

Kendinden Merkezlemeli Robotik Tutucu Mekanizması

Hüseyin Hakkı Bulduk^{*1}, Ersin Toptaş²

¹Marmara University, Mechatronics Engineering Department, Türkiye, hakkibulduk@marun.edu.tr

²Marmara University, Mechatronics Engineering Department, Türkiye, etoptas@marmara.edu.tr

(Received: 08 March 2024, Accepted: 12 March 2024)

(4th International Conference on Innovative Academic Studies ICIAS 2024, March 12-13, 2024)

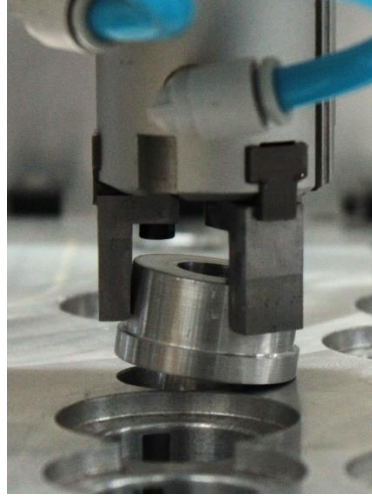
ATIF/REFERENCE: Bulduk, H. H. & Toptaş, E. (2024). Kendinden Merkezlemeli Robotik Tutucu Mekanizması. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8(2), 350-357.

Abstract – Endüstrideki çoklu ürün alma ve yerleştirme problemleri, ürünlerin konumlarının değişkenliği nedeniyle karmaşık hale gelmektedir. Bu sorunu çözmek için, ürün alma ve yerleştirme işlemlerinde kullanılan robot tutucularının adaptif olması gerekmektedir. Bu çalışmada, kendinden adapte olabilen bir robot tutucusunun tasarımı ve performansı incelenmiştir. Tasarlanan tutucu, ürünlerin konum değişikliklerini tolere edebilmektedir. Bilgisayar destekli mühendislik simülasyonlarıyla tasarım süreci detaylı bir şekilde ele alınmış sonrasında gerçek deney ortamında deneyleri tamamlanmıştır. Yapılan testler, tutucunun beklenen standartlara uygun olarak çalıştığını ve ürünlerin istenilen konumlardan doğru şekilde aldığı gözlemlenmiştir. Kendinden adaptif robot tutucusu tasarımının endüstrideki çoklu ürün alma ve yerleştirme problemlerine etkili bir çözüm sağlamaktadır. Bu tasarım, üretim süreçlerinin verimliliğini artırmak ve ürün kalitesini sağlamak için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Keywords – Ürün Al Ve Yerleştirir, Robotik Tutucu, Kartezyen Robot, Peg In Hole.

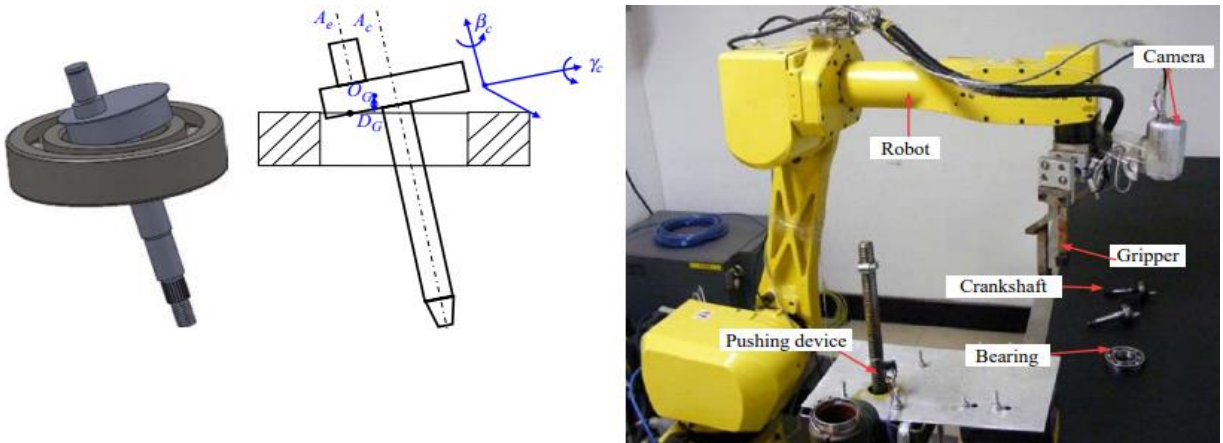
I. iGRİŞ

Endüstriyel üretimde ürün alma ve yerleştirme işlemleri, verimliliği ve üretim kalitesini sağlamak için kritiktir. Bu süreç, ürünlerin doğru konumlara alınmasını ve yerleştirilmesini gerektirir, bu da üretim kalitesini doğrudan etkiler. Çoklu ürün yerleştirme sistemleri, üretim hızını artırır ve maliyetleri düşürür. Bu sistemler, endüstriyel robotlarla desteklenir ve karmaşıklığı yönetir. Kol sonu takım tutucuları, robotun çeşitli görevleri yerine getirmesine olanak tanır. Ürün yeri değiştirme, kaynak yapma, vakum yapmak vb. özellikler kol sonu takımına kazandırılacak özelliklerden birkaçıdır. Bazı sistemlerde bir çevrimde iki ürüne kaynak yapma bir çevrim içerisinde üç ürünü vakum tutucusu ile kavrayarak al ve yerleştir işlemleri yapmak gibi görevler üstlenebilir. Bu sebeplerden dolayı kol sonu takımı üzerinde birden fazla robotik tutucu yer alabilir örneğin bir robot kol sonu takımı üzerinde tek tutucunun yer alması single gripper, iki tutucunun yer alması double gripper, üç gripperin yer alması triple gripper olarak adlandırılır[1]. Bununla beraber bazı endüstriyel uygulamalarda 6,8 ürünün yerinden alınması ve üretim tezgahına besleme işlemi robot ve robot kol sonu takımı tarafından gerçekleştirilmektedir. Sayıların değişkenliği üretim sisteminin kabiliyetlerine göre ve ihtiyaçlara göre değişkenlik göstermektedir. Robotların yaptığı işlerde insanlara göre daha istikrarlı olması ve daha düşük ücretlerle çalışması robotları son yıllarda endüstride yaygın kılmıştır[2]. Üretimin kalitesinin arttığı süreçlerde ise ürünün kalitesi doğrudan artmaktadır. Endüstriyel robotlar, özellikle ergonomik olmayan görevlerde personellerin yerini alan robotlar ile ilgidir. Ağır yüklerin taşınmasında, zehirli veya sıcak nesnelere ile yapılan tehlikeli görevlerde endüstriyel robotlar kullanılmaktadır. Bununla birlikte hatasız üretim gerektiren, monoton işlemlerde veya rahatsız edici şekilde tekrar eden görevlerde robotlara rastlanmaktadır. [3]. Sürekli olarak tekrar eden robotlu üretim sistemlerinde ise sistemin devamlılığı, hata oranlarının düşük olması oldukça önem taşımaktadır. Bunun yanında sürekli olarak tekrar eden sistemlerde oluşabilecek herhangi bir hata sonucunda robotun veya otomasyon sisteminin kendi içerisinde herhangi bir tolerans sağlayan sisteminin, ekipmanın olamaması durumunda kullanılan ekipmanlar formunu kaybedebilir, işlevini yitirebilir. Bu gibi durumlar sonucunda sistem sürdürülebilirliğini yitirebilmekle beraber formunu kaybeden ekipmanlar bir sonraki hatalı üretime sebep olarak yeni bir kazaya sebep olabilir ve sürekli tekrar eden sistemlerde bu durum üretim kalitesinin düşmesi ve en son önlem olarak ekipmanın değişimi ile sonuç bulabilir. Endüstriyel manipülatörler gibi daha çok yönlü robotlar söz konusu olduğunda, kusurlu sensörler ve robot tarafından üretilen mekanik hatalar nedeniyle bir miktar konum hatası kaçınılmazdır.[4] Robotlu üretim sistemlerinde kuvvet [5], görüntü işleme[6], tork[7] vb. birçok çevresel geribildirimler sayesinde oluşabilecek arızaların kazaların önüne geçilebilir veya kestirimci bakım[8] uygulanması yapılabilir. Çevresel ısının değişimi, eksenlerin hareketlerine bağlı ısınmaya dayalı değişikliklerden dolayı eksenlerin uzunluklarındaki değişiklik vb. sorunlar robotun tekrar aynı pozisyonu almasını doğrudan etkileyebilir. Li[9] yaptığı çalışmada 6 eksenli bir robotun 10 derecelik ısı farkında 0.414mm uzama olduğunu gözlemlemiştir, 0.414mm hassasiyeti düşük olan robotlarda bile ciddi sorunlar yaratabilecek farklardır. Li yaptığı çalışmada KUKA KR5 robotu ile çalışmış ve robotun en uzun kolu 600mm olmasına rağmen 10 derecelik sıcaklık altında 0,414 mm uzama meydana gelmiştir. Sıcaklık farkları fazla olabilen bölgelerde bu fark daha fazla olacaktır. Bununla beraber kimi üretim tesislerinin iyi yalıtım sistemine sahip olmaması genleşme veya büzümeyi artıracak etmenlerdendir. Bu durum eksen uzunlukları uygulamadan uygulamaya 2, 3 metreye varan alüminyum ve çelik gövdeli kartezyen robotlarda çok daha üst seviyelere çıkacaktır. Örnek olarak İstanbul şehrinin ortalama sıcaklık verileri incelendiğinde ise kışın ortalama en soğuk sıcaklık ile yazın en sıcak ortalama değeri arasında 25 derecelik[10] fark oluşmaktadır. Endüstride örneklerine kolayca ulaşabileceğimiz Z eksen uzunluğu 3000mm, X eksen uzunluğu 800mm ve Y eksen uzunluğu 2000mm olan kartezyen robotlarda genleşme ve uzamaların 1,118mm kadar ulaştığı hesaplanmıştır. Oluşabilecek bu mesafe farkı robotun ürünü doğru şekilde yerinden alamamasına ve doğru şekilde yerine yerleştirememesine sebebiyet verebilecektir. Bu sorun ürün alma noktasında şekil-1'de yer alan merkez kaçıklığı probleminin doğmasına sebebiyet verebilecektir.



Şekil 1. Merkez kaçıklığı örneği

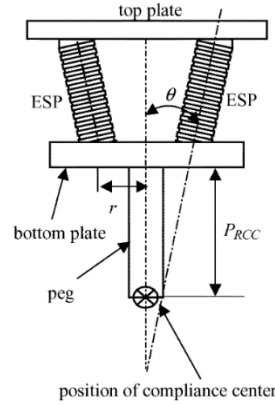
Ürün al ve yerleştir sistemleri tek bir prosedür gibi görünse bile aslında ürün alma ve ürün yerleştirme olarak iki ana başlık içerisinde toplanır. Ürün alma veya kavrama kavramı literatürde Material handling, caging adı ile ürün yerleştirme ise peg-in-hole kavramları ile yer almaktadır. İnsanlar olarak dairesel yuvaya dairesel bir ürünün yerleştirmekten bahsettiğimiz anda, herhangi bir normal insanın belirli problemler olmadan gerçekleştirebileceği son derece basit ve önemsiz bir görevi düşünürüz. Bununla birlikte, bir operatör aynı görevi bir robot ile yerine getirmeye çalıştığında, şaşırtıcı bir şekilde, bunun gibi görünüşte basit görevlerin gerçekte ne kadar karmaşık olduğunu açıkça gösteren muazzam zorluklara, zorluklara maruz kalırız.[11] İmalat sanayisinde robotlu çalışan otomatize edilmiş sistemlerde bu sorun sıkça karşılaşılan sorunlardan birisi olan bu problem örnek olarak bir dairesel şaft milinin, ruman içerisine yerleştirilmeye çalışılması örneği ile karşımıza Şekil-2’de olduğu gibi karşımıza çıkmaktadır. Kullanıcılar ve araştırmacılar bu soruna kuvvet sensörleri veya görüntü işleme teknolojisi ile çözüm getirmektedir. Literatürde ise dairesel bir ürünün dairesel yuvaya yerleştirilmesi problemi peg-in-hole kavramı ile ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2. Endüstride peg-in-hole örneği[12]

Kuvvet geribildirimini ile hareket eden, görevini tamamlayan peg-in-hole sistemlerinde aktif ve pasif olarak iki farklı kuvvet izleme yöntemi vardır. Pasif kuvvet kontrolünde şekil-3’da görülen remote center

compliance cihazları kullanılarak robotun ürünü yerleştirdiği esnada ürünün kendi merkezini kendisinin bulması istenmektedir [13].

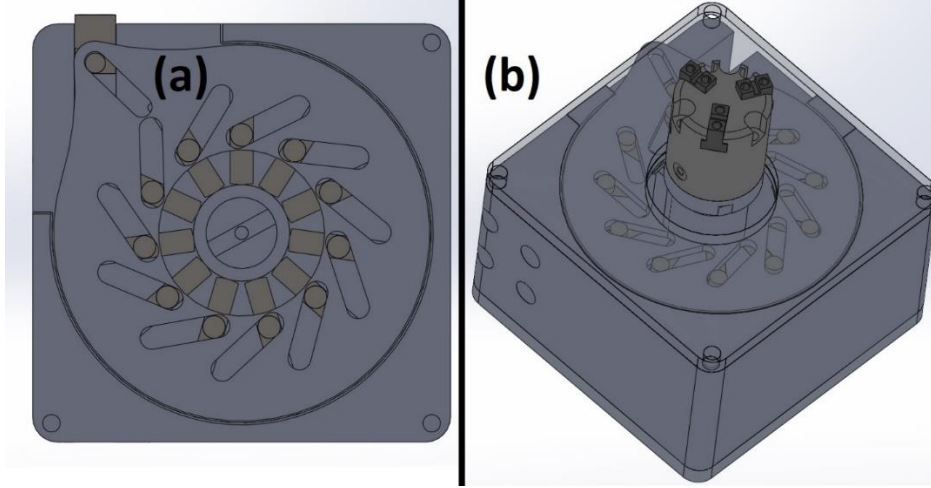


Şekil 3. Remote center compliance örneği[14]

Fakat bu cihazlarda delik yüzeyinden gelen kuvvetlerin ürüne zarar verdiği düşüncesi ve her spesifik görev için farklı bir RCC tasarlanması gerektiği düşüncesi ve araştırmalarda aktif kuvvet izlemenin tüm görevlerde kullanılabilir olacağı düşüncesi ile aktif kuvvet izlemenin kesin çözüm olacağı yönündedir. Ancak kuvvet sensörlerinin fiyatlarının pahalı olması, bazı özel sistemlerde kurulumunun zor olması sebebi ile sensörsüz sistemler çalışılmıştır. Örnek olarak Polverini[15] sensörsüz peg-in-hole sistemini tasarlamış ve kuvvetleri harici olarak robot eksenlerinden almıştır. Fakat sensörsüz sistemlerin yüksek kararlılıkta çalışmaması sebebi ile yüksek kararlılık isteyen sistemlerde tercih edilmemektedir. Aktif kuvvet kontrolü iki başlıkta incelenir bunlar: hibrit kuvvet / konum kontrolü ve empedans kontrolüdür. Yapılan bu çalışmaların tamamında 6 serbestlik derecesine sahip 6 eksen robotları yada kolobratif robotlar kullanılmıştır. Sektörde sıkça karşılaşılan 3 paralel eksene ve pnömatik etkili 1 veya 2 yardımcı eksene sahip kartezyen robotlar için uygulanabilir değildir. Buna karşın Jain[16] yaptığı çalışmada Scara ve kartezyen robotlar gibi hareket kabiliyeti 6 eksen robotlarına göre düşük olan robotlar için iyonik kompozit metal malzemesi ile robotik tutucu tasarlamış kavranılan ürünün yönünü değiştirmek ve 2 farklı kameradan aldığı geri besleme sayesinde peg-in-hole işlemini tamamlamıştır. Fakat tasarlanılan mikro tutucunun ağır yükler için uygun olmaması, standart pnömatik etkili tutucular kadar uzun ömürlü olmaması, endüstriyel bazı spesifik uygulamalar haricinde 2 kamera ile çalışmanın zor olması sebebi ile endüstriyel uygulamalar için uygun olmayacaktır.

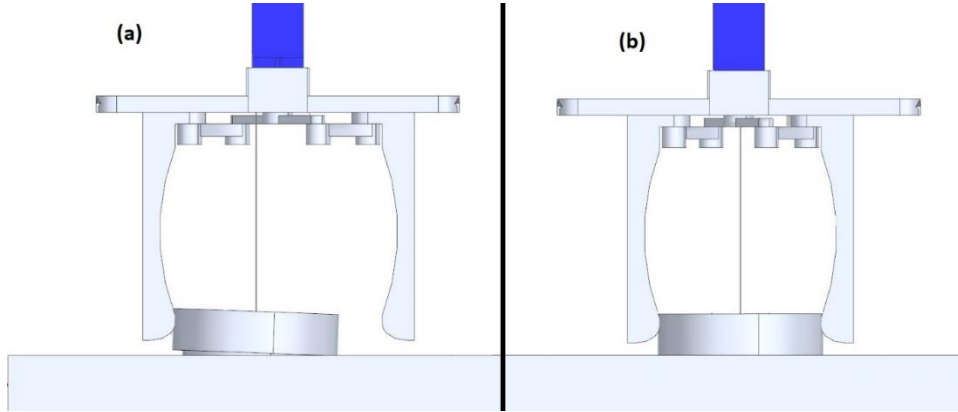
II. MATERYAL VE YÖNTEM

Çoklu ürün al ve yerleştir sistemlerinde yanlış montajlama, sıcaklık değişimi vb. sorunlar nedeni ile üzerinde birden fazla tutucu barındıran kol sonu takımları tutacakları ürüne göre paralellliğini kaybedebilir. hareket kabiliyeti yalnızca 3 paralel eksenden oluşan kartezyen robotlarda bu sorunu giderebilmek tutucu takımının ürünlere olan paralellliğini sağlayabilecek herhangi eksenin bulunmaması sebebi ile bu sorunu giderebilmek oldukça zor olacaktır. Oluşabilmesi muhtemel ürün merkezi ve tutucu merkezi arasındaki merkez kaçıklığı problemi için robotun ürün alma, kavrama noktasına geldiğinde tutucunun ürünü kavrayabileceği alan içerisinde her ne kadar ürün merkezi ve tutucu merkezi arasında fark oluşursa oluşsun bu farkları tolere edebilen pnömatik piston ile çalışan ekipman tasarımı amaçlanmaktadır. Tasarlanılacak ürün öncelikle Siemens Nx ortamında test edilecek yapılan testler sonucunda gerçek deney ortamında denemeleri ve standart tutucuya farkları gözlemlenecektir. Çalışma içerisinde tutucu tarafından kavranılacak ürün silindirik şekile sahip bir ürün olmakla beraber dairesel ekseni etrafında dönmesi herhangi sorun teşkil etmemektedir.



Şekil 4. Merkezlemeli Çalışma pozisyonları; (a) Merkezlemeli Tutucu Kilitli Çene pozisyonu; (b) Merkezlemeli Tutucu Açık Çene pozisyonu

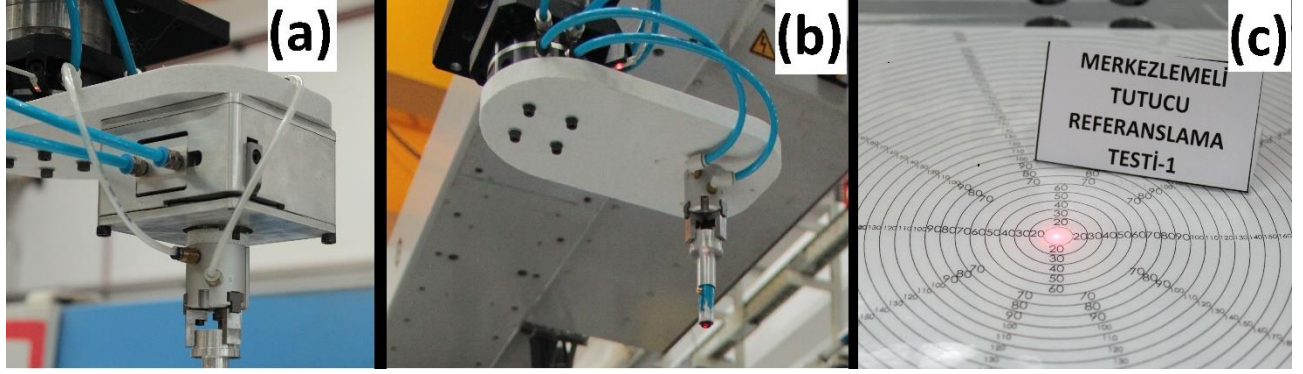
Şekil-4'te görüldüğü üzere yapılan bu tasarımda kilit mekanizmasının açık olması durumunda robotik tutucu X ve Y düzleminde 8,15mm tolerans ile hareket edebilmektedir. Merkezlemeli tutucunun uç tarafına montajlanan tutucunun kavraması istenen ürüne kendisini merkezleyebilir dolayısı ile rijit şekilde yerine sabitlenmiş olan robotik tutucuya göre tutması istenen ürüne kendisini merkezleyebilmektedir. Siemens Nx ortamında yapılan testlerde servo motor ile çalışmakta olan tutucu mekanizması servo motoruna kuvvet 100Nm olarak hem merkezlemeli tutucu sisteminde hemde standar tutucu mekanizmasında aynı yük uygulanmıştır.



Şekil 5. Sonuçların karşılaştırılması (a)Standart tipte tutucunun ürünü kavraması sonucu; (b) Kendinden merkezlemeli tutucu mekanizmasına sahip tutucunun ürünü kavraması sonucu

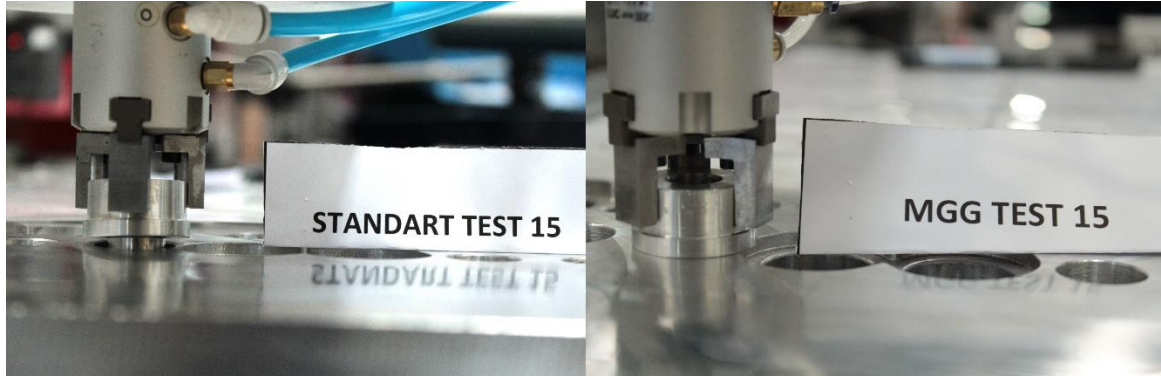
Şekil-5'de görüldüğü üzere Kendinden merkezlemeli tutucuya sahip sistemin ürünü düz bir şekilde kavrayabildiği, standart ve rijit şekilde robot kol sonu takımına sabit lenmiş robotik tutucunun ürünü kavrayamadığı ve ürünün robotik tutucu çenelerine göre paralellliğini kaybettiği Siemens Nx programında yapılan testlerde görülmüştür.

Simulasyon ortamında testleri tamamlanan kendinden merkezlemeli robot tutucusunu ile standart tutucu arasındaki farkların deney ortamında gösterilebilmesi amacı ile hali hazırda endüstride kullanılmakta olan kartezyen robot sistemi kullanılmıştır. Robotun, içerisinde lazer bulunan ürünü sabit bir noktadan alarak belirlenmiş hedef noktasına getirmesi istenmiştir. Test sürecinde robotun pozisyonlaması 0,4mm ile 0,2 mm değiştirilerek ürünün ne kadarlık sapma yapabileceği ve kendinden merkezlemeli robot tutucusunun gerçek test ortamında nasıl tepkiler verdiği ve standart tutucuya göre avantajları gözlemlenmek istenmiştir.



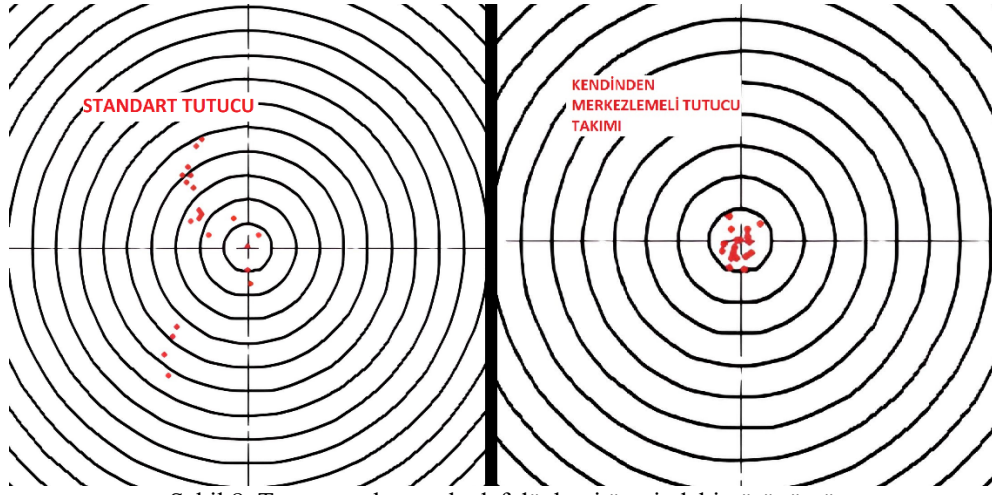
Şekil 6. Deney Koşulları (a)kendinden merkezlemeli tutucu takımı kol sonu takımına montajlanmış görünümü; (b)Standart tutucunun kol sonu takımına montajlanmış görünümü; (c) Hedef düzlemi görünümü

Test sürecinde kullanılmak üzere Şekil-6’da yer alan standart ve kendinden merkezlemeli tutucu takımına sahip tutucular eş merkezli olacak şekilde Robot kol sonu takımına (EOAT) eş merkezli olacak şekilde bağlanmıştır. Ürünün tutucular tarafından kavranılması sonrasında robot tarafında Şekil-6 görselinde yer alan hedef düzlemi üzerinde sabit noktaya getirilerek test 16 kez tekrar edilmiştir. Test her tekrar edildiğinde bir önceki adıma göre robot pozisyonu 0,4mm veya 0,2mm yer değiştirilerek tutucunun ürünü yamuk almaya çalışması zorlanmıştır. Test sürecinde her pozisyon değişimi sonrası test tekrar edilmiş toplamda 16 test yapılmış ve 8 pozisyon değişimi yapılmıştır. Tüm test boyunca yapılan 8 pozisyon değişimi esnasında beşinci pozisyona dek 0,4mm pozisyon değişimi yapılmış beşinci pozisyon sonrasında ise 0,2mm pozisyon değişimi yapılarak toplamda 2,8mm pozisyon değişimi yapılmıştır.



Şekil 7. Her iki tutucu ile yapılan testlerin karşılaştırılması

Standart tutucu ile yapılan testlerde süre gelen adımlarda robot konumu 0,4mm ve ,2mm yer değiştirilmiş her adımda tutucunun ürünü giderek daha zor ve tutucu tırnaklarına göre daha yamuk şekilde kavradığı gözlemlenmiştir. Standart tutucu ile yapılan testlerde tutucunun kavradığı ürün içerisinde bulunan lazer ışığının Şekil-7’de yer alan hedef düzlemi merkezine göre 31,53mm mesafe farkı ve 6°’lik açı farkı yarattığı gözlemlenmiştir. Aynı test Kendinden merkezlemeli tutucu mekanizmasına sahip tutucuda test edildiğinde ise 3,58mm mesafe farkı ve 0,68°’lik açı farkı oluşturduğu Şekil-7’de yer aldığı gibi gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Test sonuçlarının hedef düzlemi üzerindeki görünümü

Yapılan tüm testler Şekil-8’de yer aldığı gibi hedef düzlemi üzerine yansıtıldığında kendinden merkezlemeli tutucuya ait sonuçlar hedef düzlemi merkezine çok yakın olduğu görülmektedir.

III. SONUÇLAR

Literatür araştırması ve sorunun gözlemlenmesi sonucunda, hareket kabiliyeti çoğu robota göre kısıtlı olan 3 paralel eksene sahip kartezyen robotlar için tasarlanan merkezlemeli robot tutucusu mekanizmasının ürün merkezi ile robot tutucu merkezi arasındaki oluşabilecek farkları tolere ettiği Siemens Nx programında yapılan testlerde gözlemlenmiştir. Sanal ortamda yapılan bu testlerin ardından ürün gerçek deney ortamında da test edilmiş ve merkezlemeli tutucu mekanizmasının oluşabilecek mesafe farklarında ürünü doğru kavradığı ve kararlı çalıştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu tasarımın olası merkez kaçıklığı problemlerinde ürün merkezi ile robot tutucu merkezi arasındaki 8,15 mm'ye kadar olan mesafeleri tolere edebileceği belirlenmiştir. Kartezyen robotlarla yalnızca bir ürünün yerinden alınıp yerine yerleştirilmesi noktasında oluşabilecek hatalar belirli periyotlarda yapılan pozisyon ayarlamalarıyla giderilebileceği gibi, kendinden merkezlemeli robotik tutucu sistem, ürün alma noktasındaki kararlılığı artıracaktır. Ancak kartezyen robotlarla her çevrimde birden fazla ürünün yerinden alınıp yerleştirilmesini içeren sistemlerde, kartezyen robotların kısıtlı hareket kabiliyeti ve uzun süren ve kesin sonuç vermeyen ayarlamalar sebebiyle kendinden merkezlemeli robotik tutucu mekanizmasının sisteme kararlılık açısından önemli destek sağlayabileceği gözlemlenmiştir.

IV. TARTIŞMA

Yalnızca ürün alma noktasındaki hataların giderilmesi amacı ile tasarlanılan ürün yapılan testler sonucunda ürün alma konusunda tek başına sistemin kararlı çalışabilmesine büyük destek sağlayabilecekken çevresel ısı değişimi, çalışma süreçlerine bağlı olarak eksenlerin genleşmesi veya büzüşmesi dolayısı ile eksenlerin uzaması veya kışalması gibi durumlarda robotun yalnızca ürün alma konumu değişmeyecektir aynı zamanda ürün yerleştirme konumunda farklılık gösterecektir. Bu gibi durumlarda ürünün yanlış yere takılmaya çalışılması sebebi ile kullanılan ekipmanlara zarar görebilir. Ürün alma noktasında kullanılabilen “merkezlemeli robot tutucusu” ekipmanı hem ürünün alındığı hemde ürüne göre hassas sayılabilecek farklara sahip yuvalara yerleştirildiği ürün al ve yerleştir sistemlerinde tek başına yeterli olmayacaktır. Çoklu ürünün hareket kabiliyeti kısıtlı ve pnömatik yardımcı eksenlere sahip kartezyen robot ile yerleştirilmesi aşamasında hassas eksen hareketleri gerektiren peg-in-hole işleminin uygulanması mümkün olmayacaktır. Bunun yerine ürün yerleştirme işleminde görüntü işleme ile ürün yerleştirilecek noktaların takip edilmesi kararlı bir çözüm sunabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamızda FYL-2023-11037 nolu proje numarası ile bizi destekleyen Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Proje Komisyonuna sağladığı katkılardan dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

REFERANSLAR

1. Monkman, G.J., et al., *Robot grippers*. 2007: John Wiley & Sons.
2. Dauth, W., et al., *German robots-the impact of industrial robots on workers*. 2017.
3. GÜDEK, B., *Endüstriyel dönüşüm ve endüstri 5.0*. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 2023. **16**(4): p. 1129-1142.
4. Park, H., et al., *Compliance-based robotic peg-in-hole assembly strategy without force feedback*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017. **64**(8): p. 6299-6309.
5. Olsson, T., et al., *Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010. **26**(1): p. 24-38.
6. Vijayan, A.T. and S. Ashok. *Integrating visual guidance and feedback for an industrial robot*. in *2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*. 2017. IEEE.
7. Luh, J., W. Fisher, and R. Paul, *Joint torque control by a direct feedback for industrial robots*. IEEE Transactions on Automatic Control, 1983. **28**(2): p. 153-161.
8. Borgi, T., et al. *Data analytics for predictive maintenance of industrial robots*. in *2017 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC_ASET)*. 2017. IEEE.
9. Li, R. and Y. Zhao, *Dynamic error compensation for industrial robot based on thermal effect model*. Measurement, 2016. **88**: p. 113-120.
10. Aslan, Z., et al., *İstanbul'un Asya ve Avrupa Bölgeleri'nde hava sıcaklığı ve yağış miktarı değişimleri*. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 2016. **2**(1): p. 11-29.
11. Pettinaro, G.C., *Behaviour-based peg-in-hole*. Robotica, 1999. **17**(2): p. 189-201.
12. Su, J., et al., *Sensor-less insertion strategy for an eccentric peg in a hole of the crankshaft and bearing assembly*. Assembly Automation, 2012. **32**(1): p. 86-99.
13. Fazio, T.L.D., D.S. Seltzer, and D.E. Whitney, *The instrumented remote centre compliance*. Industrial Robot-an International Journal, 1984. **11**: p. 238-242.
14. Lee, S., *Development of a new variable remote center compliance (VRCC) with modified elastomer shear pad (ESP) for robot assembly*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2005. **2**(2): p. 193-197.
15. Polverini, M.P., et al. *Sensorless and constraint based peg-in-hole task execution with a dual-arm robot*. in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2016. IEEE.
16. Jain, R.K., S. Majumder, and A. Dutta, *SCARA based peg-in-hole assembly using compliant IPMC micro gripper*. Robotics and Autonomous Systems, 2013. **61**(3): p. 297-311.