

## Yüksek Hassasiyetli Montaj İşlemleri İçin Minyatür Delta Robot Tasarımı, En İyilemesi ve Denetimi

*Emrah D. Kunt<sup>1</sup>, Islam S. M. Khalil<sup>2</sup>, Ahmet T. Naskali<sup>3</sup>, Kaan C. Fidan<sup>4</sup>, Asif Sabanovic<sup>5</sup>*

<sup>1,2,3,4,5</sup>Mekatronik Mühendisliği  
Sabancı Üniversitesi, İstanbul

{edkunt, kahalil, teoman, kaanCFidan, asif}@sabanciuniv.edu

### Özetçe

Bu makalede yüksek hassasiyetli montaj uygulamaları için minyatür delta robot tasarımı, en iyilemesi ve denetimi sunulmaktadır. Bu delta robot modüler bir mikro fabrika kavramının bir parçası olup esas olarak hızlı ve hassas al-bırak işlemlerini gerçekleştirecek bir manipülatör olarak kullanılacaktır. Robotun önceden belirlenmiş 40 mm<sup>3</sup> kübik şekilli bir çalışma uzayı için gerekli olan kinematik parametrelerin elde edilmesi için kinematik analiz gerçekleştirilmiştir. En iyileme sürecinden elde edilen parametreler kullanılarak tasarım süreci gerçekleştirilmiş ve robot üretilmiştir. Tasarlanan gerekli elektronik aksam ile ve denetim algoritmasıyla tasarım testleri gerçekleştirilmiş ve ümit verici sonuçlar elde edilmiştir. Tasarımın iyileştirilmesine yönelik yapılacak çalışmalar belirtilmiş ve yeni bir tasarım üzerinde çalışılmaya başlanmıştır.

### 1. Giriş

Üretim sistemlerinin minyatürleştirilmesi kavramı, sistemlerin bütün olarak ve geleneksel makro ölçütteki sistemlerde kullanılan bileşenlerin minyatürleştirilmesi ya da yeni teknolojilerle yer değiştirmesi gereksinimi doğurmaktadır. Fakat minyatürleştirme süreci birçok sorun ihtiva etmektedir nitekim sürecin her safhasında yüksek doğruluk seviyelerine ulaşabilmek için yüksek hassasiyet gerekmektedir. Cihazlarda gereken hassasiyet ve doğruluk seviyelerine ulaşma gereksinimi mekanik ve üretim toleranslarının büyük önem kazanmasına yol açmaktadır. Bu nedenle bütün tasarım ve üretim süreci dikkatlice değerlendirilmeli ve gerçekleştirilmelidir.

Küçük çapta bir mekanizmayı oluşturmak için gerekli olan bütün bileşenler henüz hazır olarak pazarda bulunmamaktadır. Bu nedenle bu bileşenlerin yerine geçecek özel yapımlar çözümler gerçekleştirilmelidir ki bu da minyatür cihazların tasarımında önemli bir sorun olarak yer almaktadır.

Küçük boyutlar, üretim düzenlenmesinde ölçeklendirilebilirlik ve esneklik sağlayan modüler sistem tasarımını mümkün kılmaktadır. Küçük yapı ölçüleri, boyut uyarlama cihazların işlem esnasındaki termal genişlemenin yol açtığı sistematik hatalara karşı daha gürbüz olmasını sağlamakta ve ölçeklendirme etkileri bu cihazların dinamiklerini daha iyi kılmaktadır.

Boyut uyarlama hassas robotların geliştirilmesine yönelik stratejiler mobil mikro robotlardan ürün odaklı montaj

hücrelerinde ve mikro fabrika kavramları dahilinde kullanılan minyatür hassas robotlara kadar çeşitlilik göstermektedir. Minyatür hassas robotlar mekanik olarak iyi bilinen kinematik yapılara sahip alışılmış robotların minyatür versiyonları olarak kabul edilebilir. Bu minyatür manipülatörler mikro fabrika kavramı içerisinde üretim hatlarında montaj süreçlerine uygulanması gereken boyut uyarlama üretim sistemlerinin bileşenleridir. Minyatürleştirme yönünde son zamanlardaki gelişmeler ve bu gelişmeler sonucunda piyasada artık erişilebilir olan sıfır boşluklu dişliler ve artımlı kodlayıcı (enkoder) entegre edilmiş yüksek dinamikli mikro motorlar gibi bileşenler sayesinde endüstriyel robotların minyatürleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu ölçeklendirilebilir minyatür yapılar indirgenmiş dinamik kütleleri sonucunda gelişmiş dinamik özelliklere ve süreç hızlarına imkan vermektedir. Buna ek olarak bu yapılar kanıtlanmış denetim teknolojilerinin kullanılmasına ve piezo eyleyiciler gibi alternatif eyleyici teknolojilerinin karmaşıklığından da kaçınılmasına olanak sağlamaktadır.

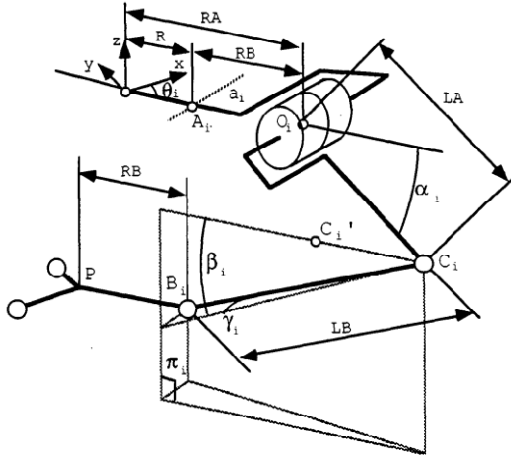
Geçtiğimiz yıllarda paralel robotlara karşı büyük bir ilgi oluşmuştur ve bunun nedeni paralel yapıların seri yapılara karşı yüksek bükülmezlik, yüksek doğruluk ve yüksek yük-ağırlık oranı gibi avantajlara sahip olmalarıdır. Son zamanlarda minyatürleştirme akımının artarak ilerlemesi yüksek hassasiyette ve doğrulukta manipülatörlere gereksinim duyulmasına yol açmıştır. Bu nedenle farklı hareket serbestliklerine sahip çeşitli paralel mekanizmalar gerçekleştirilmiştir. Paralel robotların en önemli dezavantajı kısıtlı çalışma uzaylarıdır. Fakat küçük boyutta parçaların hassas bir şekilde manipülasyonu söz konusu olduğunda bu önemli bir sorun olmaktan çıkmaktadır nitekim küçük boyutta bir çalışma uzayı bu tür uygulamalarda yeterli olmaktadır. Paralel robotların mikro montaj, mikro enjeksiyon gibi yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalardaki avantajları düşünüldüğünde, bu robotların minyatürleştirilmelerine ve bu uygulamalar için özel olarak tasarlanan sistemlere kolayca tümleştirilebilmesi için önemli bir çaba sarf edilmektedir. Stewart platformu [1], aslen bir uçuş benzetici olarak tasarlanmıştır. Daha sonraları bu yapı üzerinde çok geniş çaplı çalışmalar gerçekleştirilmiş ve günümüzde çok yaygın bir şekilde kullanılmakta ve de piyasada çok farklı boyutlarda bulunmaktadır. Yine yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere 4 hareket serbestlik derecesine sahip küçük ölçekli hibrit mikro scara robot [2] ve [3]'te sunulmuştur. Clavel tarafından 3 eksenli bütünüyle paralel meşhur Delta robotun sunulmasıyla kısıtlı çalışma

uzayı problemi biraz da olsa çözümlenmiştir [4]. N hareket serbestlik derecesine sahip bütünüyle paralel bir robot, uç takımının tabana n sayıda en fazla iki bağlantı kolu içeren ve prizmatik ya da dönel eyleyici tarafından tahrik edilen bağımsız bir zincirle bağlı olduğu kapalı döngü bir mekanizmadır [5]. CSEM tarafından geliştirilen Delta robotun minyatür versiyonunun montaj işlemleri gerçekleştirmek için bir mikro fabrika hücresi içine bütünleştirilmesi [6]'da açıklanmıştır. Yine 4 hareket serbestlik derecesine sahip Scara robot benzeri bir robot EPFL tarafından geliştirilmiş ve [7]'de sunulduğu üzere montaj ve taşıma işlemleri gerçekleştirmektedir.

Bu makalede, yüksek hassasiyetli montaj işlemleri için mikro fabrika kavramı dahilinde kullanılacak olan minyatür bir delta robotun tasarımı, en iyilemesi ve denetimi sunulmaktadır. Bölüm 2'de delta robot mekanizmasının kinematiki hakkında genel bilgi verilmekte ve kullanılan analitik ileri ve geri kinematik denklemleri için benzetim sonuçları sunulmaktadır. Bölüm 3'te tasarım en iyilemesinde kullanılan teknik ve belirlenen bir çalışma uzayı için delta robotun ölçüsel analizi anlatılmaktadır. Bölüm 4'te gerçekleştirilen deneyler ve sonuçları sunulmakta ve son bölümde sonuçlar ve gelecek çalışmalar belirtilmektedir.

## 2. Delta Robot

Delta robot, Şekil 1'de gösterildiği gibi, taban kısmına her biri taban ünitesine sabitlenmiş dönel motorlar tarafından tahriklenen birbirinin aynı 3 adet paralel kinematik zincirle bağlanmış hareketli uç kısımdan oluşmaktadır. Her bir zincir dönel bir motor tarafından tahriklenen bir üst kol ve her biri bağlantı kolları ve küresel eklemlerden oluşan paralelkenar şeklindeki alt koldan oluşmaktadır. Hareket, uç kısma tahriklenen üst kollar ile alt kollar üzerinden aktarılmaktadır. Alt kolların paralelkenar yapısı hareketli uç kısmın sabit taban kısmına paralel olarak hareket etmesini garantilemektedir.



Şekil 1: Kinematik Model [4]

Kinematik hesaplarda kullanılan önemli değişkenlerin açıklamaları Tablo 1'de verilmiştir.

İleri ve ters kinematikler için Clavel [4] tarafından önerilen analitik metod kullanılmış ve denklemleri test etmek amacıyla Matlab'da benzetimler gerçekleştirilmiştir. Hem ileri

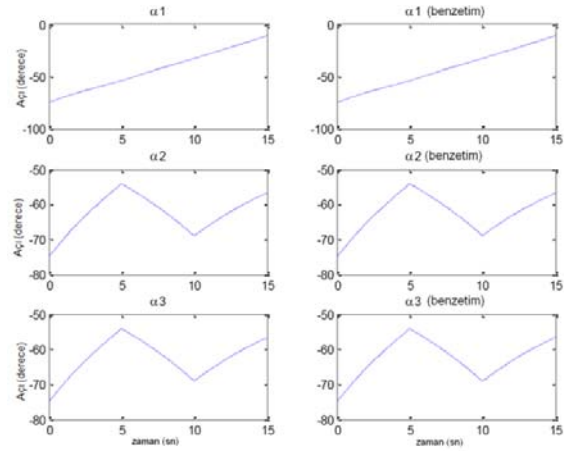
kinematik hem de ters kinematik benzetimleri tutarlı sonuçlar vermiştir.

Tablo 1 – Delta Robot Kinematik Değişkenleri

$R_A$	Taban merkezi ile eyleyici dönme eksenindeki mesafe.
$R_B$	“Beşik” (hareketli uç kısım) merkezi ile alt küresel eksenler dönme eksenindeki mesafe.
$L_A$	Üst bağlantı kolu uzunluğu (aktif bağlantı)
$L_B$	Alt bağlantı kolu uzunluğu (pasif bağlantı)
$\alpha_i$	Üst kol ile taban düzlemi arasındaki açı. (Tabanın yatay olduğu düşünülürse kabul görüldüğü üzere kol bu yatay düzlemin altında bulunduğu için $\alpha_i$ açısı negatiftir.)
$\beta_i$	Paralelkenar düzlemi ile taban düzlemi arasındaki açı
$\gamma_i$	Şekil 1'de gösterilen dikey düzlem ile paralelkenarın bir çubuğu arasındaki açı.
$\theta_i$	Seçilen taban x eksenine göre her bir kol grubunun açılma pozisyonu.

Matlab ortamında denklemlerin oluşturulmasından sonra sonuçlar 3 Boyutlu Cosmos ortamındaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu sayede, analiz sonuçları karşılaştırılarak sonuçların güvenilirliği doğrulanmıştır.

15 saniyelik bir sistem kordinat girdisi için, Cosmos Şekil 2'deki sonuçları vermektedir. Şekilde üst kolların referans düzlemi ile yaptığı açıların zamana göre değişimi gösterilmiştir. Cosmos verileri Matlab'da işlenirken aynı kordinat girdileri için Simulink ortamında da benzetim gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki şekiller elde edilmiştir. Sol sütun Cosmos sonuçlarını sağ sütun ise analitik çözüm sonuçlarını göstermektedir. Şekillerden de görüleceği üzere sonuçlar çok benzerdir ve aradaki hata  $10e-4$  civarlarındadır ki bu da denklemlerin güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 2 : Sonuçların Karşılaştırılması

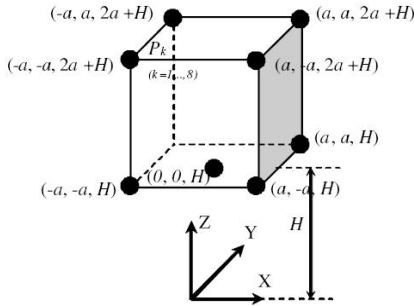
Delta robotun ana tasarım yapısı ileri ve ters kinematiklerinin benzetim ortamında gerçekleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Kinematığın 3 boyutlu ortamda test edilmesi sistem hareket davranışlarını gösterdiği için tasarım gereksinimlerinin de daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Bu noktada gerçekleştirilen kaba tasarımdan sonra önceden belirlenmiş bir çalışma uzayı

için en iyileme gerçekleştirilerek kol uzunlukları ve diğer önemli kinematik parametreler belirlenmiş ve sonraki bölümde açıklanmıştır.

### 3. En İyileme

Önceden tanımlanmış kübik 40 mm<sup>3</sup> çalışma uzayına sahip minyatür delta robot tasarımı için, kinematik tasarım değişkenlerini elde etmek amacıyla gerçekleştirilen en iyileme tekniği [8]'de açıklanmıştır. Belirlenmiş bir çalışma uzayı için delta robot boyutsal sentez metodu verilmiş ve tanımlanan amaç fonksiyonu bir noktanın üssü o noktanın çalışma uzayının sınır koşullarına göre konumunu yansıtmaktadır kavramına dayanmaktadır. Ve bu problemin çözümü için genetik algoritma tabanlı bir metod kullanılmıştır. Ön belirlemede kullanılan çalışma uzayı küp olarak seçilmiştir. En iyileme sonucunda elde edilen çalışma uzayında bazı köşeler çalışma uzayının sınırlarında kalabilmektedir.

Belirlenmiş bir çalışma uzayı için, kol uzunlukları ve tabanın uç kısma göre büyüklüğü delta robot için en önemli üç tasarım parametresini oluşturmaktadır. Burda "taban" robotun üç kolunun oluşturduğu uç kısmın (beşik) aksine sabit olan üçgen kısmı temsil etmektedir. Bu parametreler aslolarak delta robotun çalışma uzayını belirlemektedir. Robotun ölçütsel değişkenlerine ek olarak göz önünde bulundurulması gereken bir diğer parametre de belirlenmiş çalışma uzayı ve taban arasındaki uzaklık değeridir. Bu kapsamda en iyileme sürecinde belirlenmesi gereken 5 parametre bulunmaktadır. Bunlar  $L_A$ ,  $L_B$ ,  $r$  ( $R_A$ - $R_B$ ) ve  $H$  (Şekil 1 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.) değerleridir.



Şekil 3: Çalışma Uzayı Şeması [8]

Robotun çalışma uzayını aşağıdaki matematik model ile tanımlarsak;

$$h_j(X_p, Y_p, Z_p) = \left( \begin{array}{l} (X_p \cos \theta_j + Y_p \sin \theta_j - r)^2 \\ (X_p \sin \theta_j - Y_p \cos \theta_j)^2 + Z_p^2 + L_2^2 - L_1^2 \end{array} \right) - 4L_2^2((X_p \cos \theta_j + Y_p \sin \theta_j - r)^2 + Z_p^2) \leq 0 \quad (1)$$

Yukarıdaki denklem uzayda bir hacmi ifade etmektedir. Bu hacmin sınırları şu şekilde tanımlanmıştır;  $h_j(P) = h_j(X_p, Y_p, Z_p) = 0$  ( $j = 1, 2, 3$ ),  $P$ ;  $X_p, Y_p, Z_p$  kordinatlarına sahip bir noktayı temsil etmektedir. Neticede istenen çalışma uzayını oluşturan noktalar belirlenmeli ve seçilen her bir nokta yukarıdaki fonksiyona konularak minimize edilmelidir. Sonuç olarak üç yüzey tarafından sınırlanan bir hacim olarak oluşturulan amaç fonksiyonu şu şekildedir;

$$F(I, P_k) = \sum_{k=1}^{Npt} \sum_{j=1}^3 |h_j(I, P_k)| \quad (2)$$

$I = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  bilinmeyen parametre yöneyidir ve bizim durumumuzda  $I = (L_A; L_B; r (R_A-R_B); H)$  şeklindedir. Fakat taban ve çalışma uzayı arasındaki uzaklık olan  $H$  değeri için 60 mm değeri belirlenmiş ve parametre yöneyi de  $I = (L_A; L_B; R_A; R_B)$  şeklinde tanımlanmıştır. Bu en iyileme probleminin kısıtlamaları şu şekildedir ki; çalışma uzayını belirlemek üzere seçilmiş her  $P_k$  noktası delta robotun çalışma uzayında bulunmak zorundadır. Başka bir deyimle, önceden belirlenmiş çalışma uzayının her bir noktası robot tarafından erişilebilir olmalıdır. Bu kapsamda, noktanın çalışma uzayı içerisinde olup olmadığını kontrol eden bir ceza fonksiyonu (3) oluşturulmuş ve amaç fonksiyonu (4) denkleminde olduğu gibi yenilenmiştir.

$$F_{penalty} = \sum_{k=1}^{Npt} \sum_{j=1}^3 \phi_j(I, P_k) \quad (3)$$

$$F_{obj} = F + F_{penalty} \quad (4)$$

( $L_A, L_B, R_A, R_B$ ) parametreleri MATLAB Toolbox'ta genetik algoritma tabanlı en iyileme araçları kullanılarak en iyileme işlemi gerçekleştirilmiş ve yinelemeli bir süreçten sonra şu sonuçlar elde edilmiştir:

Tablo 2– En İyileme Sonuçları

$L_A$	40 mm
$L_B$	67.683 mm
$R_A$	40 mm
$R_B$	29.997 mm

En iyileme sürecinde kullanılan genetik algoritma parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

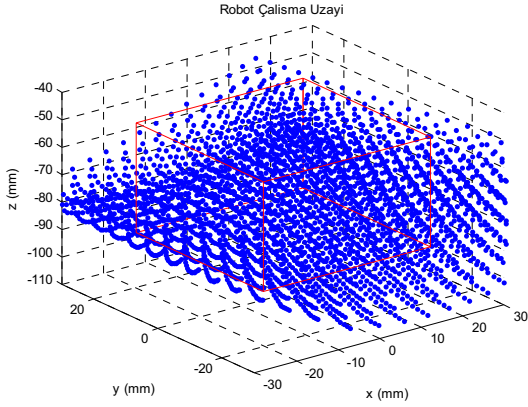
Tablo 3 – Genetik Algoritma Parametreleri

Değişken Sayısı	4
Popülasyon Birey Sayısı	100
Çaprazlama Fonksiyonu	Dağılık
Göç İstikameti	İleri
Nesil	150

En iyileme algoritması ile elde edilen tasarım parametreleri ile robotun erişilebilir çalışma uzayı test edilmiştir. Taban düzleminden 60 mm ( $H$ ) uzaklıkta olan kübik çalışma uzayının belirlenen kinematik parametreler ile kapsama analiz sonucu Şekil 4'te gösterilmiştir. Analiz her bir motorun 10-80° açı değerleri kısıtlaması da göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere 40 mm<sup>3</sup>lük kübik çalışma uzayı kapsanmakta ve tasarım gereksinimlerini karşılamaktadır.

### 4. Sistem Tasarımı

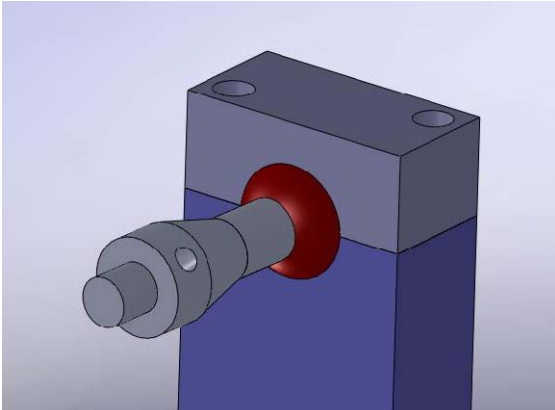
Delta robot tasarımı en iyileme sonuçlarından elde edilen tasarım parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Delta robot ve denetim sistemi Şekil 6'da gösterilmiştir. Robot öncelikle performans testlerinin yapılabilmesi için bir tutucu yapı içerisine yerleştirilmiştir. Al-bırak işlemlerinin gerçekleştirilip test edilebilmesi için robotun çalışma uzayı içerisine 3 mm çapındaki metal küreleri üzerinde tutan ızgara bir yapı yerleştirilmiştir. Kürelerin buldukları konumdan



Şekil 4 – Çalışma Uzayı Kapsam Kinematik Analizi

alınıp hedef noktaya götürülmesini sağlamak için de uç takımı olarak bir vakum uç, robota eklenmiştir.

Minyatür delta robot mekanik tasarımındaki en zor kısmı küresel eklemler oluşturmaktadır. Bu küresel eklemler paralelkenar yapı içerisinde yer alan ve sistemi xyz kartezyen düzlemine sınırlayan yapının önemli parçalarıdır. Tasarlanmakta olan minyatür delta robot için uygun boyutlarda bir küresel eklem piyasada hazır olarak bulunmamaktadır. Bu nedenle robota özel bir çözüm oluşturulması gerekmektedir. Hassasiyet gereksinimi göz önünde bulundurularak yüksek hassasiyetli yüzeylere sahip olan CMM ölçüm uçları bu noktada çözüm olarak kullanılmıştır. Eklem tasarımı ilk prototipte Şekil 5'te gösterildiği şekilde gerçekleştirilmiştir.

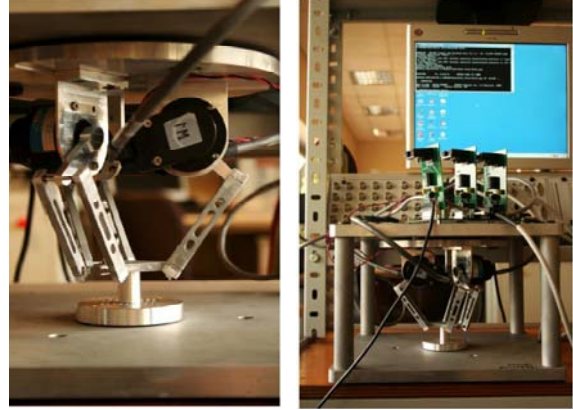


Şekil 5 : Küresel Eklem Tasarımı

Sistemde kullanılmak üzere seçilen eyleyiciler kısıtlı açılı tork motorları olup [-90 90] açıları arasında çalışmakta ve [-60 60] derece aralığında da kesintisiz tork sağlayabilmektedir. Bu motorların seçilme sebepleri doğrudan tahrikli (direct drive) motorlar olmaları ve yüksek hız ve tork değerleriyle delta robotların en önemli özelliklerini edinebilmelerini sağlamalarıdır. Delta robot performansının testi için hızlı bir prototipleme platformu olan dSPACE 1103 denetim için kullanılmış, motorlar için gerekli sürücüler özel olarak tasarlanmış ve dSPACE ile sürücüler arasında bağlantı kartları üretilmiştir (Şekil 6).

## 5. Deneyler ve Sonuçlar

Robotun konumlandırma performansını test etmek amacıyla sistem üzerinde çeşitli referanslar verilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu performans testlerinden bir tanesi de 10 mm yarıçapında bir çember referans takibidir ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Sistem performansını daha detaylı göstermek ve anlaşılır kılabilmek için sistem referansları ve cevapları motor açı değerleri ve konum değerleri grafikleri ile gösterilmiştir. Robot çalışırken Şekil 7'de gösterilmiştir.



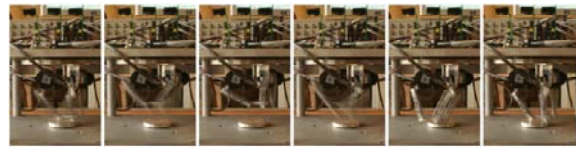
Şekil 6 : Delta Robot ve Denetim Sistemi

İlk testlerin gerçekleştirilmesi için öncelikle konum denetimi için PID denetim algoritması kullanılmış ve denetim parametreleri sistemin hızlı tepkimesi için ayarlanmıştır. Sunulan sonuçlar referans yörüngelerini ve de enkoder verilerinden ileri kinematik denklemleri kullanılarak elde edilmiş olan kordinat çıktılarını içermektedir. Hesaplamaların eklem uzayındaki verilerin kullanılarak gerçekleştirilmesi kordinat çıktıları açısından bir kestirim olmaktadır nitekim sistemde bulunan mekanik kusurlar ve toleranslar göz ardı edilmektedir.

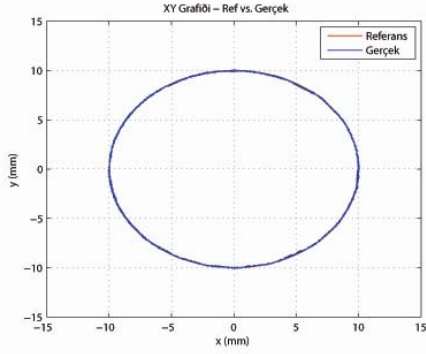
Sunulan grafiklerde gösterilenler benzetim sonuçları değil gerçek sistemden elde edilmiş deney sonuçlarıdır ve motor enkoderlerinden okunan değerlerden üretilmiştir. Hata, referans değerleri ile hesaplanan kordinat çıktıları arasındaki mesafeden (5) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$hata = \sqrt{(x_r - x_0)^2 + (y_r - y_0)^2 + (z_r - z_0)^2} \quad (5)$$

Robotun çembersel yörüngesi için verilen referanslar (x konumu için) ve ölçüm değerleri Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir. Hata değerlerinin daha iyi incelenebilmesi açısından grafiğin yakınlaştırılmış hali de sunulmuştur.

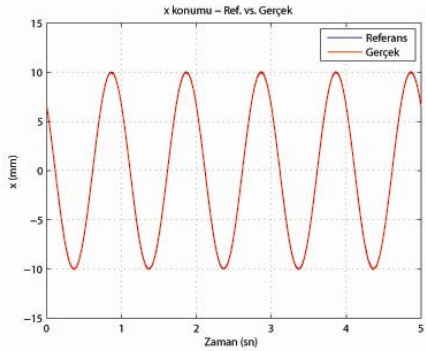


Şekil 7: Robot Çalışma Sekansı



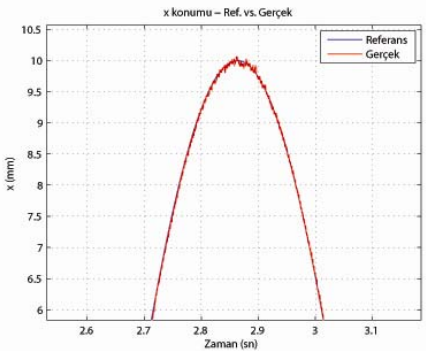
Şekil 8 : Çember Yörünge

X ve Y eksenleri için verilen 10 mm genliğinde 1 Hz frekansındaki aralarında  $\pi/2$  faz farkı bulunan sinüs dalga referansı ve gerçek x konum değerleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

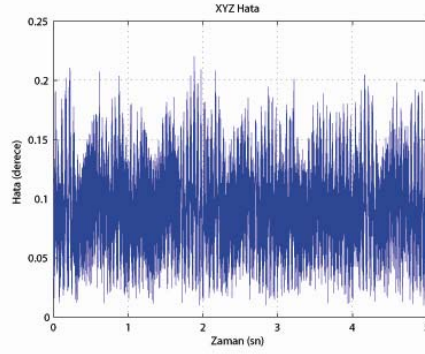


Şekil 9 – X Konum Referans ve Gerçek Konum Değerleri

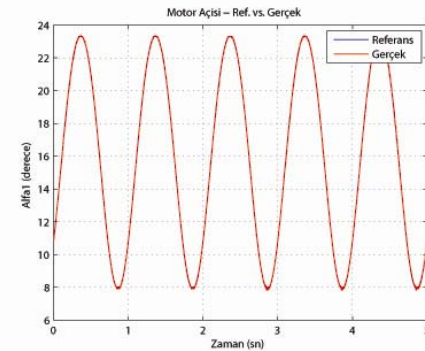
X konumu için performansın daha detaylı gösterildiği yaklaşılmış şekil aşağıda gösterilmiştir. (5) denklemine göre hesaplanan hata Şekil 11’te gösterilmiştir. Verilen kartezyen kordinat referanslarından geri kinematik denklemleri kullanılarak motor açısı değerleri oluşturulmuştur ve birinci motor için referans değeri ve gerçek motor konumu Şekil 12 ve Şekil 13’te gösterilmiştir. Detaylı grafikte her bir enkoder darbesi açık bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 10 – X Konumu Detaylı Görünüm



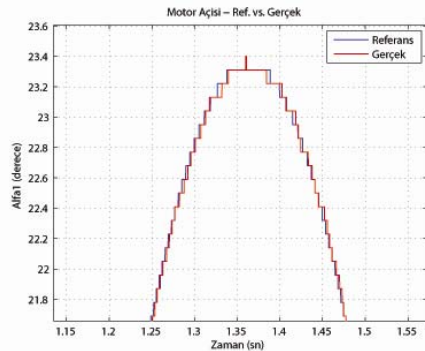
Şekil 11 – XYZ Konum Hata



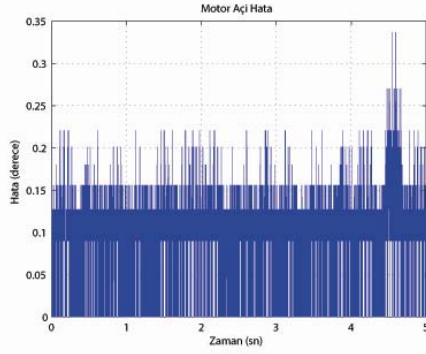
Şekil 12 – Motor Açısı Referansı (Alfa 1)

Sonuçlar motorların doğrudan tahrikli motorlar olmasından kaynaklanan enkoder çözünürlüğü kısıtlaması göz önünde bulundurulduğunda tatmin edicidir. Motor açıları ve xyz konumları için hata verileri Tablo 3’te verilmiştir.

Enkoder çözünürlüğü  $0.09^\circ/\text{sinyal}$  ve bu çözünürlük çalışma uzayının farklı noktalarında farklı hassasiyetlere tekabül etmektedir. Eklem uzayı değerleri ve referansları gözlemlendiğinde hassasiyet açısından elde edilebilecek en iyi sonuçlar elde edilmiştir nitekim enkoder değerleri referans değerlerini maksimum 3 enkoder hata salınımla takip etmektedir. Mean değerlere bakıldığında bu 1 enkoder hataya tekabül etmektedir. Fakat mekanik aksamda olabilecek kusurlar ve hatalar nedeniyle robot kalibrasyonu gerçekleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 13 – Motor Açısı Detaylı Görünüm



Şekil 14 – Motor Açık Hata

Tablo 4: Hata Verileri

	alfa	xyz
Min(hata)	0 derece	0.01 mm
Maks(hata)	0.3367 derece	0.22 mm
Mean(hata)	0.0959 derece	0.0919 mm
Std(hata)	0.0476 derece	0.0328 mm

Tasarım ve üretilen parçalar robotun çalışma performansını önemli derecede etkileyecek problemler içermektedir. Üretim hatalarından dolayı küresel eklemler düzgün bir şekilde monte edilememekte bu da hareket açısından büyük bir sorun oluşturmaktadır. Kullanılan doğrudan tahrikli motorlara uygun enkoderlerin çözünürlüklerinin herhangi bir dişli olmaması nedeniyle istenilen hassasiyetlerin elde edilmesine olanak vermemesi bir diğer eksiklik olarak performansa etkimektedir. Eklem tasarımı nedeniyle paralelkenar yapısının her bir kolunun kendi eksenini etrafında dönebilmeye serbestliği yüksek hızlarda performans sorunlarına yol açmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek için yeni bir tasarım gerçekleştirilmektedir. Al-bırak deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için 3 mm çaplı kürelerin yerleştirilebileceği ızgara yapılı tutucu üretilmiş ve robot çalışma uzayına yerleştirilmiştir. Al bırak deneyleri uç takımında bir vantuz kullanılarak ve bu küreler manipüle edilerek gerçekleştirilecektir. Bu testler gerçekleştirilecek bir kullanıcı ara birimi (GUI) aracılığıyla yapılacaktır. Bu GUI sayesinde kullanıcı isterse oluşturmak istediği şekli yapıcak veya tek tek her bir küre için başlangıç ve hedef noktası seçerek işlemleri gerçekleştirebilecektir. Elde edilen robot hassasiyeti bu deneyleri gerçekleştirebilmek için yeterlidir.

## 6. Sonuçlar

Bu makalede, mikro fabrika kavramı dahilinde yüksek hassasiyetli montaj işlemleri gerçekleştirmek üzere yapılmış minyatür bir delta robot sunulmuştur. Robotun tasarımı, en iyilemesi ve yapılan prototiple gerçekleştirilen deneyler detaylı olarak verilmiştir. En iyileme süreci belirlenmiş bir çalışma uzayı için kinematik değişkenlerin belirlenmesi açısından iyi sonuçlar vermiş ve tasarlanan delta robotun çalışma uzayını kapsadığı yapılan kinematik analizlerle kanıtlanmıştır.

Sonuçlar yüksek hassasiyet elde etme açısından ümit vericidir ve ilk prototiple gerçekleştirilen testler sonucunda tasarım hataları ve yapılması gereken iyileştirmeler belirlenmiş ve daha yüksek hassasiyet elde etmek için ikinci bir prototip

tasarım sürecine başlanmıştır. Sistemde gerçekleştirilen ve sunulan deneyler robot üzerindeki ilk denemeleri göstermektedir ve başka çeşitli deneyler de gerçekleştirilecektir.

Yaşanılan problemlerin üstesinden gelmek amacıyla yapılması gereken tasarım iyileştirmeleri belirlenmiş ve yeni bir delta robot tasarımı üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Ana hedef birtakım tasarım değişiklikleriyle mekanik hataları en az seviyeye indirmek ve yeni seçilen motor ve enkoder bileşkesiyle daha iyi hassasiyet elde edebilmektir.

Öte yandan, şu anki sistem üzerinde çeşitli denetim algoritmaları denemek için sistem üzerinde varolan kusurların üstesinden gelinmeye çalışılacaktır. Bu açıdan varolan sistem iyi bir test düzeneği niteliği taşımaktadır.

## 7. Teşekkür

1, 2 ve 3. yazarlar YJ bursu tarafından sağlanan destek için teşekkür eder. Bu çalışma 108M520 kodlu Tübitak projesi tarafından desteklenmektedir.

## 8. Kaynakça

- [1] D. Stewart, "A platform with six degrees of free-dom," *Proc. Institute of Mechanical Engr.*, vol.180, pp. 371-386, 1965.
- [2] A. Burisch, S. Soetebier, J. Wrege, Design of a parallel hybrid microscara robot for high precision assembly, Institute of Machine Tools and Production Technology (IWF), Technical University of Braunschweig, 2004.
- [3] Burisch, A., Wrege, J., Soetebier, S., Raatz, A., Hesselbach, J., Slatter, R. (2006), "Parvus a micro-parallel-SCARA robot for desktop assembly lines", *Proc. of IPAS 2006*, 19-21 February,
- [4] R. Clavel, "Une nouvelle structure de manipulateur parallèle pour la robotique légère," *APII 23*, pp. 501-519, 1989.
- [5] F. Pierrot, P. Dauchez, and A. Fournier. Hexa: a fast six-dof fully-parallel robot. In *ICAR International Conference on Advanced Robotics*, 1991.
- [6] Heikkilä, Riku H.; Karjalainen, Ilpo T.; Uusitalo, Jani J.; Vuola, Asser S.; Tuokko, Reijo O., "Possibilities of a Microfactory in the Assembly of Small Parts and Products - First Results of the M4-project," *Assembly and Manufacturing, 2007. ISAM '07. IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.166-171, 22-25 July 2007
- [7] Verettas, I., Clavel, R., Codourey, A., "PocketFactory: a modular and miniature assembly chain including a clean environment", *International Workshop on MicroFactories (IWFMF)*, Besançon, France, October 25-27, 2006
- [8] M.A. Laribi, L. Romdhane, S. Zeghloul, Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 42, Issue 7, July 2007, Pages 859-870