yaklaşık 0° olduğu görülmektedir.



Şekil 11: Aç-kapa kontrol ile iki değerli kalibrasyon ve eş referans yörünge senaryosu sonuçları.

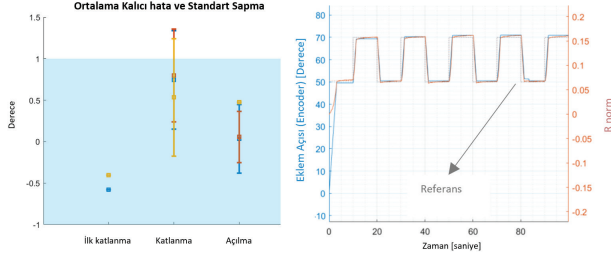


Şekil 12: Aç-kapa kontrol ile tam skala kalibrasyon ve eş referans yörünge senaryosu sonuçları.

3.3.3. Tam skala kalibrasyon & farklı referans yörünge:

Bu senaryoda kalibrasyon için tam skala kullanılırken referans yörünge için kalibrasyon profilinden farklı bir yörünge (5 defa 50°-70°) seçilmiştir. Kalibrasyon profili olarak Şekil 12'de verilmiş olan düşük ivmeli profil kullanılmıştır. Şekil 13'te sağ tarafta, Delta mekanizması bacaklarından birisi için uygulanan kontrol senaryosunun referans set noktasına ulaşma performansı görülmektedir. Sol tarafta ise, eş zamanlı olarak çalışan 3 bacak için alınan performansın ortalama kalıcı hata ve standart sapma değerleri görülmektedir. 3 eklem için eş

zamanlı kontrolünde, ortalama kalıcı hatanın ardışık 10 set noktası için 1° 'nin altında kaldığı görülmüştür. Ortalama hata 0.4° 'dir. Buna göre kontrolcünün eklem uzayında ortalama 0.3 mm hata değerlerinde çalışacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 13: Aç-kapa kontrol ile, tam skala kalibrasyon ve farklı referans yörünge senaryosu sonuçları.

4. Kapanış

Endüstride sıklıkla kullanılan paralel robotlar Origami-tabanlı tasarım metotları ile ucuz ve kolay bir şekilde minyatürleşmesi sağlanabilmektedir. Bu mekanizmaların pozisyon kontrollerinin sağlanabilmesi için mekanizmaların içine entegre edilebilen algılayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada da katman-katman üretim metotları ile üretilmiş katlanabilir Pantograf ve Delta mekanizmalarına algılayıcı esnek katman tasarımı yapılmış ve bu algılayıcılar kullanılarak pozisyon kontrollerine çalışılmıştır. Pantograf mekanizmasının deneylerinde aç-kapa kontrolcü kullanılarak eklem uzayında hata en düşük 0.3° hataya ulaşılmıştır. Mekanizmanın basamak giriş performansı oransal kontrolcü kullanılarak encoder ile karşılaştırılmış kalıcı hataları arasında 1.5° fark olduğu ve oturma zamanında 0.3 saniye daha kısa olduğu görülmüştür. Mekanizmanın yörünge takibi performansı Sinüs dalga girişi verilerek gerçekleştirilmiştir. Basılı algılayıcı ile sağlanan hareketteki gecikme encoder geri beslemesine göre daha düşük değerde olduğu gözlemlenmiş ve en iyi performans 8 sn periyotlu Sinüs girişi için 1.9° RMS elde edilmiştir. Delta mekanizmasında ise üç algılayıcı aynı anda kullanılıp farklı kalibrasyon ve referans senaryoları ile mekanizmanın kontrolü sağlanmıştır. Tam skala kalibrasyon ve farklı referans girişi kullanılarak ortalama hata 0.4° olarak elde edilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda Delta mekanizmasında farklı kontrolcüler denenecek ve basılı algılayıcı kullanılarak mekanizmaların pozisyon kontrolleri iyileştirilecektir.

Teşekkür

Bu çalışma 216M193 no'lu TÜBİTAK 1003 Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı ile desteklenmiştir.

Kaynakça

[1] A. T. Baisch vd., “High speed locomotion for a quadrupedal microrobot”, *The International Journal of Robotics Research*, Cilt:33, No: 8, s: 1-20, 2014.
 [2] R. J. Wood vd., 2012. “Progress on ‘pico’ air vehicles”, *The International Journal of Robotics Research*, Cilt: 31, No: 11, s: 1292-1302, 2012.

[3] S. Russo vd., “Soft pop-up mechanisms for micro surgical tools: design and characterization of compliant millimeter-scale articulates structures”, *IEEE Intl. Conf. On Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, s: 750-757, 2016.
 [4] M. Salerno vd., “A Novel 4-DOFs Origami Enabled, SMA Actuated, Robotic End-effector for Minimally Invasive Surgery”, *IEEE Intl. Conf. On Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong; China, s: 2844-2849, 2014.
 [5] S. Mintchev vd., “A portable three-degrees-of-freedom force feedback origami robot for human–robot interactions”, *Nature Machine Intelligence*, Cilt:1, s: 584–593, 2019.
 [6] H. McClintock vd., “The MilliDelta: A High-Bandwidth, High-Precision, Millimeter-Scale Delta Robot,” *Science Robotics*, Cilt: 3, No: 14, 2018.
 [7] M. Salerno, A. Firouzeh, J. Paik, “A low profile electromagnetic actuator design and model for an origami parallel platform,” *ASME. J. Mechanisms Robotics*, Cilt: 9, No:4, s:1–11, 2017.
 [8] M. A. Kalafat, H. Sevinç, S. Samanhan, A. Altınkaynak, F. Z. Temel, “A Novel Origami-Inspired Delta Mechanism With Flat Parallelogram Joints.” *ASME. J. Mechanisms Robotics*, Cilt:13, No:2,s:021005-021016, 2021.
 [9] A. Firouzeh, A.F. Amon-Junior, J. Paik, “Soft piezoresistive sensor model and characterization with varying design parameters”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Cilt: 233, s:158–168, 2015.
 [10] B. Kwak, J. Bae, “Compliant mechanosensory composite (CMC): a compliant mechanism with an embedded sensing ability based on electric contact resistance.” *Smart Materials and Structures*, Cilt: 27, s:125003, 2018.
 [11] D. Maddipatla, B.B. Narakathu, M. Atashbar, “Recent Progress in Manufacturing Techniques of Printed and Flexible Sensors: A Review”. *Biosensors*, Cilt: 10, 2020.
 [12] B. Ando, S. Baglio, “All-inkjet printed strain sensors” *IEEE Sensors Journal*, Cilt: 13, s: 4874–4879, 2013.
 [13] X. Sun, S.M. Felton, R.J. Wood, S. Kim, “Printing angle sensors for foldable robots” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, Germany, s: 1725-1731, 2015
 [14] N. Vadgama, J. Steimle, “Flexy: Shape-customizable, single-layer, inkjet printable patterns for 1d and 2d flex sensing” 11th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, Yokohama, Japan s: 153-162, 2017.
 [15] H. Sevinç, S. Samankan, A. Altınkaynak, Z. Temel, M. Acer, “Origami Tabanlı Paralel Robotların Geliştirilmesi ve Sensör Entegrasyonu”, *Türkiye Robotbilim Konferansı (ToRK 2019)*, İstanbul, 2019.
 [16] M. A. Kalafat, “Development and Integration of Inkjet-Printed Strain Sensors for Angle Measurement of an Origami-Based Delta Mechanism”, *Hittite Journal of Science and Engineering*, Cilt: 9, No: 4, s: 295-304, 2022.
 [17] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, 2010.