

YÜKSEK İVMELİ PARALEL ROBOTLARIN KONUMLAMA HASSASİYETİNİN ARTIRILMASINA YÖNELİK YÖNTEMLERİN ARAŞTIRILMASI

Emre UZUNOĞLU¹, Merve ÖZKAHYA¹, Erkan PAKSOY¹, Barış TANER², M. İ. Can DEDE¹,
Gökhan KİPER¹

¹İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir

²University of Texas at Arlington, Makina ve Havacılık Mühendisliği Bölümü, Teksas

emreuzunoglu@iyte.edu.tr, merveozkahya@iyte.edu.tr, erkanpaksoy@iyte.edu.tr,
baristaner90@gmail.com, candede@iyte.edu.tr, gokhankiper@iyte.edu.tr

Bu çalışmanın temel amacı endüstriyel uygulamalarda giderek sıklıkla kullanılmaya başlanan yüksek ivmeli çalışan paralel robotların konumlama hassasiyetlerini artırmak üzere yapısal ve denetimsel iyileştirme yöntemlerinin araştırılmasıdır. Çalışma dâhilinde robot sistemlerinin hassasiyetini bozan geometrik olan ve olmayan faktörlerin etkilerinin en aza indirilmesi için yöntemler araştırılmıştır ve önerilmiştir. Bu yöntemler içerisinde geometrik olan faktörlerin tamamı, geometrik olmayan faktörlerden robot manipülatör direngenlikleri ve denetim hataları, ve bunlara ek olarak dengelenmemiş kütlelerden kaynaklanan hatalar konularında yapılan araştırmalar sunulmuştur. Ayrıca yöntemlerin araştırılması, kıyaslama amacı ile aynı işi yapmak üzere iki farklı yapıya sahip normal kısıtlı ve fazla kısıtlı iki mekanizma yapısı bu bildiri dâhilinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Paralel manipülatörler, konumlama hassasiyeti, mekanizmaların dengelenmesi, mekanizmaların direngenlik analizi

A REVIEW OF METHODOLOGIES FOR INCREASING THE POSITIONING ACCURACY OF HIGH-ACCELERATION PARALLEL ROBOTS

ABSTRACT

The aim of the study is to investigate structural and control-based improvements in order to increase the positioning accuracy of parallel robots commonly used in industrial applications. In this study, methodologies are investigated and proposed to minimize the effects of the geometrical and non-geometrical factors that adversely affect the accuracy of robot systems. In the scope of these methodologies, previous studies are presented on all of the geometrical factors and on stiffness of robot manipulators, minimizing the control errors and balancing, which are classified as non-geometrical factors. In addition, a simply constrained and an overconstrained robot mechanism structures that are designated to carry out the same tasks are presented in this paper for the further investigation and comparison of the methodologies.

Keywords: Parallel manipulators, positioning accuracy, balancing of mechanisms, stiffness analysis of mechanisms

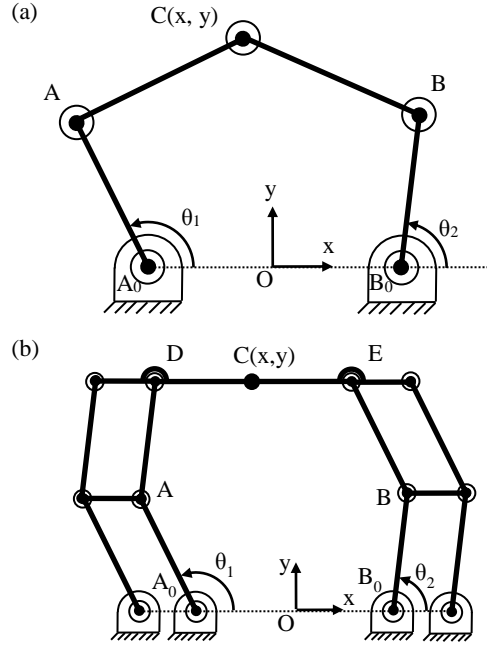
1. GİRİŞ

Zorlayıcı yükler altında ve kısıtlı alanlarda yüksek ivmeli ve hassas hareketler yapılması gerektiğinde seri robot kollar esneme problemi nedeniyle istenilen performansı veremediğinden paralel kinematik mimariye sahip robot kollar tercih edilebilmektedir. Yüksek direngenlik, yüksek hızlara çıkabilme,

yüksek hassasiyet, yüksek yük/ağırlık oranı ve düşük ataletle sahip olmaları nedenleri ile paralel manipülatörler 25 yılı aşkın süredir çalışılmaktadırlar ve halen üniversitelerin ve sanayi kuruluşlarının odağındadırlar [1]. Paralel mekanizmaların seri mekanizmalara göre daha hassas konumlandırma yapabileceği basit hata analizleri ile gösterilebilir [2].

Paralel mekanizmaların kinematik yapısının tasarımında çokça kullanılan başarımlı ölçütleri çalışma uzayı, kinematik tekillikler, hassasiyet ve direngenliktir [1]. Her ne kadar kinematik yapıda çeşitli başarımlı ölçütlerine göre eniyilemeler yapılsa da mekanizmanın üretimi ve montajı yapıldığında üretim hataları, yapısal esneklikler gibi etkenlerden ötürü arzu edilen konumlama hassasiyeti elde edilemeyebilmektedir. Bu durumda manipülâtörün kalibrasyonu için yapısal [3] ve denetsel müdahaleler gerekmektedir [4].

Paralel mekanizmaların iyileştirilmesi çalışması dâhilinde önemli bir konu da normal ve fazla kısıtlı kinematik yapıya sahip mekanizmaların karşılaştırılmasıdır. Fazla kısıtlı mekanizmaların normal kısıtlı mekanizmalara oranla genelde daha direngen olduğu bilinmektedir [5-7]. Ayrıca önceki çalışmalarda fazla kısıtlılığın özellikle tekrarlanabilirlik hassasiyeti üzerine olumlu etkileri olduğunu bilinmektedir [4]. Üzerinde çalışılması planlanan mekanizmalar düzlemde uç elemanı konumlandırmak için kullanılacak iki serbestlik dereceli mekanizmalardır. Normal ve fazla kısıtlı mekanizma için düzlemsel beş çubuk (5R) mekanizması temelli mekanizmalar (Şekil 1(a)) üzerine çalışılacaktır. Düzlemsel 5R mekanizması 1980'lerden beri iki kollu seri manipülâtöre alternatif olarak kullanılmaya başlanmış üzerinde en çok çalışılan ve uygulama bulan düzlemsel paralel manipülâtörlerden biridir [8]. Alıcı ve Shirinzadeh'ye [9] göre 5R mekanizması uygulamada önem arz eden yegâne çok kranklı düzlemsel mekanizmadır. Fazla kısıtlı mekanizma olarak 5R mekanizmasının her iki koluna paralelkenar devreleri eklenerek türetilmiş olan 6R mekanizması (Şekil 1(b)) kullanılacaktır [3]. Ön ve arka kolların boyları birbirlerine eşit alındığında ve sabit uzuv boyu doğru seçildiğinde Şekil 1'deki iki mekanizma görev uzayı ile girdi uzayı arasındaki ilişki aynı hale getirilerek kinematik olarak denk olabilmektedir. Normal kısıtlı mekanizma olarak ise fazla kısıtlı mekanizmanın paralelkenar devrelerinden birinin bir kolu çıkarılarak elde edilen mekanizma kullanılacaktır. Böylelikle mümkün olduğunca birbirine denk mekanizmalar üzerine çalışılarak daha sağlıklı bir karşılaştırma yapılması planlanmaktadır.



Şekil 1. a) Normal kısıtlı 5R mekanizması, (b) Fazla kısıtlı 6R mekanizması

Bu çalışmada araştırılan yöntemler ileriki çalışmalarda normal kısıtlı ve fazla kısıtlı kinematik yapıya sahip iki robot mekanizması tasarlanarak ve üretilerek aşağıdaki kıstaslara göre kıyaslanması planlanmaktadır.

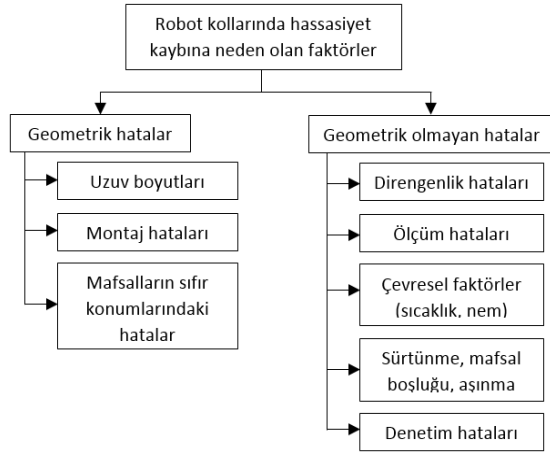
- Enerji verimliliği
- Dengeleme ve kaideye etki eden sarsma kuvvetleri
- Konumlama ve tekrarlanabilirlik hassasiyetleri
- Model karmaşıklığı ve sistem kararlılığı açısından kontrol edilebilirlik
- Kalibrasyon kolaylığı

Böylelikle kinematik olarak birbirine denk iki mekanizma üzerinde çalışılarak özellikleri ve başarımlı performansları karşılaştırılabilir olacaktır.

Yüksek ivmeli sanayi uygulamalarında kullanılacak paralel robotların konumlama hassasiyetlerinin iyileştirilmesi için bu tip yapıdaki mekanizmalarının ve yöntemlerin incelenmesi önemlidir. Bu çalışma, iki farklı mekanizmanın kıyaslanması ve direngenlik, dengeleme, kontrol edilebilirlik ve kalibrasyon konuları ele alınarak konumlama hassasiyetinin iyileştirilmesi için gerekli yöntemlerin araştırılması üzerinedir.

2. KONUMLAMA HATALARI VE BU HATALARIN İYİLEŞTİRİLMESİ

Robot kollarının hassasiyetleri konusunda yapılan bir çalışmada hassasiyete etki eden etmenler geometrik olan ve olmayanlar olarak Şekil 2’de sınıflandırılmıştır [10]. Geometrik hatalar uzuvlar ve montaj üzerinden yapılacak ölçümler ile kinematik yapının parametreleri güncellenerek çözülebilmektedir. Mafsalların sıfır konumlarındaki hatalar ise uygun bir kalibrasyon yöntemi ile giderilebilmektedir [10-14]. Serbest harekette ve düşük kuvvet iletilen düşük hızlı çalışmalarda hassasiyet hatalarının %90’ı geometrik etmenlerden dolayı oluşmaktadır [15].



Şekil 2. Robot kollarında hassasiyete etki eden etmenler

Geometrik hataların giderilmesi için bir robot manipülatörün kalibrasyonu iki ana aşamadan oluşmaktadır. Kinematik kalibrasyon olarak adlandırılan [16] ilk aşama, üretilen parçalar üzerinden ölçü alınarak gerçekleşen ölçülere göre sistemin denetim algoritması içine gömülü modelinin güncellenmesidir. İkinci aşama ise robotun çalışma uzayı içerisinde mümkün olduğunca fazla konumda veri alınarak hataların telafisinin sağlanmasıdır. Fazla kısıtlı mekanizmalarda tüm uzuv boyutları ölçülerek kinematik hesaplar için analitik bir model oluşturmak mümkün değildir. Bu nedenle “gizli robot” denilen kinematik yapısı daha basit, normal kısıtlı bir sistem modelinin denetim algoritmasında kullanılması gerekmektedir. Gizli robot kavramı aslında uç elemanı doğrudan gözlenemeyen robotların kalibrasyonu için kullanılmak üzere geliştirilmiştir [17]. Ancak Kiper vd. [4] bu yöntemi bir fazla kısıtlı mekanizmanın kalibrasyonu için kullanmıştır.

Geometrik olmayan hataların giderilmesi ise geometrik hatalara göre nispeten daha yaratıcı çözümlerin geliştirilmesini gerektirmektedir [18]. Robot sistemindeki yapısal esnemeler özellikle yük altında veya yüksek ivmeli çalışmalarda direngenlik hataları olarak tanımlanan hassasiyet kaybına sebep olmaktadır.

Kullanılan algılayıcılardan kaynaklanan ölçüm hataları ve çevresel faktörler de hassasiyet kayıplarına yol açabilmektedir. Algılayıcıların hassasiyetlerinin yüksek seçilmesi ve çalışma ortamının çevresel şartlarının sabit tutulması bu tür hassasiyet kayıplarına çözüm olabilmektedir. Bir diğer husus ise sürtünme, mafsal boşlukları ve zaman içinde meydana gelecek mafsal aşınmalarıdır. Bu tip durumlara yöringe planlamasında yapılacak değişiklikler (düşük ivmeli veya girdi şekillendirmeli bir çalışma tipi), zamanında bakım ve yıpranan parçaların değiştirilmesi çözüm oluşturmaktadır.

2.1. Direngenlikten kaynaklanan konumlama hatalarının giderilmesi

Uzuvlarda oluşacak anlık deformasyonlar kinematik yapının parametrelerini değiştirmekte ve her ne kadar eklem uzayındaki denetim hataları en düşük düzeyde tutulsa da uç noktasının istenen yörüngeden sapmasına neden olmaktadır. Bu etki robotun direngenliği olarak adlandırılmaktadır [16]. Dışarıdan eklenecek kamera sistemleri veya lazer tarayıcılar ile uç noktasının izlenmesi direngenlik hataları için bir çözüm olarak düşünülebilir [19]. Ancak bu tip ölçüm sistemleri nispeten pahalı oldukları için ve yüksek hızlarda çalışan sistemler için gerekli hızda örnekleme yapamadıkları için genellikle kalibrasyon için uygundur [20]. Direngenlikten kaynaklanan hassasiyet hatalarının giderilmesi için robot sisteminin yapısal direngenliği yükseltilmeli [21] veya direngenlik hatalarının hesaplanıp robotun yörüngesinin güncellenmesi gerekmektedir [22].

Direngenlik modelini oluşturmak için temel olarak iki farklı yaklaşım mevcuttur. Bunlardan bir tanesi sonlu elemanlar yöntemi temellidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile bir uzvun yüksek sayıda elemana bölünmesi ve hesaplanması tasarım süreci için uygun bir

yöntemdir [23]. Ancak, çevrimiçi kullanılacak bir modelde sonuçlarının hassasiyetine karşılık yüksek hesaplama maliyeti nedeniyle tercih edilmemektedir. Yapısal Matris Analizi (YMA) sonlu elemanlar yöntemi temelli bir yöntem olmasına rağmen daha az eleman kullanımı nedeniyle (genellikle bir uzuv için tek bir eleman) sonlu elemanlar yöntemine göre hesaplama maliyeti daha azdır ve analitik olarak direngenlik modeli çıkarılabilmektedir [24]. Bu yöntemde mafsallar esnek veya rijit olarak kabul edilebilmektedir. Bu yöntem çevrimiçi kullanıma uygun olsa da hesaplama hassasiyeti sonlu elemanlar yöntemine göre düşüktür.

Sonlu elemanlar temelli yöntemler dışında paralel robot manipülatörlerin direngenlik modellerinin hesaplanmasında nispeten daha yeni yöntemler uzuv esnekliklerinin mafsallara indirildiği yöntemlerdir. Bunlardan sanal mafsal yöntemi (SMY) esneyen uzvun karakteristiklerini bir önceki mafsala indirgemektedir [25]. Bu yöntem genellikle analitik çözüm verdiği için çevrimiçi yöntemlerde direngenlik modeli oluşturulması için en uygun yöntem olarak Klimchik [10] tarafından önerilmiştir. SMY ayrıca fazla kısıtlı paralel mekanizmaların direngenlik modellerinin oluşturulmasında da kullanılmıştır [6]. Bu çalışmada her bir uzvun sonlu elemanlar yöntemi ile direngenlik matrisleri sadece bir kereliğine hesaplanmış ve modele dâhil edilmiştir. Bu şekilde SMY'nin hesaplama maliyeti değişmezken yöntemin hesaplama hassasiyeti sonlu elemanlar yönteminin hassasiyetine yaklaşmıştır. Bir diğer yöntemde ise SMY'de yapıldığı gibi robotun konfigürasyonuna göre değişen bir evrensel direngenlik matrisi oluşturmak yerine dışarıdan etki eden kuvvet ve momentler mafsallara indirgenerek mafsallarda meydana gelen yer değiştirmeler Kartezyen uzayına aktarılmaktadır [26].

Çalışma kapsamında bahsi geçen direngenlik modeli oluşturma yöntemleri fazla kısıtlı mekanizmaların modelinin oluşturulmasındaki kolaylığa göre, hesaplama maliyetine göre, hesaplama hassasiyetine göre ve sonuç olarak denetim algoritmalarında sistem modeline yerleştirmeye imkân vermesine göre sınanarak birbirleri ile kıyaslanması gerekmektedir.

2.2. Dengeleme ile konumlama hatalarının iyileştirilmesi

Robot sistemlerinde hassasiyete etki eden faktörler arasında bahsi geçmeyen bir başka faktör ise özellikle yüksek ivmeli çalışmalarda etkisini gösteren dengelenmemiş bir sistemde oluşacak titreşimlerdir [27]. Söz konusu titreşimler yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda tolerans değerlerinin aşılmasına ve uygun olmayan sonuçlar elde edilmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle mekanizmaların çalışması sırasında kaideye etki eden tepki kuvvetleri nedeniyle meydana gelen titreşimlerin sıfıra indirgenmesi ya da en azından azaltılması amaçlanır. Kaideye tepki kuvvetlerinin sıfırlanmasına kuvvet dengelemesi, tepki momentlerinin sıfırlanmasına ise moment dengelemesi denir. Bir mekanizmanın dinamik dengede olabilmesi için tüm sistemin kütle merkezinin tüm hareket boyunca sabit kalması gerekir. Bu çoğu mekanizmada mümkün olmamaktadır ve bu durumda kütle merkezinin az ve düzgün hareket etmesi sağlanmaya çalışılır. Mekanizmaların kuvvet ve moment dengesi için en çok bilinen yöntem kütle eklenmesi çıkarılması ile atalet dağılımının değiştirilmesidir (karşıt kütle yöntemi) [28]. Karşıt kütleler mekanizma uzuvlarına monte olabileceği gibi dişli bağlantıları ile sabit uzva monte de olabilir. Diğer yöntemler ise yaylarla dengeleme [9], paralelkenar devreleri ekleyerek dengeleme [29] ve mekanizmanın ayna görüntüsü ile dengelemedir [30]. Bu sayılan yöntemlerin tamamı pasif dengeleme yöntemleridir. Kaideye etki eden kuvvet/momentlerin tersi yönde kuvvet/moment uygulayacak şekilde kaide üzerine dengelenecek kuvvet/moment sayısınca ekstra motor ve atalet yerleştirilerek aktif dengeleme yapılması da mümkündür [31].

Eş kollara sahip 5R mekanizmasının pasif ya da aktif kuvvet/moment dengelenmesi mümkündür. Özellikle karşıt kütle yöntemi ile dengeleme tek serbestlik dereceli paralel mekanizmalarda çokça çalışılmış olmakla birlikte çok serbestlik dereceli paralel mekanizmaların dengelenmesi konusunda az sayıda çalışma bulunmakta ve teorik çalışmaların uygulamadaki başarımı ile ilgili bilgi bulunmamaktadır.

3. KONUMLAMA HATALARININ DENETLEYİCİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Denetim hatalarında endüstriyel sistemlerde kullanılan servomotorların sürücülerinde yer alan gömülü denetleyiciler genellikle iç-içe geçmiş (İng: cascade) PID çevrimleri şeklindedir ve farklı denetim sistemlerinin sürücü içine gömülmesine izin vermemektedir. Bazı sürücülerde sadece akım denetleyicisi kullanılarak denetim algoritmasının CNC denetleyicisi kısmına alınması mümkün iken bu durum özellikle yüksek hızlı-ivmeli çalışmalarda örnekleme frekansını düşürdüğü için tercih edilmemektedir. Genellikle endüstriyel sistemlerde kullanılan servo motorların yüksek oranlı redüksiyona sahip olması nedeni ile bahsi geçen PID denetleyicileri parametrelerinin uygun ayarlanması ile nispeten hassas denetim yapılabilmektedir.

Yüksek redüksiyon oranına sahip mafsal eyletici sistemleri olan robotlarda PID denetleyiciler ile model belirsizlikleri ve bozan etkenlerle baş edilebilse de bilimsel yazında doğrusal olmayan denetleyicilerin avantajları da yer almaktadır. Doğrusal olmayan denetleyiciler ile özellikle üzerinde çalışılan probleme özgü tasarımlar yapılabilen ve doğrusal denetleyicilerle kıyaslandığında başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir [32, 33]. Bu kapsamda denetsel yöntemler için diğer bir konu model tabanlı doğrusal olmayan denetleyici yöntemler ile hassasiyetin artırılmasıdır. Bu alanda gerçekleştirilebilecek çalışmalar arasında direngenlik modeli ve yükleme durumu kestirimlerini uyarlamalı yöntemler kullanarak elde etme ve bu kestirimleri denetleyici tasarımında kullanarak sistemin başarımını artırma bulunmaktadır. Bu noktada karşılaşılabilecek diğer model belirsizlikleriyle başa çıkmak amacıyla dayanıklı denetleyici tasarımlarının tercih edildiği görülmektedir.

3.1. Direngenlik modeli ile denetleyici performansının iyileştirilmesi

Konumlama hassasiyetinin özellikle yapısal direngenliğin gözetilerek iyileştirilmesi, denetim araştırmaları göz önünde bulundurulduğunda, açık araştırma alanları

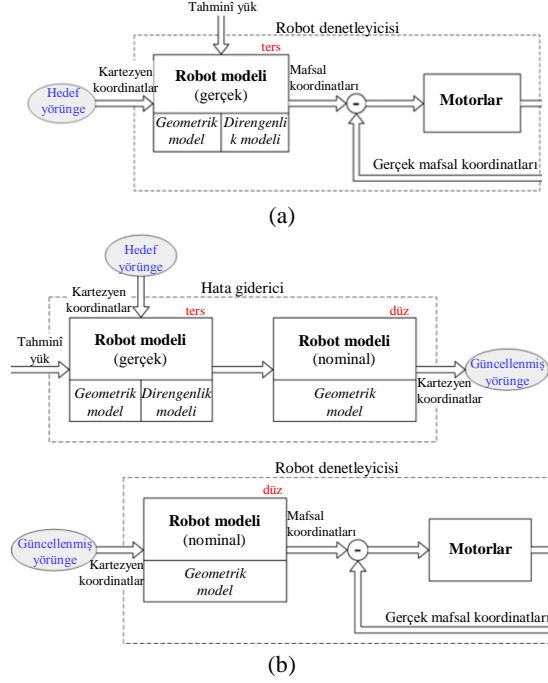
arasında yer almaktadır. Bu çalışma göz önünde bulundurulduğunda, paralel robotların bir veya birden fazla uzvunda esneme olması durumunda görev uzayında takip denetimi önem kazanmaktadır. Bu takip denetimi probleminin çözümünde direngenlik modeli ve yükleme durumu kestirimleri kullanılarak model belirsizlikleri ve bozan etkenlere dayanıklı model tabanlı uyarlamalı denetleyici tasarımları öngörülmektedir.

Endüstriyel bir sistem üzerinde, servo motor sisteminin sürücüsündeki denetim algoritmasının değiştirilememesi durumunda (yani doğrusal olmayan denetleyicilerin kullanılmaması durumunda) bile direngenlik matrisi oluşturma çalışmalarının neticesinde çalışma koşullarında oluşacak sistem üzerindeki esnemeler hesaba katılarak robot manipülatörlerinin yörüngeleri güncellenebilir ve sürücü içindeki PID denetleyicisi kullanılabilir. Yörünge güncellemeleri çevrimdışı ya da çevrimiçi olarak gerçekleştirilebilir.

Her iki çalışma şeklinin blok diyagramı Şekil 3'te verilmiştir. Şekilde verilen iki örnek blok diyagramında da alt seviye motor denetimi motor sürücüsü içine gömülen denetleyiciye bırakılmıştır. Şekil 3(a)'daki durumda CNC içinde yörünge değişiklikleri direngenlik modeline ve tahmini yükleme durumuna göre yapılmaktadır. Şeklin alındığı kaynaktan ele alınan uygulama talaşlı imalat uygulaması olduğu için dışarıdan uygulanan yükün tahmini önem kazanmaktadır. Yüksek ivmeli hareketlerin olduğu durumda geliştirilecek sistem modeli sayesinde taşınan yükün uç noktasında oluşan ivme neticesinde sisteme uyguladığı kuvvetler yüksek hassasiyetle hesaplanabilecektir.

Yörünge güncellenmesi sonrasında değiştirilen yörünge motor sürücüsüne girdi olarak aktarılmaktadır. Şekil 3(b)'de ise direngenlik hatası telafisi CNC dışında bilgisayar-destekli-üretim programının arkasından gelen son-işlemci (post-processor) üzerinde yapılmaktadır. Çalışma uzayında yapılan yörünge değişiklikleri daha sonra CNC sistemine aktarılmaktadır ve standart CNC denetimi altyapısı işletilmektedir. Her iki yönetimin de birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Çevrimiçi yöntemde CNC'lerin

içine özel kodlar gömülmesi genellikle CNC üretici firma tarafından kısıtlanmaktadır. Bu engel aşıldığı takdirde anlık gelecek yük bilgileri ile daha hassas denetim sağlanması mümkün olacaktır.

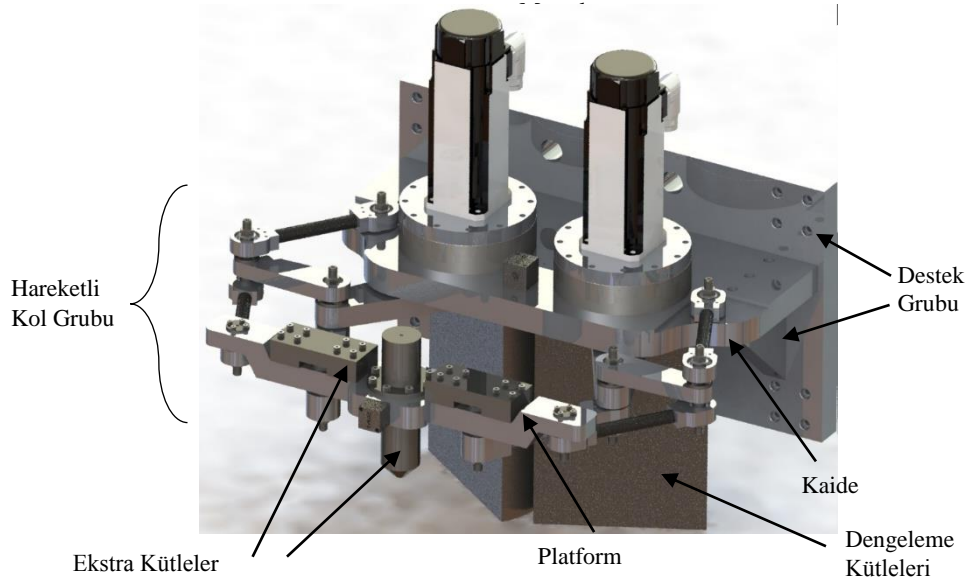


Şekil 3. Direngenlik modeli eklenmiş denetim algoritmaları: Direngenlik modelinin (a) Çevrimiçi kullanımı, (b) Çevrimdışı kullanımı [34]

4. MEKANİZMA KONSTRÜKSİYONEL TASARIMI

Bu çalışmada önerilen yöntemlerin sınanması için konstrüksiyonel tasarım çalışmaları büyük ölçüde tamamlanmıştır ve kısaca bu bölümde sunulmuştur. Fazla kısıtlı mekanizma için oluşturulan katı modelin son hali Şekil 4'te verilmiştir. Motorlara sıklıkla redüktörler bağlıdır. Motorlara bağlı kollar yekpare alüminyum malzemeden tasarlanmış olup platforma bağlı kollar ile paralelligi sağlayan dıştaki kollar alüminyum parça bağlantılı karbon fiber kompozit tüp borulardan oluşmaktadır. Bu kısım hareketli kol grubu olarak adlandırılmıştır.

Hedeflenen 5 kg taşıma yükünü sağlamak için platforma ek kütleler tasarlanmıştır. Normal kısıtlı mekanizma için ön paralel kollardan biri sökülecek olup dinamik denklik sağlanması için çıkarılan kolun bağlantı eksenlerine ek kütleler eklenecektir. Dengeleme kütleleri de kademeli olarak tasarlanmıştır. Böylelikle farklı yük koşulları ve dengeleme kütleleri için testler yapılabilecektir. Direngenlik modelinin oluşturulması için uzuvların esneme ölçümleri ile sonlu eleman analizleri yapılacaktır.



Şekil 4. Konstrüksiyonel tasarım

5. SONUÇLAR

Bu çalışma temel olarak al-yerleştir, talaşlı imalat, lazer teknolojileri gibi endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan paralel mekanizmalı robotların yüksek ivmeli çalışma koşullarında konumlama hassasiyetinin artırılması konusunda modellerin geliştirilmesi üzerine araştırma yaparak bilgi birikimi oluşturmaya yöneliktir. Bu ön çalışmada normal kısıtlı ve fazla kısıtlı paralel robotların birbirleri ile farklı kısıtlara göre kıyaslanması gerçekleştirileceği için araştırmalar bu tip mekanizmalar gözetilerek, kullanım şekline göre hangi yöntemlerin uygun olabileceği belirlenerek yapılmıştır. Her iki tip robotun belirlenen ölçütlere göre iyileştirilmesi için öneriler (atalet dengelemesi, direngenlik modellerinin denetime dâhil edilmesi, CNC denetleyicisi işlem kabiliyetine uygun doğrusal olmayan uyarlanabilir denetleyici) yapılan yazın taraması ile oluşturulmuştur.

Kalibrasyon ve denetim çalışmalarında gizli robot kavramının fazla kısıtlı mekanizmalar üzerine uygulanması, normal ve fazla kısıtlı mekanizmaların konumlama hassasiyetine etkisi ve enerji verimliliğinin deneysel olarak karşılaştırılması, çok serbestlik dereceli sistemlerin kısmi dengeleme optimizasyonu ve direngenlik modellerinin dinamik koşullarda araştırılması konuları uluslararası düzeyde özgün çalışmalardır. Dolayısı ile çalışmada önerilen söz konusu iyileştirmeler özellikle üretimde kullanılmaya başlanan paralel robotların performanslarının iyileştirilmesi için yol gösterici nitelik taşımaktadır.

İleriki çalışmalarda, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen araştırmalar sonucunda mekanizma uzuvları direngenlik / atalet oranı gözetilerek eniyilenecektir. Bunun dışında robot manipülörlerinin direngenlik modelleri oluşturulup çalışma koşullarında oluşacak hassasiyet hataları hesaplanması ve bu hatalara göre yörüngeyenin yeniden düzenlenmesi giderilmesi suretiyle hassasiyet değerleri iyileştirilmesi üzerine denetim yöntemleri ile çalışmalar gerçekleştirilecektir. Normal kısıtlı ve fazla kısıtlı manipülör üzerinde deneysel sonuçlar ile önerilen yöntemlerin karşılaştırılması sunulması planlanmaktadır. Ayrıca tam dengeleme ve

kısmi dengeleme optimizasyonu ve robot kalibrasyonu üzerine deneysel çalışmalar da gerçekleştirilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada sunulan araştırmaya destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz (Proje Numarası: 116M272).

KAYNAKÇA

- [1] Liu, X-J., Wu, C., Wang, J., "A new index for the performance evaluation of paralel manipulators: a study on planar paralel manipulators". 7. World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, Çin, s. 353-357, 2008.
- [2] Briot, S., Bonev, I. A., "Are paralel robots more accurate than serial robots?". CSME Transactions, 31(4), s.445-456, 2007.
- [3] Dede, M. İ. C., Gezgin, E., Kiper, G., Mastar, E., Sığırtmaç, T., Uzunoğlu, E., "Design and analysis of a paralel mechanism for kinematically redundant hybrid planar laser cutting machine". 16th International Conference on Machine Design and Production Conference Proceedings. Editörler: Akkök, M., Erden, A., Kılıç, S. E., Konukseven, E. İ. Cilt 2. Ankara: METU, 2014.
- [4] Kiper, G., Dede, M. İ. C., Uzunoğlu, E., Mastar, E., "Use of hidden robot concept for calibration of an over-constrained mechanism". 14th World Congress in Mechanism and Machine Science, Taipei, Tayvan, bildiri no: OS13-095, 2015.
- [5] Romdhane, L., affi, Z., Fayet, M. 2002. "Design and singularity analysis of a 3-translational-dof m-paralel manipulator", Journal of Mechanical Design, 124, 419-426.
- [6] Pashkevicha, A., Chablat, D., Wenger, P., "Stiffness analysis of overconstrained paralel manipulators", Mechanism and Machine Theory, 44(5), s. 966-982, 2009.
- [7] Harib, K. H., Moustafa, K. A. F., Sharif Ullah, A. M. M. , "Paralel, serial and hybrid machine tools and robotics structures: comparative study on optimum kinematic designs". Serial And Paralel Kinematics, Dynamics, Control And Optimization Robot Manipulators. Editör: Küçük, S. Rijeka: InTech, 2012.
- [8] Giberti, H., Cinquemani, S., Ambrosetti, S., "A geometrical index to evaluate the kinematical properties of a 2 dof paralel kinematic manipulator". 4. International Multi Conference on Engineering and Technological Innovation, Orlando, FL, ABD, s. 1-6, 2011.

- [9] Alıcı, G., Shirinzadeh, B., “Constrained structural optimisation of a revolute-jointed planar parallel manipulator”. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Kobe, Japonya, s. 1244-1249, 2003.
- [10] Klimchik A., “Enhanced stiffness modeling of serial and parallel manipulators for robotic based processing of high performance materials”. Doktora Tezi, Ecole Centrale de Nantes, Fransa, 2011.
- [11] Roth, Z., Mooring, B., Ravani, B., “An overview of robot calibration”. IEEE Journal of Robotics and Automation, 3(5), s. 377-385, 1987.
- [12] Bennett, D.J., Hollerbach, J.M., Geiger, D., “Autonomous robot calibration for hand-eye coordination”. International Journal of Robotics Research, 10, s. 550-559, 1991.
- [13] Khalil, W., Dombre, E., “Geometric calibration of robots, Modeling”. Identification and Control of Robots, 257-289, 2004.
- [14] Dolinsky, J.U., Jenkinson, I.D., Colquhoun, G.J., “Application of genetic programming to the calibration of industrial robots”. Computers in Industry, 58 (3), s. 255-264, 2007.
- [15] Elatta, A.Y., Li, P. G., Fan, L. Z., Yu, D., ve Luo, F., “An Overview of Robot Calibration”. Information Technology Journal, 3 (1), s. 74-78, 2004.
- [16] Merlet, J. P. 2006. Parallel Robots (2. Basım). Dordrecht: Springer.
- [17] Briot, S., Martinet, P. “Minimal representation for the control of Gough-Stewart platforms via leg observation considering a hidden robot model”. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Almanya, 4653-4658, 2013.
- [18] Meggiolaro, M. A., Dubowsky, S., Mavroidis, C., “Geometric and elastic error calibration of a high accuracy patient positioning system”. Mechanism and Machine Theory, 40, s. 415-427, 2005.
- [19] Daney, D., Andreff, N., Chabert, G., Papegay, Y. “Interval method for calibration of parallel robots: Vision-based experiments”. Mechanism and Machine Theory, 41(8), s. 929-944, 2006.
- [20] Watanabe, A., Sakakibara, S., Ban, K., Yamada, M., Shen, G., Arai, T., “A Kinematic Calibration Method for Industrial Robots Using Autonomous Visual Measurement”. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 55 (1), s. 1-6, 2006.
- [21] Cheboxarov, V. V., Filaretov, V. F., Vukobratoviimage, M., “Raising the stiffness of manipulators with lightweight links”. Mechanism and Machine Theory, 35 (1), s. 1-13, 2000.
- [22] Bera, T.C., Desai, K.A., Rao, P.V.M., “Error compensation in flexible end milling of tubular geometries”. Journal of Materials Processing Technology, 211 (1), s. 24-34, 2011.
- [23] Li, Y. W., Wang, J. S., Wang, L. P., “Stiffness analysis of a Stewart platform-based parallel kinematic machine”. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'02), 4, s. 3672-3677, 2002.
- [24] Deblaise, D., Hernot, X., Maurine, P., “A systematic analytical method for PKM stiffness matrix calculation”. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation 2006 (ICRA 2006), s. 4213-4219, 2006.
- [25] Majou, F., Gosselin, C., Wenger, P., Chablat, D., “Parametric stiffness analysis of the Orthoglide”. Mechanism and Machine Theory, 42(3), s. 296-311, 2007.
- [26] Ceccarelli, M., Carbone, G., “A stiffness analysis for CaPaMan (Cassino parallel manipulator)”. Mechanism and Machine Theory, 37(5), s. 427-439, 2002.
- [27] Van der Wijk, V., Herder, J. L., “Guidelines for low mass and low inertia dynamic balancing of mechanisms and robotics”. Advances in Robotics Research: Theory, Implementation, Application, 2009.
- [28] Berkof, R. S., Lowen, G. G., “A new method for completely force balancing simple linkages”. Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry, 91, s. 21-26. 1969.
- [29] Van der Wijk, V., Herder, J. L., “Synthesis method for linkages with center of mass at invariant link point - pantograph based mechanisms”. Mechanism and Machine Theory, 48, s. 15-28, 2011.
- [30] Van der Wijk, V., Herder, J. L., “Comparison of various dynamic balancing principles regarding additional mass and additional inertia”. Journal of Mechanisms and Robotics, 1(4), 2009.
- [31] Van der Wijk, V., Herder, J. L., “Active dynamic balancing unit for controlled shaking force and shaking moment balancing”. ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Montreal, Quebec, Kanada, DETC2010 28423, 2010.
- [32] Queiroz, M. S. de, Dawson, D. M., Nagarkatti, S. P., Zhang, F., “Lyapunov-Based Control of Mechanical Systems”, Birkhäuser, 2000.
- [33] Haddad, W. M., Chellaboina, V. S., “Nonlinear Dynamical Systems And Control: A Lyapunov-Based Approach”, Princeton University Press, 2008.
- [34] Klimchik, A., Bondarenko, D., Pashkevich, A., Briot, S., Furet, B. 2014. “Compliance error compensation in robotic-based milling”. Informatics in Control, Automation and Robotics, Springer.