



ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

Hasan DEMİRTAŞ^{1,*} 

¹ Samsun Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55420, Samsun, Türkiye

ÖZET

Robotik işleme yönteminde kullanılan robotlar hareket tiplerine göre seri ve paralel kinematik tip olmak üzere iki başlıkta incelenebilir. Bu çalışmada robotik işleme yönteminin geliştirilerek verimliliğinin artırılması için literatürde yapılmış olan çalışmalar özetlenmiştir. Paralel kinematik robotlarda düşük çalışma alanına sahip olmasından dolayı işlemin yerinde yapılması ve konumlandırma (kalibrasyonun) hassas bir şekilde için geliştirilen bazı yöntemler bu derlemede sunulmuştur. Seri kinematik robotlarda ise düşük dayanımlarından dolayı tırlama problemi ön plana çıkmakta olup tırlamanın engellenmesi üzerine yapılan çalışmalar yine bu derlemede sunulmaktadır. Robotik işleme uygulamalarında seri kinematik robotların inceleme sahasının paralel kinematik robotlara göre daha geniş olduğu gözlemlenmiştir. Hexapod tip robotların paralel kinematik robotlar içinde en çok kullanılan robot tipi olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte tırlamaların önlenmesi için temassız işleme yöntemlerinin robot kollara adaptasyonu son yıllarda uygulanmaya başlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Robotik işleme, Tırlama, Dayanım, Kalibrasyon, Çalışma alanı

A REVIEW ON ROBOTIC MACHINING

ABSTRACT

Robots used in robotic machining can be classified in two main titles as serial and parallel kinetic types due to the movement method. This study summarizes the works related to improve the productivity of the robotic machining. Due to the limited working space in parallel kinematic robots, the developed methods for performing in situ operation and precise positioning (calibration) are presented in this review. Chattering due to low stiffness of the serial kinematic robots is the most encountered problem therefore this study also presents the works related to prevent this problem. In robotic machining applications, it has been observed that the field of study of serial kinematic robots is wider than the parallel kinematic robots. Hexapods are the most used robot type in the parallel kinematic robots. In addition, the adaptation of non-contact machining methods to robots has been introduced in recent years to prevent the chatter.

Keywords: Robotic machining, Chatter, Stiffness, Calibration, Working space

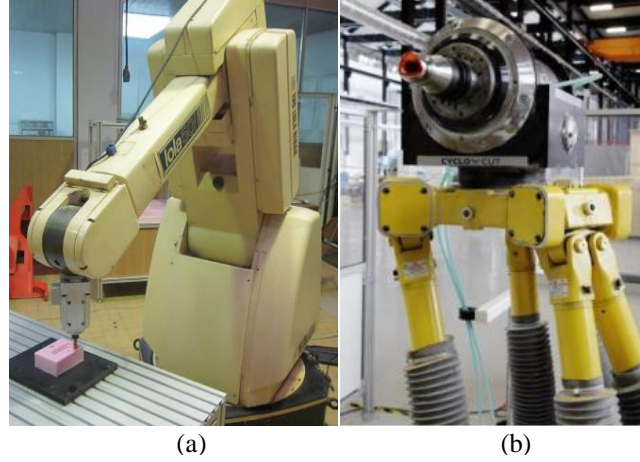
1. GİRİŞ

Üretimin önemli bir kısmını oluşturan talaşlı imalat sektörü günümüzde ekonomi için önemli bir yer tutmaktadır. Bu sektörde en çok kullanılan yöntem ise computer numerical control (CNC) adı ile anılan bilgisayar destekli, sayısal veriler yardımı ile kesici ucun kontrol edildiği sistemlerdir. Yıllar ilerledikçe geliştirilen bu sistemler yüksek dayanım ve hassasiyete sahipken yüksek ağırlıklara, yüksek maliyetleri ve düşük esnekliklere sahiptirler. Robotlar ise (seri ve paralel kinematik) yüksek hareket kabiliyeti, esneklik ve yazılımsal gelişime açık olmalarından dolayı dünya çapında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Uluslararası robotik federasyonunun 2018 yılı raporuna göre 2017 yılında dünya genelinde yapılan robot satışı 2016 yılına göre yaklaşık %30 artış göstermiştir. Aynı raporda Türkiye’de robot kullanımının önemli oranda artış gösterdiğine dikkat çekilmiştir [1]. Özellikle otomotiv sektöründe, kaynaklama, montaj ve boyama işlemlerinde kullanılan robotlar, son otuz yıldır talaşlı imalat sektöründe kesici takıma yön veren eleman olarak kullanılmaktadır. Robotik İşleme (Rİ) adı verilen bu yöntemde fener mili (Spindle) robot kol (seri kinematik) uç işlevcisine veya hexapod robot (paralel kinematik) üst kısmına yerleştirilerek malzemenin işlenmesi gerçekleştirilmektedir. Şekil 1’de hexapod ve robot kol ile Rİ uygulamaları gösterilmiştir. Fakat kullanılan robotun işleme bölgesinde oluşan kuvvetlere karşı düşük dayanımı (stiffness) ve alışılmış CNC tezgâhlarına göre daha karmaşık hareket yapılarına sahip olması bu yöntemin kısıtlarındandır [2, 3].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hasan.demirtas@samsun.edu.tr

Geliş / Received: 02.08.2019 Kabul / Accepted: 29.03.2020 doi: 10.28948/ngumuh.600588

H. Demirtaş



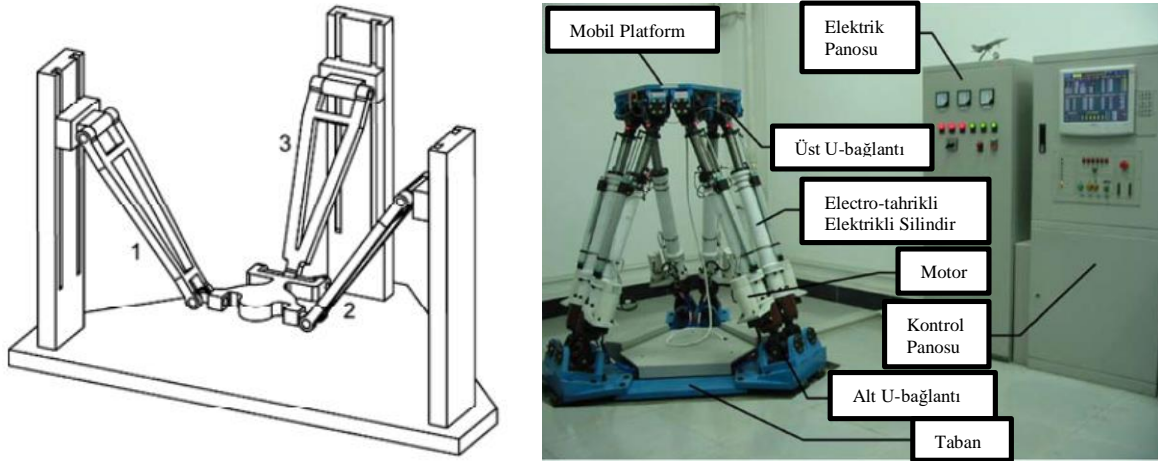
Şekil 1. Rİ yöntemi için (a) robot kol ve (b) hexapod robot kullanımı [1]

Ji ve Wang [5] yaptıkları derleme çalışmasında robotik kollar üzerine yapılan çalışmaları ülke bazında sıralamış, Almanya, Çin ve Fransa gibi ülkelerden araştırmacıların bu konuda öncülük ettiği belirtilmiş, aynı çalışma incelendiğinde Türkiye’de bu konuda (seri kinematik robotlar için) herhangi bir çalışma bulunmadığı gözlenmektedir. Türkiye’de Hexapod uygulanarak yapılan Rİ yöntemini inceleyen araştırmacı sayısı ise çok azdır. Bu çalışmada ise; Rİ yönteminde hassasiyetin ve üretim verimliliğinin artırılması için yapılan çalışmalar irdelenmiştir.

2. ROBOTİK İŞLEME

2.1. Paralel Kinematik Robotik İşleme

Paralel kinematik robot (PKR) sistemlerinde gövdenin hareketi birbirine paralel olarak tabana yerleştirilmiş en az iki bağımsız kinematik bağ sayesinde gerçekleştirilir. PKR her kol kendi üzerine düşen yükü kaldırmakta böylece bu sistemler ağır yükler taşıyabilmektedir. Ancak düşük hareket alanı, karmaşık mekanik tasarım, kinematik denklem hesaplamaları ve kontrol algoritmaları PKR olumsuzluklarından öne çıkanlardır [2]. Şekil 2’de farklı kinematik bağ sayılarına sahip PKR gösterilmiştir.

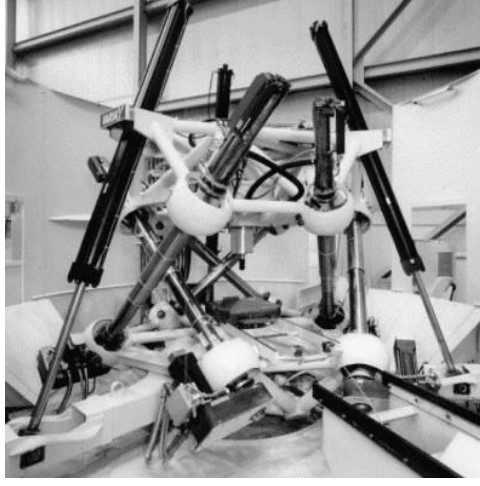


Şekil 2. Üç ve altı bağ yapısına sahip PKR örnekleri [3], [4]

Gelbart vd. [5] yaptıkları çalışmada 3 ve 5 eksenli CNC tezgahları ile bir paralel kinematik işleme tezgahı (PKİT) tipi olan Giddings ve Lewis Variax işleme merkezinin performanslarını bir ISO test parçası üzerinde yaptıkları deneyler ile karşılaştırmışlardır. Yüksek dayanıma sahip Variax işleme merkezinin sert malzemeler için diğer tezgahlara göre kullanılabilirliğinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Aynı çalışmada Variax işleme merkezinde hareket yörüngesinin

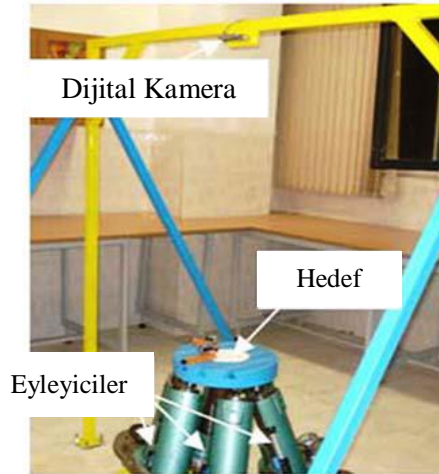
ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

karmaşık matematik modellemelere bağlı olduğu ve bu yüzden düz bir doğrultuda yapılan işlemin hassas bir şekilde gerçekleştirilemediği belirtilmiştir.



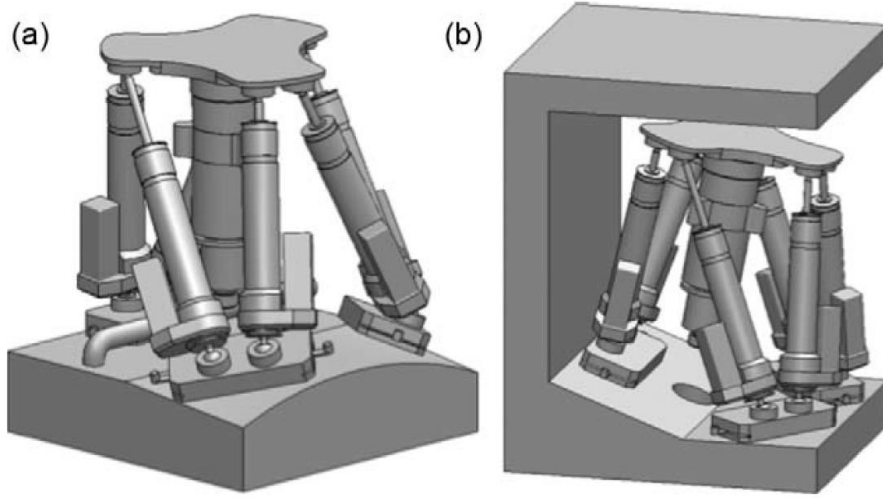
Şekil 3. Giddings ve Lewis Variax işleme merkezi [5]

Fu vd. [6] yaptıkları çalışmada PKR için yapı dikkate alındığında oluşan hataları üç başlık altında incelemişlerdir. Bunlar; i) Geometrik/kinematik hatalar, ii) Sıcaklığa bağlı hatalar, iii) Yerçekimine bağlı hatalar şeklinde sınıflandırılmıştır. PKR kollarındaki vidalı millerdeki ısınmanın, ısıl hatanın temel kaynağı olduğu belirtilmiş [7] ve sıcaklık değişiminin önüne geçilmeye çalışılmıştır [8]–[11]. Karmaşık geometriye sahip PKR için geometrik ve yerçekimi kaynaklı hatalar ise kalibrasyon ve kinematik modellemeler yapılarak engellenmeye çalışılmıştır. Song vd. [12] yaptıkları teorik çalışmada minimum kolineer dayanım katsayısı adında yeni bir boyutsuz mühendislik katsayısı geliştirmişler ve bir simülasyon programında seri, paralel ve tümleşik (hybrid) kinematik işleme sistemlerinde kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Agheli ve Nategh [13] yaptıkları çalışmada PKR için gerekli kalibrasyonlama işlemleri için bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritmanın geliştirilmesi için tersine kinematik hata modeli uygulanmıştır. Fakat bu algoritmanın doğrulama işlemi gerçek çalışma ortamında değil simülasyon ortamında yapılmıştır. PKR kalibrasyonu için yapılan bir diğer çalışmada ise [14] tersine ve ileri kinematik modelleri uygulanarak bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma ile HRİT simülasyonu yapılmış ve gürültü genişletme kriteri (Noise amplification criterion) yardımıyla yapılandırma şekilleri belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarından elde edilen verilere göre algoritmanın doğrulanması için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda HR üzerinde tanımlanmış dört noktanın konumundaki boyutsal hatalar, robottan belirli bir yükseklikte olan bir kamera yardımıyla görüntü işleme yöntemi uygulanarak ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kalibrasyon işlemi sonunda hata oranının 0.1 mm altına indirilebildiği belirtilmiştir. Ayrıca PKİT hassas bir şekilde kalibrasyonun yapılabilmesi için lazer kontrolü [15], [16] ve genetik algoritma [17] gibi farklı yöntemler de geliştirilmiştir.



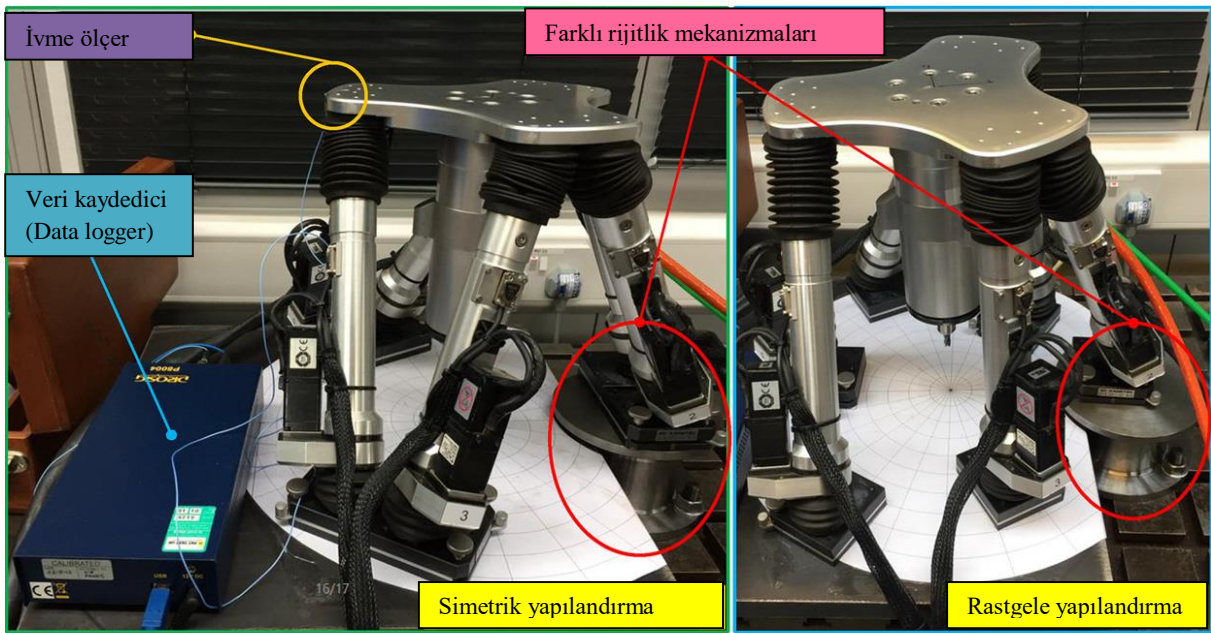
Şekil 4. Ölçüm için geliştirilmiş deney düzeneği [14]

Axinte vd. yaptıkları çalışmada [18] büyük iş parçalarının yerinde işlenmesi için FreeHex isiminde küçük boyutlarda bir PKR tasarlamışlardır. Geliştirilen bu sistem ile robotun bacakları birbirine bağlantılı olacak şekilde sadece düz bir yüzeye değil, birbirlerinden bağımsız şekilde kavisli ve eğimli yüzeylere de konumlandırılabilir. Robotun kalibrasyonu ise robot ayaklarında bulunan referans noktalarına göre belirlenmektedir. Geliştirilen robotun kavisli ve eğimli yüzeylerde konumlama örnekleri Şekil 5’ de gösterilmiştir.



Şekil 5. FreeHex robotun (a) kavisli ve (b) eğimli yüzeylere konumlandırılması [18]

Ma vd. yaptıkları çalışmada [19] FreeHex robotun farklı rijitliklere sahip yüzeylere sabitlenmesi sonrasında oluşabilecek titreşimlerin tahmini için dinamik model geliştirmişlerdir. Bu modelde her bir bacakta ve üst bölgenin kinematik modelleri oluşturulmuş konum, hız ve ivme değerleri elde edilmiştir. Bu değer daha sonra serbest titreşim modeline uygulanmıştır. Bu denkleme yer alan eylemsizlik momenti ve kütle matrisi kinetik ve potansiyel enerji denklemlerinden elde edilmiştir. Geliştirilen model önce deneysel daha sonra simülasyon ile elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken robot Şekil 6’da görüldüğü gibi iki farklı yapılandırma yöntemi dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlarda geliştirilen modelin yüksek tutarlılık ile titreşim frekanslarını tahmin edebildiği belirtilmiştir.

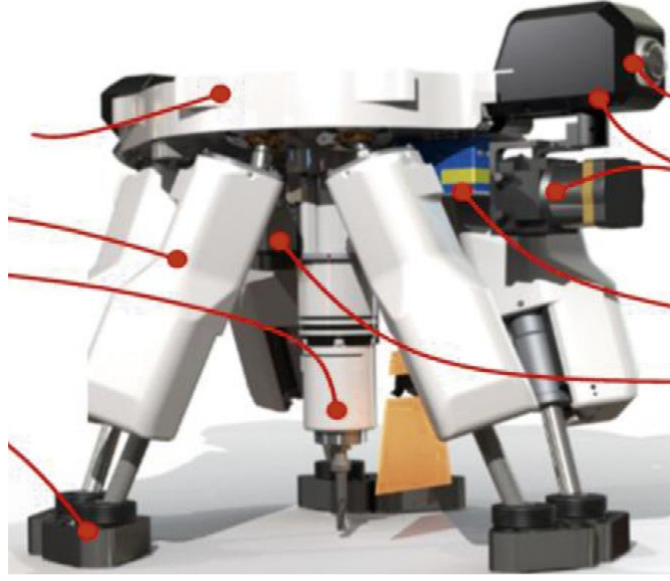


Şekil 6. FreeHex robot için farklı bacak yapılandırmaları [19].

ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

PKR düşük çalışma alanlarını arttırmak ve insanların müdahale edemeyeceği bölgelerde kullanılabilmesi için yürüme kabiliyeti olan bir robot Olarra vd. [20] tarafından tasarlanmıştır. Bu robot yönünü üzerinde bulunan kamera ve lazer sensörü yardımı ile yaparken, kalibrasyonunu ise bacaklarda bulunan 3 kamera yardımıyla, ayaklardaki referans noktalarına göre kendi kendine yapabilmektedir [21]. Robot yürüme hareketini eyleyiciler yardımı ile çelik kabloları çekerek yapmakta işleme bölgesine ulaştığında ise ayaklarda bulunan mıknatıslar yardımı ile konumunu sabitleyebilmektedir. Sabitlenme işlemi tamamlandıktan sonra G-kodları kullanılarak robot gövdesindeki fener mili ile iş parçası yüzeyi işlenebilmektedir. WalkingHex adlı bu robotun fotoğrafı

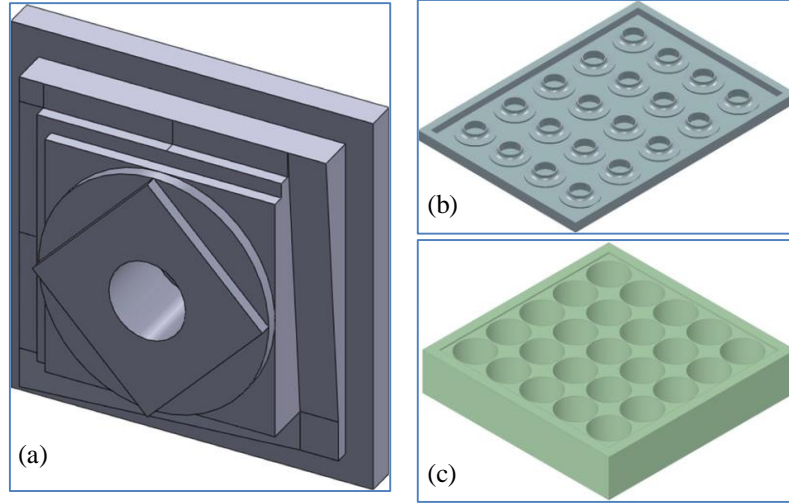
Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. WalkingHex robotu prototipi [20].

Ayrıca paslanmaz çelikten yapılmış bir termonükleer kabini hassas bir şekilde tamiri (kaynak ve işlenebilmesi) için Wu vd. [22] bir 5 eksenli PKR geliştirmişlerdir. Bu robotta bacakların hareketini su basıncı yardımı ile pistonlardan almaktadır. Robotun pozisyonlama sırasında konumlanması tüm pistonlar için ± 0.01 mm altında gerçekleştirilmiştir. Robotun yüksek hassasiyeti hız, basınç gibi geri beslemeler kullanılarak yapılmıştır. Pessi vd. [23] ise bu PKR için vakum kabini içindeki taşıyıcı gövdeyi sonlu elemanlar yöntemini kullanarak uç işlevcisine 0-2000N arasında kuvvetler uygulamışlar ve robotun 0.09-0.12 mm arasında yer değiştirme yaptığını gözlemlemişlerdir. İşlem sırasında taşıyıcı ve piston uzunluklarının tespiti için tersine kinematik yöntemi uygulanmıştır.

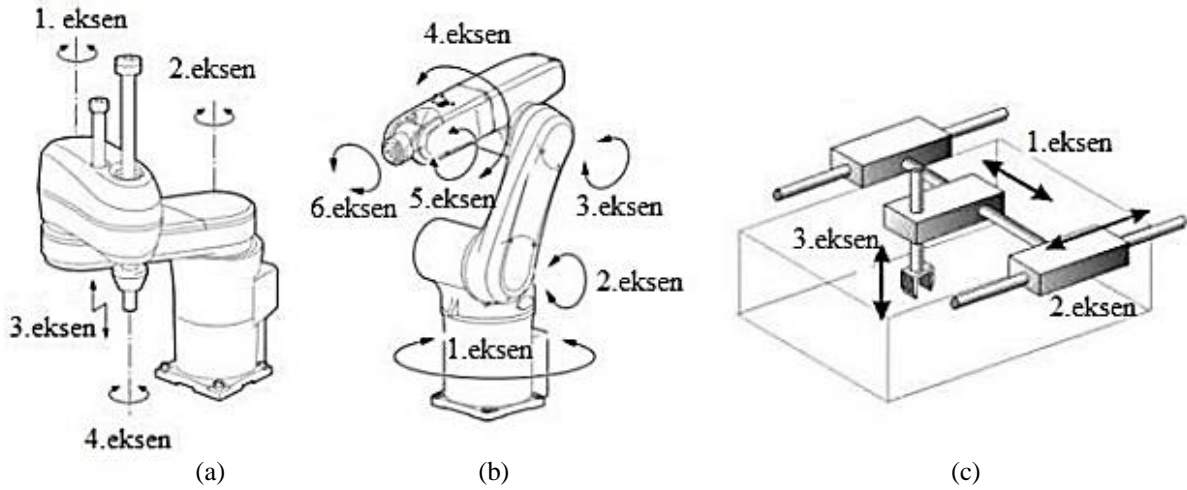
PKR ile işlem sonucunda elde edilen hassasiyetlerin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde; radyal kesme derinliğinin takım çapının %50 altında olduğunda çapraz transfer fonksiyonunun tezgahın kararlılığının tahmininde öneminin arttığı tespit edilmiştir [24]. Ayrıca aynı çalışmada kararlılık diyagramları kullanılarak fener milinin hızı tespit edilebilmiş ve kararlı kesme derinliği ile birlikte üretim verimliliğinin artırılabilirdiği belirlenmiştir. 7075 tipte alüminyum için yapılan cep açma (pocket) işlemlerinde optimum takım ilerleme yönü (feed direction) ve takım ilerleme şablonu (tool pattern) seçerek PKR kararlılığının önemli derecede artırılabilirdiği gözlemlenmiştir [25]. Barnfather vd. [26] ise bir hexapod robotun üç farklı master kalıp kullanarak elde edebileceği tolerans değerlerini tespit etmişlerdir. Deneylerde takım tezgahı test mastarı, silindirik cep açma ve nozzle test mastarları kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda hata miktarının 400 μ m üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan master kalıpları Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Master kalıpları (a) takım tezgah (b) nozzle ve (c) silindirik cep açma [26].

3.2. Seri Kinematik Paralel Robotik İşleme

Seri kinematik robotlarda (SKR) her bir hareketlendiricisi birbiri ardına bağlanan ve her biri bağımsız olarak kontrol edilebilen sistemlerdir. SKR en büyük avantajı çalışma alanlarının PKR göre daha geniş olmasıdır. SKR günümüzde hemen hemen tüm sektörlerde kendilerine yer edinmişlerdir. Günümüzde kullanılan SKR kol-omuz mekanizmasına benzetilerek (Şekil 9 (b)) kinematik modeller basitleştirilmiş böylece görevlerin daha hızlı ve doğru bir şekilde yapılması sağlanmıştır. SKR günümüzde karşılaşılan en büyük dezavantajları; i) düşük dayanıma neden olan her uzuvdaki hareketlendirici ağırlığı ve tasarım problemleri ii) genel mukavemet problemleriyle meydana çıkan hataların sürekli olarak değerlendirilmesi zorunluluğudur [27].



Şekil 9. SKR örnekleri (a) SCARA (b) 6 eksenli robot kol (c) 3 eksenli Kartezyen robot [27].

SKR da düşük dayanımından dolayı işlem sırasında en çok karşılaşılan problem tırlamalardır. Teknolojideki gelişmeler, daha önce geniş toleranslarla çalışılabilirken bu tolerans aralığının giderek kapanmasına doğal olarak üretim sistemlerinden beklentilerin de artmasına neden olmuştur. 2000'li yıllarda, son kırk yıla göre istenilen yüzey kalitesi 10 kat artırılarak $10\ \mu\text{m}$ 'ye kadar düşürülmüştür. Bu artan beklentileri karşılama zorunluluğu da üretim yöntemleri üzerinde farklı araştırmalar yapılmasını zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır [28]. İş parçasının istenilen hassasiyetlerde işlenememesinin nedenlerinden biri de tırlama (chatter) olayıdır. Birbirinden farklı özelliklerde iki cismin (kesici takım ve iş parçası) birbirine teması sonucunda uygun olmayan işlem parametrelerinde (takım işleme hızı, talaş derinliği, takım uzunluğu vs.) titreşimlerin oluşmasına neden olur. Bu tip titreşimlere tırlama (chatter) adı verilmekte olup malzeme, takım ve tezgah üzerinde kalıcı hasarlara neden olabilmektedir [29].

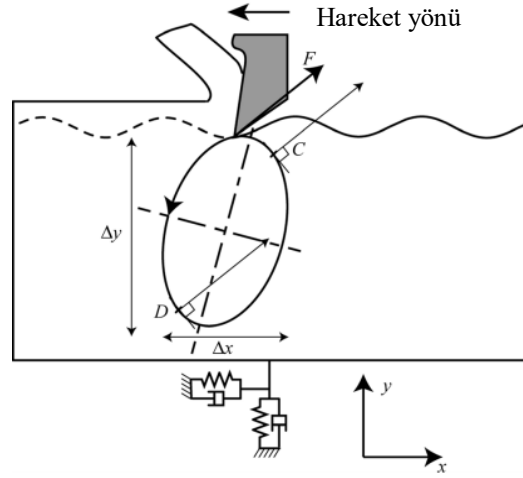
ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

CNC tezgahlarında tırlama olayı iş parçası ve takım arasındaki kuvvet dağılımları sonucunda gerçekleşirken, SKR tırlama bağlantı bölgelerinde oluşmaktadır [30], [31]. Şekil 10'da SKR ile işleme sonrasında tırlamadan dolayı gerçekleşen yüzey üzerindeki hatalar gösterilmiştir.



Şekil 10. Rİ yönteminde tırlamalardan dolayı oluşan yüzey üzerindeki hatalar [32]

SKR en sık karşılaşılan tırlama tipi olan bağlantı bölgelerindeki tırlamalar (Mode Coupling Chatter) ise sistemin serbestlik derecesi doğrultusunda farklı genlikler ve fazlar ile sistemin kütlesindeki titreşimlerin aynı anda oluşması ile gerçekleşir.



Şekil 11. 2 serbestlik derecesi için bağlantı bölgelerinde tırlama oluşumu [33].

Geniş çalışma alanı ve PKR göre daha basit kinematik modellerin uygulanması gibi avantajlarından dolayı SKR sistemlerin Rİ için adapte edilmesi gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Fakat tırlamalara karşı düşük dayanım bu sistemlerin en büyük dezavantajı olarak dikkat çekmektedir. Literatürde kullanılan robotun dayanımını arttırmaya yönelik farklı çalışmalar (matematiksel modeller, takım güzergâhının manipülasyonu, görsel geri beslemeler vb.) bulunmakta ve bu uygulamaların çoğunda işlenmesi nispeten daha kolay olan alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Denkena vd. [34] bir robot kol için yaptıkları topoloji optimizasyonunda kaldıraç kol için ağırlık merkezi ve rulmanlara gelen kuvvet arasındaki mesafeyi azaltmışlar böylece SKR dayanımını %25 arttırmışlardır. Kaldestad vd. [35] frezeleme işleme sırasında robot kol üzerine gelen elastik deformasyonun yük altında iken tahmin, analiz ve engellenmesi üzerine bir model geliştirmişlerdir. Bununla birlikte kuvvet sensörleri kullanılarak SKR performansının artırılabilirdiği gözlemlenmiş [36]–[38] ve delik delme taşlama ve çapak alma gibi farklı işlemlerde uygulanmıştır [35]. Brunete vd. [39] geliştirdikleri bir SKR için süper alaşımlardan biri olan Inconel malzeme üzerine delikler delmişlerdir. Kuvvet ve tork verilerine bağlı geliştirilmiş algoritmalar [40], [41] kullanarak delik delme sırasında tırlamalardan dolayı oluşan ovalleşme problemini önemli ölçüde azaltmışlardır. Terrier vd. [42] SKR ve PKR ile serbest formlu yüzeylerin frezeleme yöntemi ile işlenmesini incelemişlerdir. İşlem hassasiyetinin artırılması için takımın planlanan takım yolundan normal doğrultuda ne kadar uzakta (contour error) hareket ettiğini tespit etmek için konum algılayıcıları ile NC

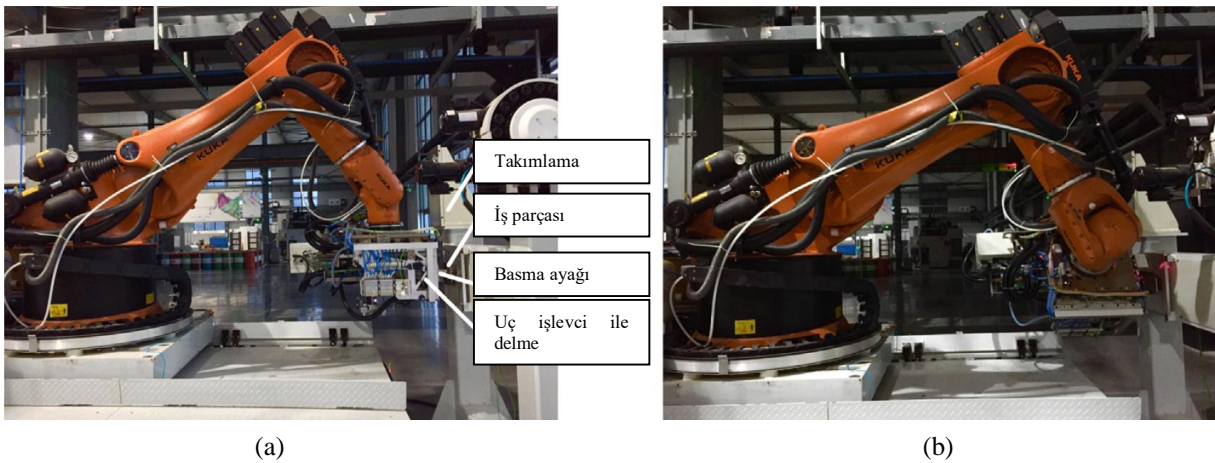
H. Demirtaş

kodlamalarını karşılaştırmışlardır. Sörnmo vd. [43] yaptıkları çalışmada iş parçasının hareketini bir robotik kol yardımı ile fener milinin hareketini ise mikro uyarıcılar (micro manipulator) yardımı ile gerçekleştirmiştir. Mikro uyarıcılar robot kol hareketini görsel sistemler ve motorlardaki frekans değişimine göre gerçekleştirerek işlem sırasında robot kolun konumlanma hatalarının önüne geçilmesi hedeflenmiş fakat frekans değişiminin anlık olduğu durumlarda mikro uyarıcılar devreye girememiş ve yüzeyde hata oluşumu engellenememiştir. Yapılan bir diğer çalışmada [44] SKR hareket hatalarının tahmini için çevrimiçi (online) bir model geliştirilmiştir. Bu model işlem sırasında fener miline gelen kuvvet ve robot kinematikleri dikkate alınarak geliştirilmiş olup alüminyum blok için yüzey hata miktarı önemli ölçüde azaltılmıştır.



Şekil 12. Kuvvet kontrollü SKR uygulaması [44]

Schindlbeck vd. [45] yaptıkları çalışmada kameralardan elde edilen görsel verileri geri besleme olarak kullanan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde interferometre, mikro pozisyonlama ünitesi, kameralar ve piezoelektrik tipte mikro hareketlendiriciler (micro actuators) kullanılarak soğutma sıvısı kullanılmadan alüminyum malzeme üzerinde frezeleme işlemi yapılmıştır. Fakat daha sert malzemelerde takım ve iş parçasının zarar görmemesi için kullanılacak soğutma sıvıları kameraların çalışma veriminin azaltacak ve bu ise yöntemin uygulanabilirliğini olumsuz yönde etkileyecektir. Bu vd. [46] is delik delme işlemi sırasında etki eden baskı ve toplam kesme kuvvetini dikkate alarak robot kolun dayanımı üzerine modelleme geliştirmişlerdir. Ayrıca robotun kuvvete dayanımının robot pozisyonu (robot posture) ile doğrudan ilgili olduğunu göstermişlerdir. Chen vd. [47] geliştirdikleri bir performans indeksini iki farklı robot başlangıç pozisyonu ve farklı takım ilerleme doğrultularındaki (feed orientation) kullanılabilirliğini incelemişler ve artan performans indeksleri ile işleme hata miktarlarının düştüğü belirtilmiştir.

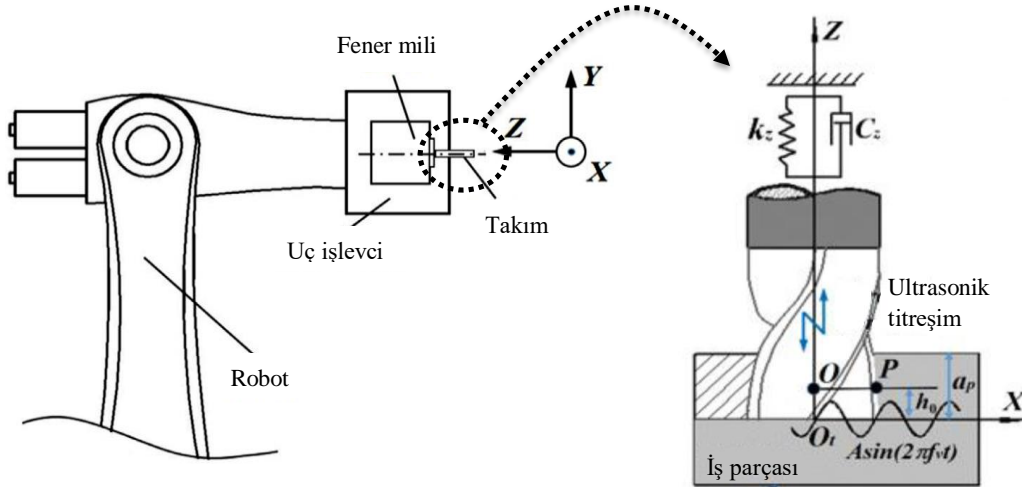


Şekil 13. Robotun delik delme pozisyonları (a) ilk pozisyonu ve (b) optimize edilmiş pozisyonu [46].

Robotun Inconel 718 alaşımını tutarak taşlandığı bir çalışmada [48] işlem sırasında oluşan ses sinyalleri yardımı ile aşındırıcıya hareketi veren kayışın aşınmasını tespit etmeyi hedeflemişlerdir. Bir diğer çalışmada ise geliştirilen bir dinamik model yardımı ile tahmini kararlılık diyagramları oluşturulmuştur [49]. Böylece SKR için yüksek kesme hızlarında alüminyum, düşük kesme hızlarında ise titanyum alaşımlarındaki tırlama oluşumunu tespit etmeye çalışmışlardır. Fakat geliştirilen modeli

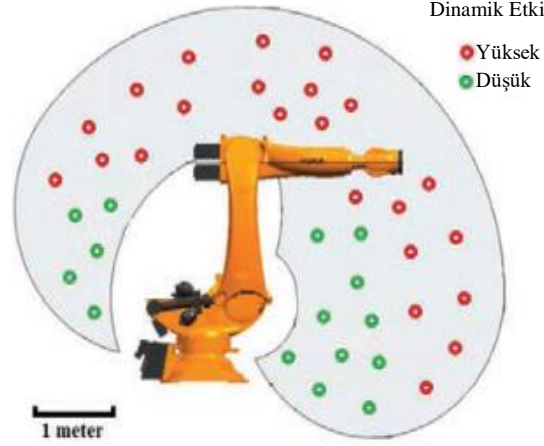
ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

titanyum alaşımlarında verimli bir şekilde uygulanamadığı gözlemlenmiştir. Bir diğer çalışmada ise yarı aktif manyetoreolojik bir elastomer sönümleyici tasarlanmış ve robotik işleme sırasında oluşan tırlama miktarı azaltılmıştır [50]. Fakat yapılan çalışmalar belirli frekans aralıklarında yapılmış olup, kullanım alanının sınırlı olduğu düşünülmektedir. Sun vd. [51] yaptıkları çalışmada ise robotik ultrasonik frezeleme yöntemi için takımın ultrasonik titreşim yaptığı doğrultudaki hareketi dikkate alarak bir model geliştirmişlerdir. Bu model yardımı ile oluşturulan kararlılık diyagramlarında tırlama oluşumunu büyük oranda tahmin edebilmişler ayrıca sistemin kararlılığının önemli oranda artırıldığını tespit etmişlerdir.



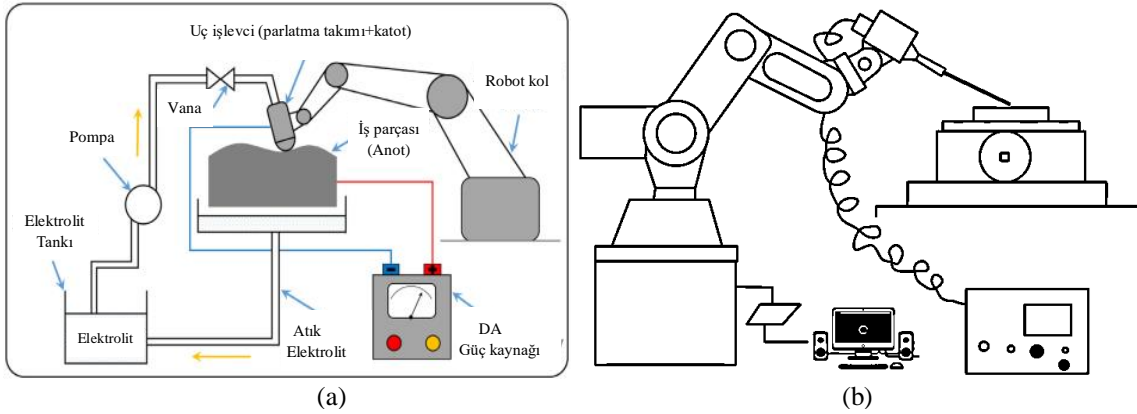
Şekil 14. Robotik ultrasonik frezeleme [51].

Liu ve He yaptıkları çalışmada [52] olasılıksal yöntem modelini uygulayarak tırlamaların tahmini üzerine çalışmışlardır. Sistemde oluşan tırlamaların kesme kuvveti ile diğer parametrelere göre daha çok ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Diğer bir çalışmada fener mili hızı, kesme derinliği, kesme hızı, takım boyu, yukarı-aşağı frezeleme ve iş parçası malzemesi gibi parametrelerin bağlantı bölgeleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [53]. Bu çalışmada ise fener mili hızı ve takım boyunun diğer değişkenlerden daha etkili olduğu belirtilmiştir. Mohammadi ve Ahmadi [54] yaptıkları çalışmada takım ucunda oluşan tekrarlanabilir kuvvetleri doğrusal olmadığını kabul ederek sıfır üstel tahmini (zero order approximation) yöntemini uygulayarak tahmini kararlılık diyagramlarını oluşturmuşlardır. Oluşturulan diyagramlar ile alüminyumun işlenebilmesi üzerine çalışmışlar ve yüksek fener mili hızlarında tutarlılığın %10 kadar artırılabilirdiği belirtilmiştir. Cen ve Melkote [55] yaptıkları çalışmada tırlama oluşumunda önemli bir rolü olan takıma gelen kuvvetleri sonlu elemanlar yöntemi uygulayarak modellemişler ve robot dayanımı üzerindeki etkilerini tanımlamak için konservatif eşleşim dönüşümü (conservative congruence transformation (CCT)) yöntemini uygulamışlardır. Modelin uygunluğunun tespiti için robot dört farklı konumda farklı takım ilerleme hızları ve kesme derinliklerinde 12 farklı test koşuluna tabii tutulmuştur. Her test koşulunda CCT ile yapılan öteleme işleminin deneysel ve geliştirilen model ile elde edilen kuvvetler ile arasındaki farkı azalttığını dolayısıyla modelin kullanılabilirliğini arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca her deney şartı için dinamik etkinin robot pozisyonu üzerindeki etkilerini simüle etmişlerdir. Bir test koşulu için oluşturulmuş dinamik etki büyüklükleri Şekil 15'te gösterilmiştir. CCT yönteminin uygulandığı bir diğer çalışmada [56] kesici takım eksen doğrultusunda gelen kuvvet dikkate alınarak yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir böylece takım doğrultusu ve iş parçasının yönlendirilmesine gerek kalmadan tırlamayı önemli ölçüde azalttıklarını belirtmişlerdir.



Şekil 15. CCT yöntemi uygulanarak bir deney koşulu için elde edilen dinamik etki büyüklükleri [55].

SKR için literatür incelediğinde çalışmaların çoğu Inconel 718, Ti6Al4V gibi süper alaşımlar ile karşılaştırıldığında nispeten CNC tezgahlarında işlenmesi daha kolay olan alüminyumun hassas bir şekilde işlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların genel amacı malzemenin işlenmesi sırasında fener miline gelen kuvvetler sonucunda robotun işleme yörüngesinden uzaklaşmasını önlemektir. Bu kapsamda; robot kolün yukarıdaki avantajlarından faydalanabilmek için işleme sırasında kuvvetlerin en aza indirgenmesi veya ortadan kaldırılması ile gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Literatür incelendiğinde ise temassız işleme tiplerinden elektroerozyon işleme (EDM) ve elektrokimyasal işleme (EKİ) yöntemlerinin, robotik kol ile birleştirilmiş çalışma sayısı ise çok azdır. Tespit edilen çalışmalar ise belirtilen işleme yöntemleri kullanarak yüzey parlatma performanslarının incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır [57], [58]. Şekil 16' da EKİ ve EDM uygulanarak yapılan parlatma işleminin şematikleri gösterilmiştir.



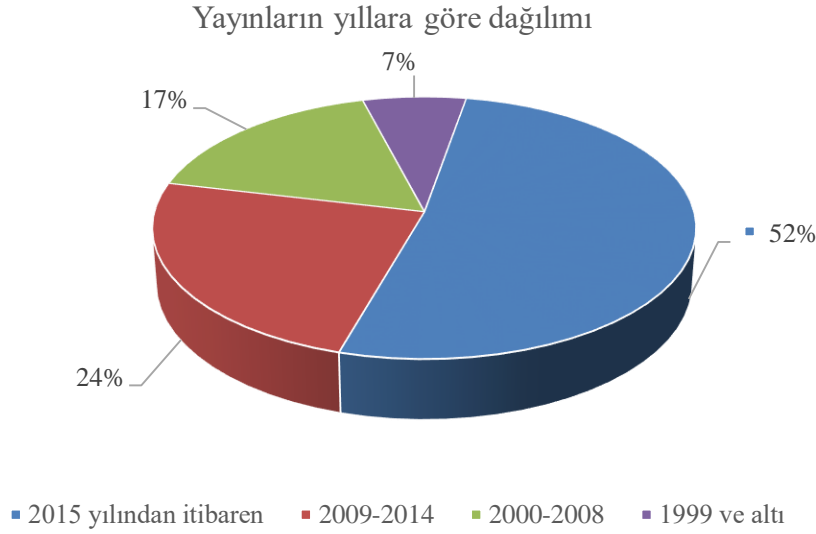
Şekil 16. Robot kol kullanılarak geliştirilen (a) EKİ [57] ve (b) EDM tezgahları [58].

3. SONUÇLAR

Günümüz endüstrisindeki hızlı gelişmeler ile birlikte üstün özellikli takım tezgahlarına olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda robotların kullanıldığı RİT üzerine son otuz yıldır yoğun bir biçimde çalışılmaktadır. Bu çalışmada RİT kinematik model tipine göre iki başlık altında incelenmiştir. Yüksek dayanıma sahip PKR sistemler için pozisyonlama (kalibrasyon) ve düşük çalışma alanı, SKR sistemlerinde ise düşük dayanım ve buna bağlı tırlamaların önlenmesi için yapılan bazı çalışmalar bu derlemede sunulmuştur. SKR için tırlamaların önlenmesine yönelik çalışmalar dış kaynaklı kontrol sistemlerinin uygulanması (kuvvet sensörleri, lazer takip sistemleri vb.), tasarımsal geliştirmeler ve matematiksel modellemeler şeklinde sınıflandırılabilir. Özellikle işlem bölgesinde oluşan takım hareketi, kesme kuvveti ve robot dinamikleri üzerinde bazı kabuller yapılarak sistemin kararlılık tahmin diyagramları oluşturulmuştur. Böylece işlem sırasında tırlama oluşumunun

ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

engellenebilmesi hedeflenmiştir. Fakat yapılan çalışmaların çoğunun işlenmesi kolay olan alüminyum malzemeler üzerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Yürüyeblen veya taşınabilir (FreeHex, WalkingHex) sistemler tasarlanmış böylece çalışma yerinde işleme yapabilen PKR kullanım alanının artırılabilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca tersine kinematik modeller veya ayaklara yerleştirilen referans noktalarının kameralar yardımı ile de konumlandırma (kalibrasyon) problemlerinin önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Genel olarak incelendiğinde PKR için en çok kullanılan robot tipinin altı bağ yapıllı hexapodlar olduğu gözlemlenmiştir. Fakat Rİ uygulamalarında SKR türünün yüksek hareket kabiliyetleri ve daha basit kinematik modelleme yapısına sahip olmalarından dolayı inceleme sahasının PKR göre daha geniş olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden SKR'ın endüstride günümüz şartlarında kullanımı için daha fazla çalışma yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte tırlamaların önlenmesi için temassız işleme yöntemlerinin (EDM, EKİ gibi) robot kollara adaptasyonu son yıllarda uygulanmaya başlanmış böylece robotlar kullanılarak farklı tümleşik sistemlerin oluşturulabileceği ön görülmektedir. Ayrıca bu derleme çalışması incelendiğinde Rİ için yapılan çalışmaların gün geçtikçe arttığı ve gelişiminin devam ettiği gözlemlenmektedir.



Şekil 17. İncelenmiş olan çalışmaların yıllara göre dağılımı

KAYNAKLAR

- [1] S. Zivanovic, N. Slavkovic, and D. Milutinovic, "An approach for applying STEP-NC in robot machining," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 49, no. July 2016, pp. 361–373, 2018.
- [2] C. Sunguray, S. Urgan, H. Demirtas, and S. Gungor, "Design, Modelling And Simulation Of Position Controlled 6x6 Degree Of Freedom Stewart Platform," *SDÜ Int. Technol. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 49–61, 2014.
- [3] F. Xie, X. Liu, H. Zhang, and J. Wang, "Design and experimental study of the SPKM165, a five-axis serial-parallel kinematic milling machine," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 54, no. 5, pp. 1193–1205, 2011.
- [4] X. D. Ren, Z. R. Feng, and C. P. Su, "A new calibration method for parallel kinematics machine tools using orientation constraint," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, pp. 708–721, 2009.
- [5] M. Geldart, P. Webb, H. Larsson, M. Backstrom, N. Gindy, and K. Rask, "A direct comparison of the machining performance of a variax 5 axis parallel kinetic machining centre with conventional 3 and 5 axis machine tools," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, pp. 1107–1116, 2003.
- [6] R. Fu, Y. Jin, L. Yang, D. Sun, A. Murphy, and C. Higgins, "Review on Structure-Based Errors of Parallel Kinematic Machines in Comparison with Traditional NC Machines," *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 923, pp. 249–256, 2018.
- [7] A. J. Wavering, "Parallel kinematic machine research at NIST: past, present, and future," *Adv. Manuf.*, pp. 17–31, 1999.
- [8] R. Ramesh, M. A. Mannan, and A. N. Poo, "Error compensation in machine tools - a review. Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, pp. 1235–1256, 2000.
- [9] R. G. Landers, B. M., and Y. Koren, "Reconfigurable Machine Tools," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 269–274, 2001.
- [10] Y. Pan and F. Gao, "A new six-parallel-legged walking robot for drilling holes on the fuselage," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 228, no. 4, pp. 753–764, May 2013.

- [11] J. A. Soons, "Error analysis of a hexapod machine tool," *Trans. Eng. Sci.*, vol. 16, pp. 347–358, 1997.
- [12] Y. Shneur and V. T. Portman, "Stiffness of 5-axis machines with serial, parallel, and hybrid kinematics: Evaluation and comparison," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 59, pp. 409–412, 2010.
- [13] M. Agheli and M. Nategh, "Identifying the kinematic parameters of hexapod machine tool," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 392–397, 2009.
- [14] M. J. Nategh and M. M. Agheli, "A total solution to kinematic calibration of hexapod machine tools with a minimum number of measurement configurations and superior accuracies," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, no. 15, pp. 1155–1164, 2009.
- [15] T. Li, F. Li, Y. Jiang, J. Zhang, and H. Wang, "Kinematic calibration of a 3-P(Pa)S parallel-type spindle head considering the thermal error," *Mechatronics*, vol. 43, pp. 86–98, 2017.
- [16] T. Sun, Y. Zhai, Y. Song, and J. Zhang, "Kinematic calibration of a 3-DoF rotational parallel manipulator using laser tracker," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 41, pp. 78–91, 2016.
- [17] C. Fan, G. Zhao, J. Zhao, L. Zhang, and L. Sun, "Calibration of a parallel mechanism in a serial-parallel polishing machine tool based on genetic algorithm," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 81, pp. 27–37, 2015.
- [18] D. A. Axinte, J. M. Allen, R. Anderson, I. Dane, L. Uriarte, and A. Olara, "Free-leg Hexapod: A novel approach of using parallel kinematic platforms for developing miniature machine tools for special purpose operations," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 60, pp. 395–398, 2011.
- [19] N. Ma *et al.*, "Parametric vibration analysis and validation for a novel portable hexapod machine tool attached to surfaces with unequal stiffness," *J. Manuf. Process.*, vol. 47, no. October, pp. 192–201, 2019.
- [20] A. Olarra, D. Axinte, L. Uriarte, and R. Bueno, "Machining with the WalkingHex: A walking parallel kinematic machine tool for in situ operations," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 1, pp. 361–364, 2017.
- [21] A. Olarra, D. Axinte, and G. Kortaberria, "Geometrical calibration and uncertainty estimation methodology for a novel self-propelled miniature robotic machine tool," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 49, no. July 2017, pp. 204–214, 2018.
- [22] H. Wu, H. Handroos, P. Pessi, J. Kilkki, and L. Jones, "Development and control towards a parallel water hydraulic weld/cut robot for machining processes in ITER vacuum vessel," *Fusion Eng. Des.*, vol. 75–79, no. SUPPL., pp. 625–631, 2005.
- [23] P. Pessi, H. Wu, H. Handroos, and L. Jones, "A mobile robot with parallel kinematics to meet the requirements for assembling and machining the ITER vacuum vessel," *Fusion Eng. Des.*, vol. 82, no. 15–24, pp. 2047–2054, 2007.
- [24] L. T. Tunc and J. Shaw, "Investigation of the effects of Stewart platform-type industrial robot on stability of robotic milling," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 87, no. 1–4, pp. 189–199, 2016.
- [25] L. T. Tunc and D. Stoddart, "Tool path pattern and feed direction selection in robotic milling for increased chatter-free material removal rate," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, no. 9–12, pp. 2907–2918, 2017.
- [26] J. D. Barnfather, M. J. Goodfellow, and T. Abram, "Achievable tolerances in robotic feature machining operations using a low-cost hexapod," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 95, no. 1–4, pp. 1421–1436, 2018.
- [27] E. Uguroglu, "6 Serbestlik Dereceli Rotasyonel Stewart Platformu Tasarımı Ve Yüzey Pürüzlülük Ölçümlerinde Eğitim Sensörü İle Konum Kontrolü," İstanbul Technical University, 2015.
- [28] F. Gok, "The Analysis of the Effect of Cutting Tools Material to Chatter Vibrations in Turning Operations," Eskisehir Osmangazi University, 2015.
- [29] S. Neseli and S. Yaldız, "The Effects of Approach Angle and Rake Angle Due to Chatter Vibrations on Surface Roughness in Turning," *J. Polytech.*, vol. 10, no. 4, pp. 383–389, 2007.
- [30] S. A. Tobias and W. Fishwick, "The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions," *Trans. ASME*, vol. 80, pp. 1079–1088, 1958.
- [31] J. Tlustý and M. Poláček, "The stability of machine tools against self excited vibrations in machining," *Int. Res. Prod. Eng., ASME*, pp. 465–474, 1963.
- [32] W. Pan, H. Zhang, Z. Zhu, and J. Wang, "Chatter analysis of robotic machining process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 173, pp. 301–309, 2006.
- [33] S. Seguy, L. Arnaud, and T. Insperger, "Chatter in interrupted turning with geometrical defects: an industrial case study," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 75, no. 1–4, pp. 45–56, 2014.
- [34] B. Denkena, B. Bergmann, and T. Lepper, "Design and optimization of a machining robot," *Procedia Manuf.*, vol. 14, pp. 89–96, 2017.
- [35] K. B. Kaldestad, I. Tyapin, and G. Hovland, "Robotic face milling path correction and vibration reduction," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 2015, pp. 543–548.
- [36] J. Radojčić, D. Surdilović, and G. Schreck, "Modular Hybrid Robots for Safe Human-Robot Interaction," *Int. J. World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 12, pp. 1601–1607, 2009.
- [37] D. Surdilović, R. Bernhardt, and L. Zhang, "New intelligent power-assist systems based on differential transmission," *Robotica*, vol. 21, no. 3, pp. 295–302, Jun. 2003.

ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

- [38] I. Tyapın, G. Hovland, P. Kosonen, and T. Linna, "Identification of a static tool force model for robotic face milling," in *2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, 2014, pp. 1–6.
- [39] A. Brunete *et al.*, "Hard material small-batch industrial machining robot," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 54, no. March 2017, pp. 185–199, 2018.
- [40] M. Vukobratovic, *Dynamics and robust control of robot-environment interaction*, vol. 2. Singapore: World Scientific, 2009.
- [41] J. M. Ahola, J. Koskinen, T. Seppälä, and T. Heikkilä, "Development of Impedance Control for Human/Robot Interactive Handling of Heavy Parts and Loads," in *ASME. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Volume 9: 2015 ASME/IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, 2015.
- [42] M. Terrier, A. Dugas, and J. Y. Hascoët, "Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, pp. 865–877, 2004.
- [43] O. Sornmo, B. Olofsson, U. Schneider, A. Robertsson, and R. Johansson, "Increasing the milling accuracy for industrial robots using a piezo-actuated high-dynamic micro manipulator," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 2012, pp. 104–110.
- [44] Z. P. Z. Pan and H. Z. H. Zhang, "Improving robotic machining accuracy by real-time compensation," in *2009 Iccas-Sice International Joint Conference*, 2009, pp. 4289–4294.
- [45] C. Schindlbeck, A. Janz, C. Pape, and E. Reithmeier, "Increasing milling precision for macro-micro-manipulators with disturbance rejection control via visual feedback," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2017, vol. 2017-Septe, pp. 4686–4693.
- [46] Y. Bu, W. Liao, W. Tian, J. Zhang, and L. Zhang, "Stiffness analysis and optimization in robotic drilling application," *Precis. Eng.*, vol. 49, pp. 388–400, 2017.
- [47] C. Chen *et al.*, "Stiffness performance index based posture and feed orientation optimization in robotic milling process," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 55, pp. 29–40, 2019.
- [48] X. Zhang, H. Chen, J. Xu, X. Song, J. Wang, and X. Chen, "A novel sound-based belt condition monitoring method for robotic grinding using optimally pruned extreme learning machine," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 260, pp. 9–19, 2018.
- [49] M. Cordes, W. Hintze, and Y. Altintas, "Chatter stability in robotic milling," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 55, pp. 11–18, 2019.
- [50] L. Yuan, S. Sun, Z. Pan, D. Ding, O. Gienke, and W. Li, "Mode coupling chatter suppression for robotic machining using semi-active magnetorheological elastomers absorber," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 117, pp. 221–237, 2019.
- [51] L. Sun, K. Zheng, W. Liao, J. Liu, J. Feng, and S. Dong, "Investigation on chatter stability of robotic rotary ultrasonic milling," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 63, p. 101911, 2020.
- [52] Y. Liu and F. He, "Study on the chatter stability of robotic milling based on the probability method," *J. Northeast. Univ.*, vol. 40, pp. 683–687, 2019.
- [53] Y. Liu and F. He, "Research on the influencing factors of robot milling stability," *J. Northeast. Univ.*, vol. 40, pp. 991–996, 2019.
- [54] Y. Mohammadi and K. Ahmadi, "Effect of axial vibrations on regenerative chatter in robotic milling," *Procedia CIRP*, vol. 82, pp. 503–508, 2019.
- [55] L. Cen and S. N. Melkote, "Effect of Robot Dynamics on the Machining Forces in Robotic Milling," in *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 10, pp. 486–496.
- [56] L. Cen and S. N. Melkote, "CCT-based mode coupling chatter avoidance in robotic milling," *J. Manuf. Process.*, vol. 29, pp. 50–61, 2017.
- [57] A. E. K. Mohammad, J. Hong, D. Wang, and Y. Guan, "Synergistic integrated design of an electrochemical mechanical polishing end-effector for robotic polishing applications," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 55, no. July 2018, pp. 65–75, 2019.
- [58] J. M. Zhan, J. Zhao, S. X. Xu, and P. X. Zhu, "Study of the contact force in free-form-surfaces compliant EDM polishing by robot," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 129, pp. 186–189, 2002.

