

# Aşırı Kısıtlı Bir Mekanizmanın Kalibrasyonunda Saklı Robot Kavramının Uygulanması

Gökhan Kiper, M. İ. Can Dede, Emre Uzunoglu  
Makina Mühendisliği Bölümü  
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
İzmir, Türkiye  
Email: gokhankiper,candede,emreuzunoglu@iyte.edu.tr

Ercan Mastar, Tayfun Sığirtmac  
Ar-Ge Bölümü  
Coşkunöz Metal Form Endüstri ve Ticaret A.Ş.  
Bursa, Türkiye  
Email: emastar,tsigirtmac@coskunoz.com.tr

**Abstract**—Aşırı kısıtlı mekanizmaların sağladığı direngelik, hafif yapı gerektiren ve bunun yanında yüksek seviyede kuvvetlere maruz kalınan uygulamalarda yüksek hassasiyet değerlerine ulaşmak için tercih edilebilmektedir. Yapılan çalışmada yüksek ivme değerlerine ( $>5g$ ) çıkabilecek şekilde kollarında paralelkenar devreler ile desteklendiği için aşırı kısıtlı olan, 2 serbestlik dereceli, düzlemsel bir 6-kol mekanizması tasarlanmış ve üretilmiştir. Geliştirilen sistemin hassasiyet ve tekrarlanabilirlik testleri öncesi kalibrasyonu yapılması için düz ve ters kinematik çözümlerinin parametrelerinin düzenlenmesi gerekmiştir. Mekanizmanın karmaşıklığı nedeni ile analitik ters kinematik çözümü mevcut değildir. Bu durumla başa çıkmak için saklı robot yöntemi adı ile literatürde yer bulan yöntem kullanılmıştır. Bu bildiride saklı robot yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon prosedürü anlatılmıştır.

**Index Terms**—Saklı robot, aşırı kısıtlı mekanizma, kalibrasyon, kinematik çözüm.

## I. GİRİŞ

Sanayi uygulamalarında yer alacak cihazların/makinaların hassasiyet ve tekrarlanabilirlik değerleri, yenilikçi üretim tekniklerinin ortaya çıkmasıyla önem kazanmıştır. Uygulamaların genelinde verilen işin en kısa sürede ve en hassas şekilde tekrarlanabilir olarak yapılması beklenmektedir. İş süresinin özellikle lazer kesim teknolojisinde kısalması durkalk tipi hareketlerin yüksek ivme ile yapılabilmesine bağlıdır.

Bu bildiride uç noktası yüksek ivme değerlerine ( $>5g$ ) yüksek hassasiyette ( $\pm 30 \mu m$  konumlama hassasiyeti ve  $\pm 15 \mu m$  tekrarlanabilirlik hassasiyeti) çıkabilmesi için tasarlanan ve üretilen düzlemsel paralel mekanizma ele alınmıştır. Mekanizma tipi paralel olarak seçilerek yüksek hassasiyet ve yüksek yük taşıma kapasitesine yüksek ivme değerleri ile ulaşmak hedeflenmiştir. Mobil platformun yönelim sabitlenmesi ve simetri gözetimi sonucunda mekanizma aşırı kısıtlı düzlemsel altı-çubuk mekanizmasına evrilmiştir. Elde edilen mekanizmanın analitik olarak kinematik çözümünün olmaması nedeniyle üretim hatalarından kaynaklanan uzuv boyu değişimleri için kalibrasyon çalışmaları geleneksel yöntemler ile yapılamamıştır. Kalibrasyon işlemini gerçekleştirmek için yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

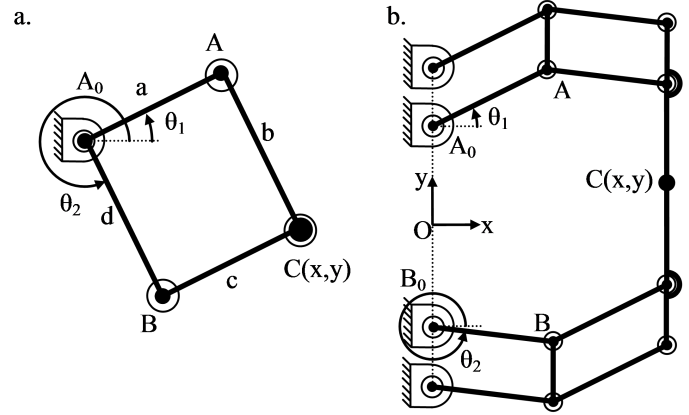


Fig. 1. a. Beş-çubuk mekanizması, b. Altı-çubuk mekanizması

## II. MEKANİZMANIN TARİFİ

Mekanizma esasen bütün eklemleri dönel iki serbestlik dereceli düzlemsel beş-çubuk mekanizmasıdır (Şekil 1.a). Mekanizma sabit mafsallarından eyletilmektedir. Sabit mafsalların eksenleri ise birbirine çakışık olarak seçilmiştir. Daha sonra uç noktasının yönelimini sabit tutmak adına mekanizma evrilmiş ve mobil platformun uzunluğu sabit platformun uzunluğu ile eşit tutularak altı-çubuk mekanizması şeklinde tasarlanmıştır, ancak bu durumda serbestlik derecesi üçe çıkmaktadır. Mekanizmanın bir koluna eklenen paralelkenar devreler sayesinde serbestlik derecesi ikiye indirilirken mobil platformun yönelimi de sabit tutulmuştur. Mekanizmanın denetim kolaylığı ve simetrisi gözetilerek ikinci kola da paralelkenar devreler eklenmek suretiyle aşırı-kısıtlı bir mekanizma elde edilmiştir (Şekil 1.b). Dönel eyleyiciler Şekil 1.b.'de  $A_0$  ve  $B_0$  mafsallarına konumlandırılmıştır.

## III. SAKLI ROBOT KİNEMATİĞİ

Yüksek hız ve hassasiyet gerektiren işlerde kullanılan robotların denetiminde kullanılmak üzere yakın zamanda saklı robot kavramı geliştirilmiştir [1], [2]. Saklı robot kavramı, bir gerçek robotun kinematikinden daha basit ya da çözülebilir bir kinematik yapıya sahip sanal bir robot yapısının gerçek robotun denetim algoritması içerisinde çalıştırılmasıdır. Bu kavram, uç

elemanı gözlemlenemeyen bir robotun denetimi için geliştirilmiştir [1], [2]. Saklı robot kavramı ilk kez bu çalışmada denetimi yapılan robotun aşırı kısıtlı bir mekanizmaya sahip olması nedeni ile kullanılmaktadır.

Aşırı kısıtlı mekanizmanın analitik düz ve ters kinematik çözümü olmadığı için mekanizmanın hareketlerini taklit edebilen bir basitleştirilmiş (saklı) model üzerinde çalışılmıştır. Mekanizmanın özel şartları olan uzuv boyutlarının birbirine eşit olması, sabit ve mobil platform uzunluklarının birbirine eşit olması ve tek koldaki paralelkenar sayesinde mobil platformun yöneliminin sabit tutulması sonucunda çalışmanın başında bahsi geçen ve Şekil 1.a'da gösterilen sabit eksenleri çakışık beş-çubuk mekanizması, aşırı kısıtlı mekanizmanın hareketini temsil edebilmektedir. Bu temsil edebilme yetisi ile eksenleri çakışık beş-çubuk mekanizması geliştirilen aşırı kısıtlı mekanizmanın saklı robotu olarak kullanılabilirliği.

Saklı robot olarak kullanılan beş-çubuk mekanizmasının uzuv boyutları  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ve  $d$ 'dir (Şekil 1.a). Gerçek mekanizmayı en iyi temsil eden saklı robot uzuv boyutlarını tespit etmek için şu adımlar izlenmiştir:

1. Gerçek mekanizmanın uç noktası (C), dikdörtgenel çalışma alanının köşeleri, kenarların orta noktaları ve dikdörtgenin orta noktası olmak üzere toplam dokuz noktada konumlandırılmış, bu konum değerleri  $(x_i, y_i)$  ile birlikte motor açısı değerleri  $(\theta_{1i}, \theta_{2i})$  not edilmiştir.

2. Saklı robotun motor açısı değerleri  $(\theta_{1i}, \theta_{2i})$  verildiğinde uç noktası  $(x_i, y_i)$  noktalarına en yakında olacak şekilde yörünge sentezi gerçekleştirilmiştir. Sentez yöntemi olarak seçilen  $(x_i, y_i)$  noktalarından tam olarak geçecek şekilde polinom yaklaşımı ve de hataların karalarının toplamını minimize eden en küçük karalar yaklaşımı kullanılmıştır.

3. Dokuz noktanın tamamının yörünge sentezi için kullanılması durumunda en iyi sonuç elde edileceği garanti değildir. Bu nedenle farklı nokta seçimleri denenerek en iyi sonucu veren kombinasyon tespit edilmiştir.

Kinematik sentez çalışmaları sonucunda polinom yaklaşımının daha sağlıklı sonuçlar verdiği görülmüştür.

#### IV. KALİBRASYON ÇALIŞMALARI

Yapılan CMM (koordinat ölçme makinası) ölçümlerinde üretilen mekanizmanın uzuv boyutlarının birbirlerinden epey farklı olduğu tespit edilmiştir. Bunun temel sebepleri üretim hataları, mafsalsız boşlukları ve alüminyumdan üretilen uzuvların aşırı kısıtlı mekanizmada kullanılması sonucu oluşan gerilimler yüzünden esnemeleridir. Bu durumda basitleştirilmiş mekanizmanın kinematığı ile yapılan kalibrasyon çalışmalarında 1,5 mm'ye varan konumlama hataları tespit edilmiştir. Kalibrasyon çalışmaları, ters kinematik ile çözülen eklem konumlarının üretilen mekanizmaya istek olarak verilmesini ve uç noktasından lazer interferometre ile konum ölçümlerinin alınmasını içermektedir. İlk çalışmalarda  $\pm 20 \mu\text{m}$  hassasiyete sahip üç boyutta ölçüm yapabilen FARO ION (IFM) lazer interferometre cihazı kullanılmıştır. Çalışmada ikinci adım olarak çalışma alanında alınan ölçümlere göre saklı robotun uzuv boyları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bunun için yapılan yörünge sentezi çalışması sonucunda elde edilen uzuv

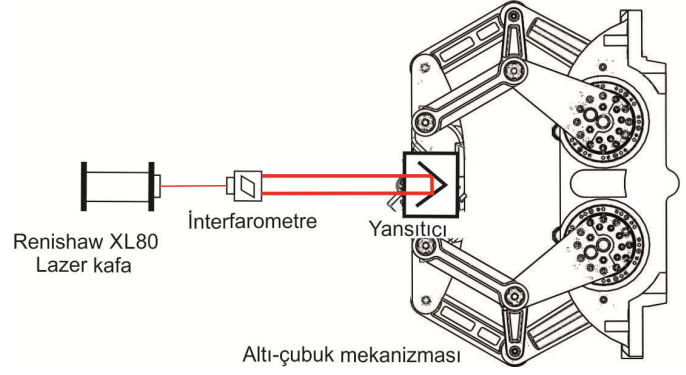


Fig. 2. İnterferometre ile mekanizma uç noktası hassasiyetinin ölçümü

boyları ile yapılan çalışmada ise hassasiyetin en kötü olduğu konumda hassasiyet  $700 \mu\text{m}$  seviyesine düşürülebilmiştir.

Bir sonraki adım olarak mekanizmanın çalışma alanında 5 mm'lik aralıklarla ölçümler alınıp hata matrisi tablosu oluşturulmuştur. Hataların giderilmesi için hatalar çalışma uzayından eklem uzayına saklı robotun ters kinematığı kullanılarak aktarılmıştır. Doğrusal kestirim kullanılarak ara değerlerin de hesaplanabileceği şekilde bir algoritma oluşturularak hassasiyet ölçümleri tekrarlanmıştır. Bu adımda ölçümler,  $\pm 0.5$  ppm ölçüm hassasiyetine sahip, lineer ölçüm yapabilen RENISHAW XL 80 cihazı ile yapılmıştır. Şekil 2'de gösterildiği şekilde lazer interferometre ile altı-çubuk mekanizmasının uç noktasına takılan yansıtıcı üzerinden ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda hassasiyet  $\pm 37 \mu\text{m}$  ve tekrarlanabilirlik  $\pm 26 \mu\text{m}$  olarak bulunmuştur.

#### V. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Çalışmada aşırı kısıtlı bir mekanizmanın kalibrasyon çalışması ele alınmıştır. Boyutsal hatalardan kaynaklanan hassasiyet sorununun giderilmesi için işlemci yükünü en aza indirecek şekilde nümerik çözümden uzak bir kalibrasyon yöntemi üzerinde çalışılmıştır. Mekanizmanın düz ve ters kinematik çözümlerinin analitik olarak bulunamaması sonucunda üretim sonrası ortaya çıkan uzuv boyutları hatalarından kaynaklanan hassasiyet kayıplarının giderilmesi için saklı robot kavramı kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda hassasiyet değerleri kalibrasyon işleminin başlangıcına göre yaklaşık 1/30 oranında iyileştirilmiştir.

#### TESEKKÜR

Çalışma 01668.STZ.2012-2 numaralı SanTez projesi ve 113E147 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında yapılmıştır.

#### KAYNAKÇA

- [1] S. Briot and P. Martinet, "Minimal representation for the control of Gough-Stewart platforms via leg observation considering a hidden robot model," in Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013), Karlsruhe, Germany, May, 6-10 2013.
- [2] V. Rosenzveig, S. Briot, P. Martinet, E. Ozgur, E., and N. Bouton, "A method for simplifying the analysis of leg-based visual servoing of parallel robots," In: Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014), Hong Kong, China, 2014.