

Bir Robot Tutucusu Tarafından Yakalanmış Paralel Yüzlü İş Parçalarının Kararlılığı ve Hareketi

Ertuğrul TAÇGIN

Marmara University Engineering Faculty Mechanical Engineering Department, Istanbul-TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 13.07.1994

Özet: İki parmaklı bir robot tutucusu tarafından tutulan paralel yüzlü bir parçanın kararlılığı ve hareketi araştırılmıştır. Gerçek tutucu-parça sistemi, tek serbestlik dereceli mekanizmalar şeklinde modellenerek parçayı temsil eden uzuv üzerine dış kuvvet etki ettirilmiştir, bu durumda cismin davranışları bilgisayar benzetimiyle incelenmiştir. Kinematik parametrelerin tutma kararlılığına olan etkileri göz önüne alınarak, cismin dış kuvvet etkisindeki kayma hareketinin niteliği elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Robot Yakalayıcıları, Mekanizmalar, Denge, Kinematik Benzeşim.

Stability and Behaviour of Parallel-Sided Workpieces Held by a Robot Gripper

Abstract: The stability and behaviour of parallel-sided workpieces held by a two-fingered robot gripper were investigated. The behaviour of the workpiece under an external force was studied by computer simulation through modelling the actual gripper-workpiece system as a mechanism with a single degree of freedom. The characteristics of the possible slip motion of the workpiece were also investigated, taking into consideration the effects of kinematic parameters on grasping stability.

Key Words: Robot Grippers, mechanisms, stability, kinematic similarity

Giriş

Bir cismin hareketindeki serbestlik derecelerini sınırlandırıp yeni durumdaki davranışlarını incelemek pek çok araştırmacının ilgi alanı olmuştur. Önce fiziksel ve matematiksel bir model oluşturmaya yönelik olarak başlayan bu çalışmalar (Reuleaux 1875, Somov 1900, Lakshminarayana 1978, Kerr ve Sanger 1983) endüstriyel robotiğin popüler olmasıyla geniş bir uygulama alanı bulmuş ve değişik fonksiyonları gerçekleştirilmesi istenen robot tutucularının tasarımları (Pham ve Yeo 1986, Pham ve Nategh 1989, Pham ve Taçgın 1991, Taçgın 1990, Taçgın 1992) ve tutma kararlılığının incelenmesi (Okada ve Kanade 1984, Nguyen 1985) şeklinde devam etmiştir. Reuleaux tarafından başlayan ilk çalışmalar aynı zamanda mekanizma tekniğinin de temellerini oluşturmuştur. Robot tutucusu tarafından tutulan cisimleri, kendilerine bir konum için kinematik olarak denk mekanizmalar ile temsil ederek hareket durumlarını incelemek sık tercih edilen bir yoldur.

İnsan eli karmaşıklığında bir tutucu tasarımının yapılabilmesi için, tutma mekaniğinin çok iyi

anlaşılmasının gerekliliğinin yanında, daha basit yapıları tutucuların tasarım prensiplerinin büyük ölçüdeki yol göstericiliğine duyulan gereklilik açıktır. Dolayısıyla basit yapıları tutucuların analiz ve sentezleri, karmaşık yapıları tutucuların tasarımına bir temel teşkil etmektedir. Çünkü, bunların incelenmesinden ortaya çıkan ilkeler, genellikle daha karmaşık yapıları sistemlere genelleştirilebilir.

Bu makalede bir serbestlik dereceli ve iki parmaklı düzlemsel bir tutucunun paralel yüzlü iş parçalarını tutma durumu incelenmiştir. Tutucu-parça sistemi, tek serbestlik dereceli mekanizmalar şeklinde kabul edilerek cisme uygulanan bir kuvvet altında sistemin davranışı modellenerek bilgisayar benzetimiyle incelenmiştir. Çeşitli kinematik parametrelerin tutma işlemi üzerindeki izafi kararlılığa olan etkileri ele alınmış ve cismin uygulama kuvveti altındaki hareketinin nitelikleri elde edilmiştir.

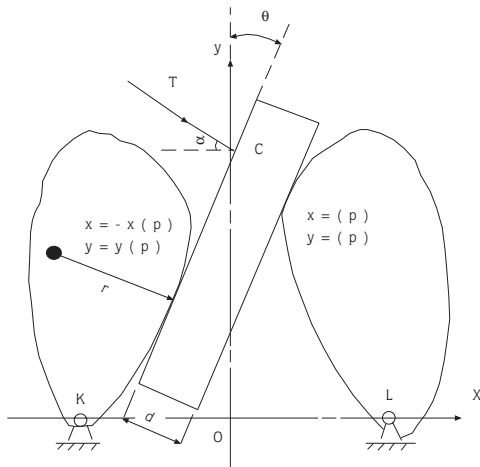
Varsayımlar

Bu çalışma aşağıdaki varsayımlar çerçevesinde yapılmıştır.

- (i) Tutucu ve iş parçası sistemi iki boyutludur.
- (ii) İş parçası paralel-yüzlü bir geometriye sahiptir.
- (iii) Tutucu bir serbestlik derecesine sahiptir.
- (iv) İş parçası ile tutucu arasındaki değme her iki taraftan da birer noktada olmaktadır.
- (v) Tutucunun iki yanı, birbirlerine ortalarından geçen dik eksene göre simetriktir. Dolayısıyla, tutucu ile parça arasındaki değme noktalarında, tutucu çenelerinin değme yarıçapları birbirlerine eşittir.
- (vi) Bütün ağırlık ve atalet kuvvetleri ihmal edilecektir.
- (vii) İş parçasına uygulanan kuvvet birdenbire değil, yavaş yavaş uygulanmaktadır.
- (viii) Ters belirlenmedikçe mafsallardaki sürtünmeler, ihmal edilecektir.
- (ix) Statik ve kinematik sürtünme katsayıları eşittir.

Tutucu İş Parçası Sisteminin Modellenmesi

Şekil 1'de tutucu-iş parçası sisteminin temel parametreleri x-y eksenlerine bağlı olarak gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen tutucu, iki serbestlik derecesine sahip gibi görünse de, sağ ve sol parmaklar birbirlerine (şekli basit tutmak için gösterilmeyen) bir mekanizma ile bağlı olduklarından, aslında bir serbestlik derecesine sahiptir. Bundan dolayı, iki taraftaki parmakların hareketleri birbirlerine bağımlı olup, simetriden dolayı birbirlerine eşittirler. Tek serbestlik dereceli olarak modellenen tutucu ile iş parçası beraber göz önüne alındığında, sistemin toplam serbestlik derecesi birden fazla olmakla birlikte, anlık hareket durumu göz önüne alınarak toplam sistem de tek serbestlik dereceli olarak ele alınmıştır (Taçgın 1992).



Şekil 1. Tutucu-iş parçası sistemi.

Tek serbestlik dereceli bir mekanizmanın bir konumu için geometri tümüyle belli olduğundan, mekanizma, tahrik uzvu hariç, statik olarak tümüyle belirlidir. Tahrik uzvunun belirlenen bir konumu için sistemin yeni geometrisi kolaylıkla elde edilebilir. Mekanizmanın herhangi bir konumu için statik çözümleme herhangi bir yolla rahatlıkla yapılabilir. Bu çözümlemede bilinmeyenler, mafsallardaki reaksiyonlar (Şekil 2a ve 2b'deki kayar mafsal hariç tüm mafsallar sürtünmesiz kabul edilmiştir) ve sistemi denge konumundan ayırmaya zorlayan uygulama kuvvetlerinin genliğidir. Buna karşılık sistemi, kapalı tutan tahrik kuvvetinin değeri önceden belirlenebilmektedir. Diğer yandan her bir uzuv için en genel halde 3 denge denklemi yazılabilir. Bu denklemler:

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum M = 0$$

şeklindeki denge denklemleri ile sürtünmeli kayar mafsaldaki $F > \mu N$ şeklindeki kayma şartıdır. Bu şartlar altında sistemin denge denklemlerinin sayısı ile bilinmeyenlerin sayısı birbirlerine eşit olup sistem çözülebilir durumdadır (Taçgın 1992). Şekil 2a ve şekil 2b'deki her iki durumda da hareketin başlama koşulu kayar mafsaldaki $F > \mu N$ eşitsizliğidir. Burada, F, N ve μ sırasıyla hareket yönündeki ve normal yöndeki kuvvetler ile statik sürtünme katsayısıdır. Bu modellemede kullanılan parametrelere ait değerler aksi söylenmediği takdirde şu şekilde belirlenmiştir.

$$\mu = 0.5$$

$$d = 10 \text{ mm.}$$

$$OC = 60 \text{ mm.}$$

$$r = 60 \text{ mm.}$$

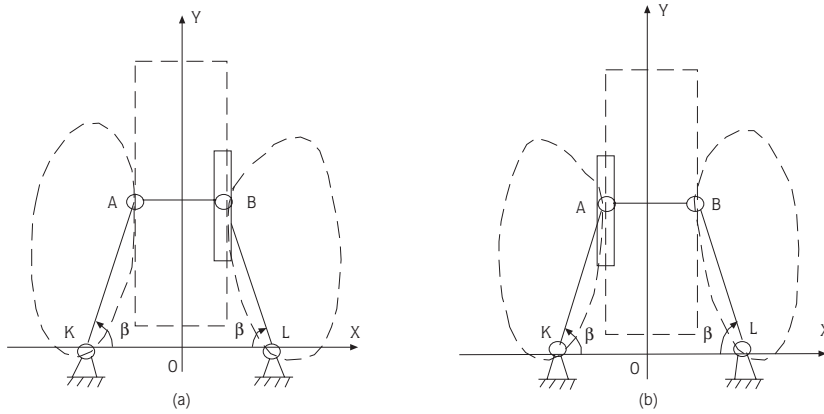
$$\theta = 0$$

$$\alpha = 0$$

Buradaki d, OC, r, θ ve α sırasıyla tutulan cismin kalınlığı, uygulama kuvveti ile tutucuya ait dikey simetri ekseninin kesiştiği noktanın tutucu çenenin mafsallarını birleştirilen eksene olan dik uzaklığı, çeneler ile tutulan cisim arasındaki temas noktasını barındıran çene profillerine ait eğrilik yarıçapı, tutulan cismin dikey simetri ekseninden itibaren ölçülen dönme açısı, tutulan cisme etkiyen uygulama kuvveti doğrultusunun yatayla yaptığı açıdır. Diğer geometrik büyüklükler verilenler cinsinden bulunabilirler. Detaylar "ekler" bölümünde verilmiştir.

Tutma Kararlılığı ve Cismin Davranışı

Şekil 2a ve 2b'de görülen mekanizmalar şeklinde modellenen robot tutucusuna ait olan ve tutma



Şekil 2. Tutucu-iş parçası sistemini bir konum için temsil eden mekanizmalar.

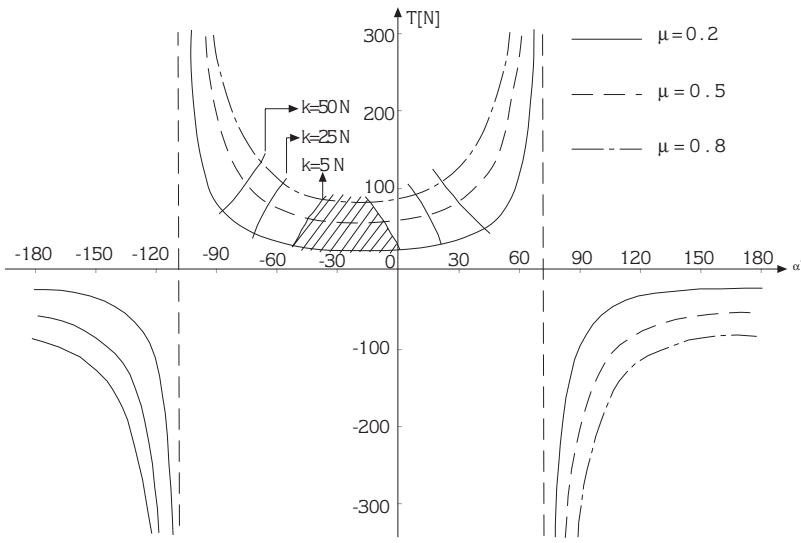
kararlılığını etkileyen parametreler, genel olarak tutucunun tasarımı ile ilgili olanlar ve olmayanlar şeklinde iki grupta toplanabilirler. Tasarımla ilgili olan parametreler, tutucu mekanizmanın türü, uzuvların boyutları ve tutucuyu kapalı tutan yay veya benzeri elemanlardır. Kullanılacak robot tutucusu seçildikten sonra bu parametreler tümü ile belirlenmiş olacaktır. Pratikte, kullanılacak olan tutucu genellikle gereksinime göre kataloglardan seçilmektedir. Dolayısıyla, bu parametrelerin incelenmesi, belirsiz sayıda ve boyutlardaki mekanizmaların varlığından dolayı oldukça karmaşık olmaktadır. Bu çalışmada bir robot tutucusunun en iyi tasarımından çok, seçilen bir tutucu aracılığı ile bir iş parçasının en emin şekilde yakalanmasının incelenmesi amaçlandığından tasarım parametrelerinin etkileri dışlanmıştır. Bu nedenle, yapılan bilgisayar benzetiminde, tutucu tasarımı ile ilgili parametreler seçilmiş ve belirlenen bu büyüklüklere bağlı olarak, diğer parametrelerin kararlılık üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dolayısıyla, bilgisayar benzetimi ile elde edilen grafiklerdeki sayısal değerler, tasarımla ilgili parametreleri belirlenmiş olan tutucular için geçerli olduğundan, bu grafikler yalnızca nitelikleri yönünden bir değer taşımaktadırlar. Bu bölüm, tutucunun iş parçasını emin bir şekilde tutabilmesi için, tutulan parçaya uygulanabilecek dış kuvvetin üst sınırının belirlenmesi ve tasarımla ilgili olmayan parametrelerin tutma kararlılığına etkileri olarak iki kısımdan oluşmaktadır.

Tutmayı Bozmayacak Dış Kuvvetlerin Belirlenmesi

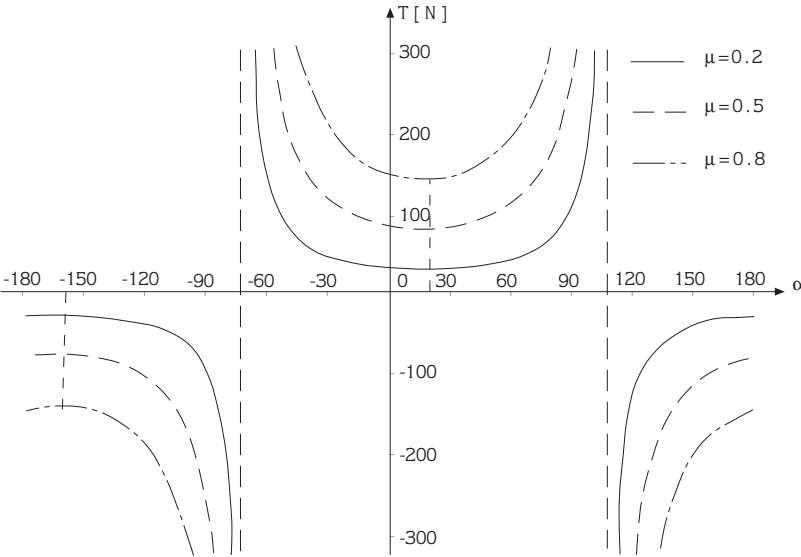
Şekil 1'de gösterilen iş parçasının iki çene arasındaki tutma durumunu bozmayacak dış kuvvetlerin üst sınırlarını belirlemek için tutucu öncelikle Şekil 2b'deki mekanizma olarak modellenmiştir. Bu durumda, tutulan parçanın

kararlılığını A noktasında kayarak B noktası etrafında dönecek şekilde bozmak için, üzerine farklı doğrultularda uygulama kuvvetleri etki ettirilmiştir. Elde edilen bilgisayar benzetimi sonuçları Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu şekilde, düşey ve yatay eksenler, sırasıyla uygulama kuvvetinin genliğini ve doğrultusunu göstermektedir. Şekildeki üç ayrı eğri A kayar mafsalındaki sürtünme katsayısının farklı değerleri ($\mu=0.2, 0.5$ ve 0.8) için verilmiştir. Uygulama kuvvetinin en az değerleri $\alpha = -26^\circ$ ve $\alpha = 154^\circ$ civarında ortaya çıkmaktadır. Uygulama kuvvetinin genliğinin küçülmesi, kararlılığın azalması anlamına geleceğinden, bu doğrultular arzu edilmeyen doğrultular olarak kabul edilebilirler. Uygulama kuvvetinin doğrultusunun $\alpha = 73^\circ$ ve $\alpha = -107^\circ$ değerlerinde, tutma kararlılığını bozmak için teorik olarak sonsuz genlikli uygulama kuvvetine gerek duyulmaktadır. Uygulama kuvvetinin $-180^\circ < \alpha < -107^\circ$ ve $73^\circ < \alpha < 180^\circ$ bölgelerinde negatif işaretli olması, yakalanan cismi saat ibresi yönünde döndürebilmek için, bu kuvvetin tanımlanan doğrultuda ancak ters yönde uygulanması gerektiğini göstermektedir.

Şekil 2a'daki mekanizma için bir öncekine benzer şekilde yapılan bilgisayar benzetimi ise Şekil 4'de görülmektedir. Burada, uygulama kuvvetinin genliğinin en küçük değeri $\alpha = 18^\circ$ ve $\alpha = -162^\circ$ de elde edilmiş olup, en yüksek değerleri de $\alpha = 107^\circ$ ve $\alpha = -73^\circ$ de ortaya çıkmaktadır. Burada gerek Şekil 3'den gerekse Şekil 4'den de görüleceği gibi, kayar mafsalındaki sürtünme katsayısının artması, daha büyük genlikli uygulama kuvveti gerektirdiğinden tutma kararlılığını da arttırmaktadır. En düşük ve en yüksek uygulama kuvveti değerlerinin elde edildiği α açıları ile kayar mafsalındaki sürtünme katsayısının birbirlerinden bağımsız oldukları bilgisayar benzetiminden elde edilmiştir. Mekanizmaları hareket ettirmek üzere uygulanan kuvvetlerin Şekil 3 ve 4'de verilen bazı



Şekil 3. B noktası etrafında dönme hareketi oluşturmak için gerekli tahrik kuvveti.



Şekil 4. A noktası etrafında dönme hareketi oluşturmak için gerekli tahrik kuvveti.

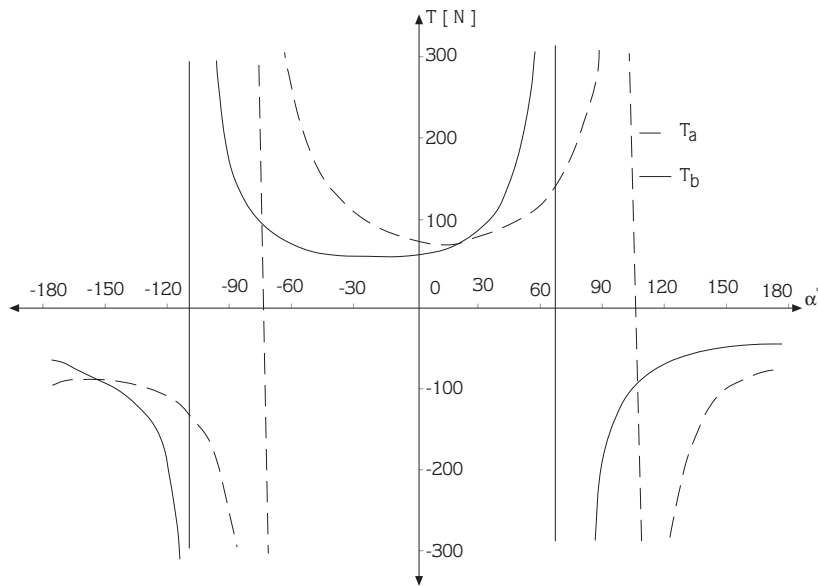
doğrultular için sonsuz değerler almaları, bu doğrultularda uygulanan kuvvetin, genliğinden bağımsız olarak, mekanizmayı tahrik edememesi anlamına gelmektedir. Yapılan bilgisayar benzetimi sonunda, uygulama kuvvetinin doğrultusunun mekanizma üzerinde bulunan ve kuvvet merkezi adı verilen bazı noktalardan geçmesi durumunda, mekanizmayı tahrik edemediği ve bu noktaların konumlarının kayar mafsaldaki sürtünme katsayısına bağlı olarak değiştiği de gözlenmiştir. Kayar mafsalda sürtünmenin olmadığı durumlarda, söz konusu noktanın, ani dönme

merkeziyle üst üste düştüğü bilinmektedir (Taçgın 1992). Şekil 2a ve 2b'deki mekanizmalar birbirlerine y-eksenine göre simetrik oldukları halde bu mekanizmalardan elde edilen Şekil 3 ve 4'deki figürler arasında tam bir çapraz ilişkinin olmamasının (diğer bir deyişle y-eksenine göre tam simetrik olmamasının) nedeni, bu kuvvet merkezlerinin geometrik yerinin, cismin aynı yöne dönmesi durumunda, Şekil 2a ve 2b'deki mekanizmalar için farklı konumlarda oluşmalarıdır.

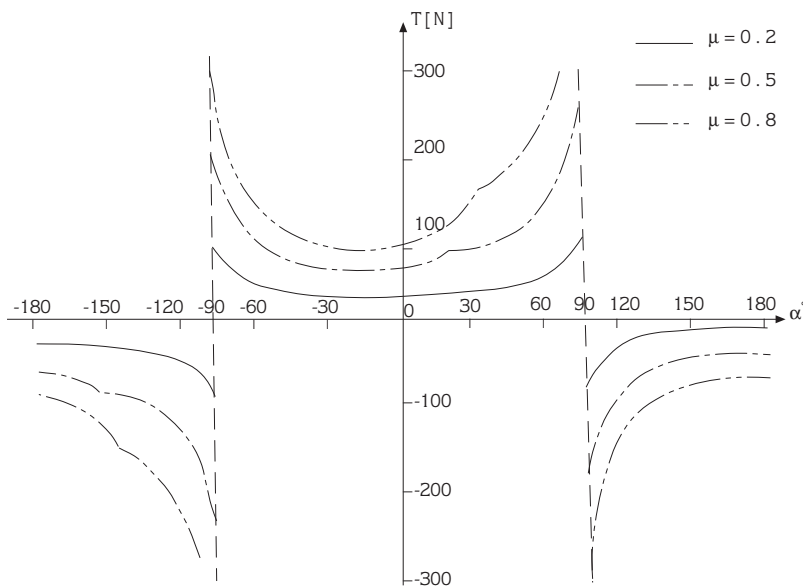
Pratik olarak, en az kararlılığın elde edildiği tek bir açı değerinden çok, uygulama kuvveti genliği için izin verilebilecek en büyük genlik değişimi, kararlılığı daha doğru olarak tarif edeceğinden, bu genlik değerine karşılık gelen açı bölgesini "kararsız bölge" olarak kullanmak daha yerinde olacaktır. Şekil 3 üzerinde, izin verilen en büyük genlik değişimlerinin 5N, 25N ve 50 N değerleri için kararsız bölge sınırları gösterilmiş olup bu farkın 5N olması durumundaki kararsız bölge, taralı alan ile temsil edilmiştir.

Diğer taraftan Şekil 2a ve 2b'deki mekanizmalar,

gerçek tutucu-parça sisteminin iki farklı hareketi için geliştirilmiş modeller olduğundan, gerçek sistemin kararlılığını bozacak olan tahrik kuvvetinin genliği Şekil 3 ve 4'ün birleştirilmesiyle elde edilecektir. Çünkü, tahrik kuvvetinin aynı doğrultusu için gerekli olan iki farklı genlik değerinden mutlak değerce küçük olanı gerçek genlik olacaktır. Şekil 2a ve 2b için bulunan kuvvet değerleri, birleştirilmiş grafik olarak şekil 5'de verilmiştir. Bu şekilden, $-90^\circ < \alpha < 26.5^\circ$, $-180^\circ < \alpha < -153.5^\circ$ ve $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ bölgelerinde Şekil 2a'daki mekanizma modelinin doğru olduğu, diğer bölgelerde de şekil 2b'deki mekanizmanın gerçek

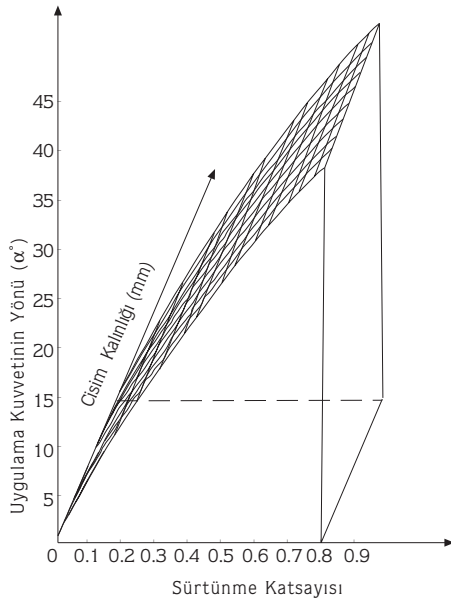


Şekil 5. A ve B noktaları etrafında dönme hareketi oluşturmak için gerekli tahrik kuvvetleri.



Şekil 6. Gerçek tutucu-parça sistemini hareket ettirecek tahrik kuvveti.

sistemi temsil edebileceği anlaşılmaktadır. Bu yaklaşımla elde edilen tahrik kuvvetinin gerçek genliği Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da gözlenen ilginç bir özellik, Şekil 2a ve 2b'deki mekanizmaların her ikisine birden ait olan birleşme noktalarındaki teğetsel süreksizliktir. Bu konumda bulunan cisim, anlık bir öteleme hareketi yaparak hem, hem de B noktalarında bir an için kayabilmekte; dolayısıyla, Şekil 2a ve 2b'deki mekanizmaların her ikisi de geçersiz olmaktadır. Bu konumu temsil eden noktaların geometrik yeri, tutulan cismin kalınlığına, tutma noktalarındaki sürtünme katsayısına ve uygulama kuvvetinin yönüne bağlı olarak Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi, tutulan cismin kalınlığının değişmesi, bu noktaların geometrik yerini etkilememektedir. Ancak, bu noktaların geometrik yeri üzerindeki diğer iki parametreden birisinin artırılması, diğerinin de artırılmasını gerekli kılmaktadır. Diğer taraftan, Şekil 6'daki eğrilerin minimum noktalarında en az kararlılık durumu oluşmaktadır. Bu konumlar, tutma işleminde kaçınılması gereken konumlar olduğundan, bu noktaların geometrik yerini bilmek önemlidir. Bu geometrik yer, sürtünme katsayısının $\mu = 0.5$ değeri için uygulama kuvvetinin yönüne, yakalanan cismin kalınlığına ve Şekil 1'deki OC mesafesine bağlı olarak Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu şekle göre, tutulan cismin kalınlığı ile uygulanan kuvvetin doğrultu açısı, ters orantılı olarak değişmekte olup, birinin artırılması diğerinin azaltılmasını gerektirmektedir. OC'nin büyüyen değerleri ise, diğer iki parametre arasındaki ilişkiyi belirleyen eğrinin yataya daha yakın α değerleri verecek şekilde kaymasına neden olmaktadır.



Şekil 7. Öteleme yüzeyi.

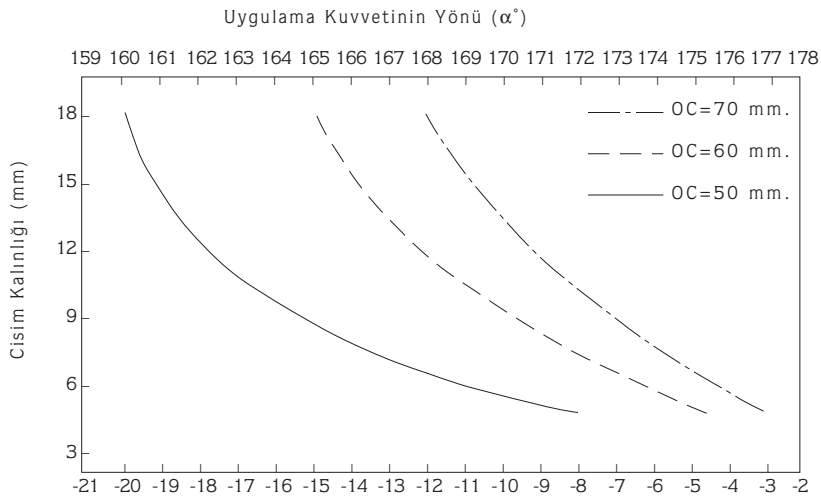
Yukardaki inceleme, tutulan cismin ilk açisal konumu için ($\theta=0$) yapılmış olmasına rağmen, cismin diğer açisal konumları için de büyük bir benzerlik söz konusudur. Diğer bir değişle, $\theta=0$ konumunda saptanan özellikler, $\theta \neq 0$ için başka bir konumda elde edilecektir. Bu çalışmanın konusu sayısal değerler elde etmekten çok, cismin niteliksel davranışlarını belirlemek olduğundan, $\theta \neq 0$ konumundaki sayısal değerler büyük bir önem taşımamaktadır.

Parametrelerin Kararlılığa Etkileri ve Cismin Hareketi

Tutma kararlılığına etki eden ve tutucunun geometrik yapısıyla ilgili olmayan parametrelerin, genel olarak, tutucunun tutma noktasındaki eğrilik yarıçapı, uygulama kuvvetinin konumu ve doğrultusu, tutulan cismin kalınlığı ve tutucu ile cisim arasındaki sürtünme katsayısı olarak sıralanabileceği önceden de belirtilmişti. Eğrilik yarıçapının cismin dönme miktarı ile değişimi Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu şekilde, bilgisayar benzetimi ile elde edilen kritik uygulama kuvveti genliğinin tutulan cismin açisal konumu ile değişimi üç farklı eğrilik yarıçapı için verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, aynı açisal dönme miktarı için gereken en fazla kuvvet, en büyük eğrilik yarıçapında oluşmaktadır. Dolayısıyla, cisim ile temas halindeki tutucunun cisme değme noktasındaki eğrilik yarıçapının en yüksek değerlerinde en büyük kararlılığın elde edileceği görülmüştür. Bunun nedeni tutma geometrisiyle ilgili olup, büyük eğrilik yarıçaplarında, cismin az bir miktar dönmesi esnasında, tutucu ile cisim arasındaki değme noktasının hızla değişmesidir.

Uygulama kuvvetinin yatayla yaptığı α açısının değişiminin kararlılığa etkisi Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 1'de gösterilen α açısının değişimi esnasında OC mesafesi sabit tutulmuş, böylece uygulama kuvvetinin doğrultusunun kararlılığa etkisi gözlenebilmiştir. OC'nin büyük değerlerinde uygulama kuvveti ile değme noktaları arasındaki mesafe artacağından, kararlılığın azalacağı açıktır. Şekil 10'da görülebileceği gibi, $\alpha=0$ civarında α arttıkça cismin saat ibresi yönündeki dönme durumu için, tutma kararlılığı artmaktadır. Tutma kararlılığının artmasının, söz konusu hareket durumu için oluşan kuvvet merkezi ile, uygulama kuvvetinin doğrultusu arasındaki dik uzaklığın azalmasıyla doğru orantılı olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 11 ve 12'de ise, tutulan cismin kalınlığının ve değme noktasındaki sürtünme katsayısının kararlılığa etkileri gösterilmiştir. Bu şekillerden de görülebileceği gibi, daha kalın cisimlerin tutulması ve değme noktasında yüksek sürtünme katsayısı bulunması



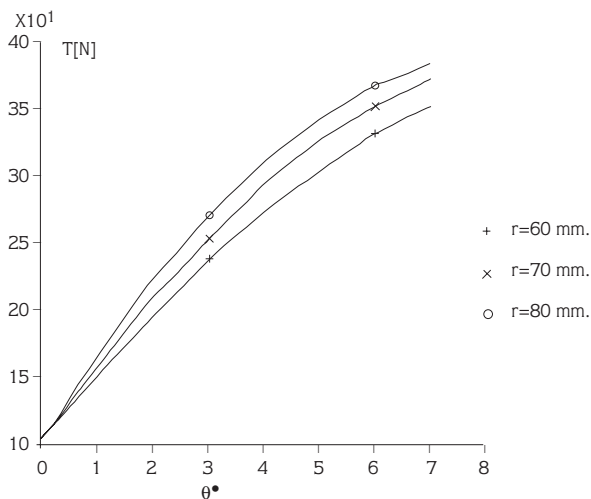
Şekil 8. Uygulama kuvvetinin arzu edilmeyen doğrultuları.

durumlarında tutma kararlılığı artmaktadır. Buradaki bazı eğriler üzerinde süreksiz noktalar gözlenmektedir. Bu süreksiz noktaların Şekil 6'da gösterilen süreksizlikle ilgisi olduğundan, hareket, başlangıçtan itibaren süreksizliğe kadar bir taraftaki değme noktası etrafında sürecektir, sonra diğer nokta etrafında devam edecektir.

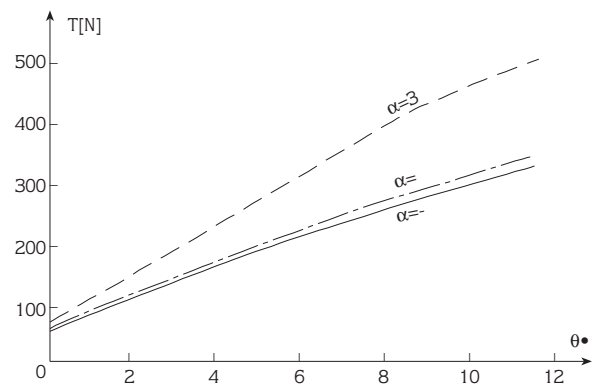
Öteleme hareketinin olacağı bu özel noktaların geometrik yerinin sürtünme katsayısıyla ve uygulama kuvvetinin doğrultusuyla değişimi Şekil 13'de gösterilmiştir. Bu şekilde, çeşitli sürtünme katsayıları sabit tutularak, öteleme hareketini elde etmek için gereken α ve θ değerlerinin geometrik yeri bilgisayar benzetimiyle elde edilmiş ve bu değişimin doğrusal olduğu gözlenmiştir. Sürtünme katsayısı, μ , sabit tutularak α - θ düzleminde elde edilen doğrusal

geometrik yer, α - θ düzlemini iki yarı düzleme ayırmaktadır. Bu yarı düzlemlerin ayrıldığı ortak sınır bölgesi, A ve B değme noktalarındaki kayma hareketinin aynı anda oluştuğu anlamına geldiğinden, her bir yarı düzlem bir değme noktası etrafında dönmeyi temsil etmektedir.

Diğer taraftan, $\mu=0.2$ için α - θ düzleminde oluşan yarı-düzlemler, taralı ve taranmamış alanlar olarak gösterilmişlerdir. α doğrultusunun sabit değerlerinde, hareketin gelişimi düşey doğrultudaki oklarla gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, $\alpha=5^\circ$ ve $\alpha=40^\circ$ için hareket, sırasıyla, yalnızca B ve yalnızca A noktaları etrafında oluşacak; $\alpha=20^\circ$ için ise, hareket, önce A noktası etrafında dönmeye başlayıp, $\alpha=8^\circ$ den sonra B noktası etrafında dönmeye devam edecektir. Cismin bu davranışı, incelenen parametrelerin farklı



Şekil 9. Eğrilik yarıçapının kararlılığa etkisi.

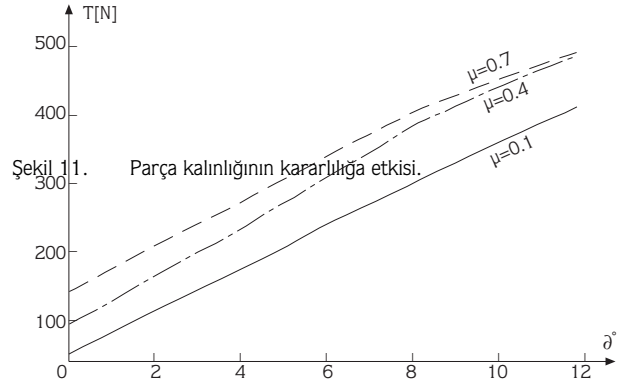
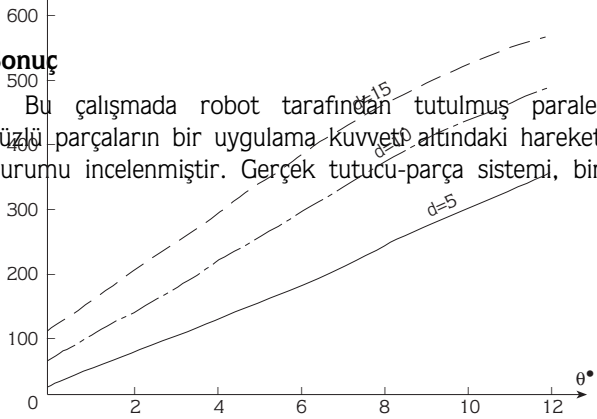


Şekil 10. Uygulama kuvveti doğrultusunun kararlılığa etkisi.

değerleri için de benzer şekildedir.

Sonuç

Bu çalışmada robot tarafından tutulmuş paralel yüzlü parçaların bir uygulama kuvveti altındaki hareket durumu incelenmiştir. Gerçek tutucu-parça sistemi, bir



Şekil 13. Süreksizlik noktalarının geometrik yerleri ve $\mu=0.2$ için, cismin farklı davranış bölgeleri.

Şekil 12. Sürtünme katsayısının kararlılığa etkisi.

serbestlik dereceli mekanizmalar şeklinde

incelenmiş, bu bilgilerin ışığında uygulama kuvveti etkisindeki cismin hareket durumu irdelenmiştir.

Kaynaklar

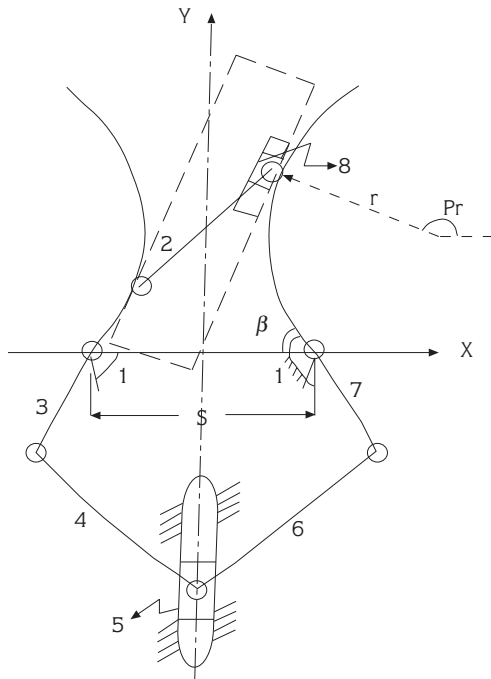
- Kerr D.R. ve Sanger D.J., "The Analysis of Kinematic Restraint" Proc. of the 6th World Congress on ToMM, Delhi, 299-302, 1983.
- Lakshminarayana K., "Mechanics of Form Closure", ASME Paper, No. 78-DET-32, 1978.
- Nguyen V., "The Synthesis of Stable Grasping in the Plane", AI Memo 862, MIT Artificial Intelligence Lab., 1985.
- Okada T. ve Kanade T., "Appropriate Lengths Between Phalanges of Multijointed for Stable Grasping", Journal of Robotic Systems, 1(3), 223-234, 1984.
- Pham D.T. ve Nategh M.J., "Optimum Design of Gripper Jaws for Tapered Components", Robotica, 8, 223-230, 1989.

modellenecek, parçanın iki farklı hareket durumu için kritik uygulama kuvvetleri elde edilmiştir. Tasarım parametrelerinin tutma kararlılığına olan etkileri de

- Pham D.T. ve Taçgın E., "CAD of Devices for Gripping Prismatic Components", Robotica, 10, 229-237, 1992.
- Pham D.T. ve Yeo S.H., "Concentric Gripping of Cylindrical Workpieces Using Quasi-Parallel Grippers", Robot Grippers (eds. D.T. Pham ve W.B. Heginbotham), IFS Publications Ltd., 226-261, 1986.
- Reuleaux F., "Theoretische Kinematik", Grundzuge einer Theorie des Maschinenwesens 1875 (orijinal eser), (çeviri) The Kinematics of Machinery: Outlines of Theory of Machines, Londra, 1876.
- Somov P., "Über Gebiete von Schraubensch-windigkeiten eines Starren Körpers bei Verschiedener Zahl von Stützfla chen" Zeitschrift für Mathematik und Physik', 45, 245-306, 1900.
- Taçgın E., "Intelligent Computer Aided Selection and Design of Robot End-Effector Tooling", Doktora Tezi, School of Electrical Electronic and Systems Engineering, University of Wales College of Cardiff, U.K., 1990.

Taçgin E., "Qualitative Analysis of Static and Kinematic Behaviours of Parallel-Sided Workpieces Held by a Gripper", Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 16, 4, 331-338, 1992.

EK: Tutucu-İş parçası Sisteminin Geometrik ve Denge Denklemlerinin Oluşturulması ve Çözümleri



İncelenen robot tutucusunu muhtelif mekanizmalarla temsil etmek mümkündür. Bunların en basit yapıya sahip olanlarından birisi şekilde gösterilmiştir. Buradaki tutulan cisim, 3 nolu uzuv etrafında kaymadan yuvarlanıp 7 nolu uzuv ile yaptığı temas noktasında kaydığından, bu cisim 2 ve 8 nolu yardımcı uzuvlar ile modellenmiştir. Söz konusu mekanizmanın tek serbestlik dereceli olduğu açıktır. Dolayısıyla, seçilen herhangi bir θ konumu için, mekanizma tamamen belirlidir. Mekanizmanın konumunu belirleyen cebirsel denklemler lineer olmamakla birlikte, cisim tutucu sisteminin temas noktasının belirleyen denklemler dışındaki diğer denklemler oldukça açıktır ve basit trigonometrik ifadelerle gösterilebilirler. Temas noktasını belirleyen denklemler ise tutucunun şeklini belirleyen profile bağlı olup bu profillerin genel ifadesi

$$X=X(p,\beta); \quad Y=Y(p,\beta)$$

şeklinde olacaktır. Burada p parametre, β dönme açısıdır. Bu profillerin dairesel oldukları durum göz önüne alındığında sağ ve sol taraftaki profillerin parametrik denklemleri, sırasıyla

$$x_r = (6-s/2)\cos(\beta-\beta_1) + 6\cos(p_r+\beta-\beta_1)\cos(\beta-\beta_1) + 4\sin(\beta-\beta_1) + 6\sin(\beta-\beta_1) \sin(p_r+\beta-\beta_1) + s/2$$

$$Y_r = 4\cos(\beta-\beta_1) + 6\sin(p_r+\beta-\beta_1)\cos(\beta-\beta_1) - (6-s/2)\sin(\beta-\beta_1) - 6\cos(p_r+\beta-\beta_1)\sin(p_r+\beta-\beta_1)$$

$$x_1 = (-6+s/2)\cos(\beta-\beta_1) + 6\cos(p_r+\beta-\beta_1)\cos(\beta-\beta_1) - 4\sin(\beta-\beta_1) - 6\sin(\beta-\beta_1)\sin(p_r+\beta-\beta_1) - s/2$$

$$Y_r = (6+s/2)\sin(\beta-\beta_1) + 6\cos(p_r+\beta-\beta_1)\sin(\beta-\beta_1) + 4\cos(\beta-\beta_1) + 6\sin(\beta-\beta_1)\cos(p_r+\beta-\beta_1)$$

$$p_r = p_1 + \pi$$

olacaktır. Burada tutucu profilleri olarak yarıçapı 60 mm olan dairesel profiller tercih edilmiş olup tutucu tam kapalı durumda iken sağ ve sol taraflar birbirlerine (0,40) noktasında temas etmektedirler. Bu denklemlerde p_r , p_1 sağ ve sol taraftaki eğriye ait parametreler; β_1 tutucunun tam kapalı olduğu durumdaki β değeri; s ise tutucuyu zemine bağlayan iki mafsal arasındaki mesafe olup bunların değerleri 60 mm lik profillerin tam kapalı durumda (0,40) noktasında temasını gerçekleştirecek değerlerdir. Diğer taraftan, tutulan cismin daima bu profillere teğet olacağı açıktır. Cisim θ kadar döndüğünde profil denklemleri ile θ arasındaki ilişkiler için aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$m = \cot\theta = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial y_r}{\partial p_r} \cdot \frac{\partial p_r}{\partial \theta}$$

$$y - y_r = m(x - x_r); \quad (\cot\theta)x - y + (y_r - x_r \cot\theta) = 0$$

$$a = \cot\theta; \quad b = -1; \quad c = y_r - x_r \cot\theta; \quad ax + by + c = 0$$

Yukarıdaki doğru denklemi θ kadar dönmüş bulunup, tutucunun sağ profiline değen cismin bir yüzünün denklemidir. Bu doğru ile soldaki profile ait noktaların arasındaki mesafelerin en küçüğü, cismin d kalınlığı olacaktır.

$$d = \frac{|ax_1 + by_1 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} = \frac{|(x_1 - x_r)\cot\theta + (y_r - y_1)|}{\operatorname{Cosec}\theta}$$

Oluşturulan geometrik model tek serbestlik dereceli olduğundan non-lineer denklem sistemi diğer uzuvlara bağlı denklemlerle birlikte, denklem sayısından bir fazla bilinmeyen içerecektir. Bunlardan bir tanesi, mesela θ dönme açısı, seçildiğinde diğerleri çözülebilir. Bu denklem sisteminin çözümünden mekanizmanın tüm mafsal noktalarının konum koordinatları ile cismin tutucuya temas ettiği noktaların koordinatları bulunacaktır. Böylece sistemin geometrisi, denge denklemlerinden bağımsız olarak çözülmüş olacaktır.

Mafsal ve temas noktaları bilindikten sonra mekanizmadaki her bir uzuv için $\Sigma F=0$ ve $\Sigma M=0$ denge denklemleri yazılır. Mesela tutulan cisim için kuvvet ve moment denklemleri sırasıyla elde edildiğinde

$$T \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta - \alpha\right) + N_1 - N_r = 0$$

$$F_r - T \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta - \alpha\right) + F_1 = 0$$

$$(-x_1 F_1 - y_1 N_1 + y_r N_r + x_r F_r) \cos \theta + (y_1 F_1 - x_1 N_1 + x_r N_r - y_r F_r) \sin \theta - T (x_t \sin \alpha - y_t \cos \alpha) = 0$$

denklemleri bulunacaktır. Burada x_t ve y_t T uygulama kuvvetinin tesir doğrultusu üzerinde bir nokta olan T kuvvetinin cisme temas ettiği noktanın koordinatlarını göstermektedir. Seçilen mekanizmanın uzuvlarına ait denge denklemlerinin ve bilinmeyenlerin sayısı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

	Denklem Sayısı	Toplam	
		Bilinmeyen Sayısı	Yeni Bilinmeyen Sayısı
2 nolu uzuv	3	4	4
3 nolu uzuv	3	6	4
4 nolu uzuv	2	4	2
5 nolu uzuv	2	3	1
6 nolu uzuv	2	4	2
7 nolu uzuv	3	6	4
8 nolu uzuv	2	4	-
TOPLAM	17		17

Tutucu ve cisim arasındaki temas noktası, bakıldıkça bilinmeyenler, seçilen bir pozisyon için, aradığımız değeri bulabiliriz. denklemlerle genel olarak modelleyen kayan mafsa

$$F_s = \mu N$$

Burada μ cisim ile tutucu arasındaki sürtünme katsayısıdır. Böylece seçilen her θ değeri için, önce geometrik sonra da denge denklemleri çözülerek, bir T uygulama kuvveti değeri bulunabilmektedir.