

DÖNER VE ÇEMBERSEL KAYAR MAFSALLI YENİ TİP BİR KÜRESEL DÜZENEGİN İLERİYE DOĞRU KİNEMATİK ÇÖZÜMLEMESİ

Özgür Kilit¹ , Vural Ceyhun²

¹ Ege Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü-İZMİR
E-Posta: ozgur.kilit@ege.edu.tr

² Ege Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü-İZMİR
E-Posta: vural.ceyhun@ege.edu.tr

Özet

Çembersel kayar mafsalların küresel düzeneklerde kullanımı üzerine çok az araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, çembersel kayar mafsalların kullanıldığı platform tipi küresel bir düzeneğin ileriye doğru kinematik çözümü yapılmıştır. Bu çözümlemede mafsal eksenlerinin küre yüzeyinde küresel çember yörüngesi çizdiği ve çıkış öğesinin aslında bu küresel çember yörüngelerinin kesişim noktalarında bulunduğu gösterilmiştir. Bu yolla ileriye doğru çözümlemenin oldukça basitleştiği gösterilmiştir. Ayrıca bu yeni tür küresel düzeneklerin BSD (Bilgisayar Sayısal Denetimli) makinalarda nasıl uygulanabileceği üzerine bir değerlendirme verilmiştir.

Anahtar Terimler: küresel düzenekler, çembersel kayar mafsal, küresel çember

Abstract

Using of circular sliding joints in spherical mechanisms has been very few investigated. In this study forward kinematic analysis of a platform type spherical mechanism with circular sliding joints has been made. In this analysis it has been shown that joints are moving on spherical circle trajectories and end effectors are at the intersection points of these spherical circles. In this way, it has been shown how forward kinematic analysis was simplified using this approach. Furthermore an evaluation has been given about how these kind of spherical mechanisms can be applied to CNC tools.

Keywords: spherical mechanism, circular sliding joint, spherical circle

1. GİRİŞ

Küresel düzenekler durağan olmayan bütün öğelerinin eşmerkezli küreler üzerinde devindiği düzeneklerdir. Devingenlik katsayılarının üçe eşit olmasından dolayı düzlemsel düzeneklere benzerler ancak aynı zamanda uzaysal devinim de oluşturabildiklerinden dolayı bu tür düzenekler kinematik sınıflandırmada düzlemsel ve uzaysal düzeneklerin arasında yer almaktadır. Bu özelliklerinden dolayı küresel düzenekler son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmektedir [1-4]. Küresel düzeneklerde aslında tüm devingen öğeler bir küre merkezi etrafında dönme devinimi yaparlar. Bu nedenle bu düzeneklerde genellikle döner mafsal kullanılmaktadır. Birçok yazar küresel düzenekleri tanımlarken yalnızca döner mafsalların kullanıldığını düzenekler olarak tanımlamışlardır [5,6]. Ancak döner mafsalların yanısıra

çembersel kayar mafsallar da dönme devinimi oluşturabilme yeteneklerinden dolayı küresel düzeneklerde kullanılabilir. Küresel düzeneklerde çembersel kayar mafsal kullanımı konusunda çok az araştırma vardır [7,8]. Bu makalelerde Kim ve arkadaşları çembersel kayar mafsalların bir BSD tezgahında kullanımının kesici takımın çalışma uzayını (workspace) nasıl arttırdığını göstermişler ve bu tezgahın deneysel üretimini yapmışlardır. Bu çalışmada çembersel kayar mafsalin kullanıldığı yeni tip bir küresel düzenek sunulmuş ve bu düzenek üzerinde İleriye Doğru Kinematik Çözümleme yapılmıştır. Bu çözümlemede mafsal eksenlerinin küre yüzeyinde küresel çember yörüngesi çizdiği ve çıkış öğesinin aslında bu küresel çember yörüngelerinin kesişim noktalarında bulunduğu gösterilmiştir. Bu yeni yöntem kullanılarak ileriye doğru çözümleme oldukça basitleştirilmiştir.

2. TANIMLAMALAR

2.1 Küresel Çember

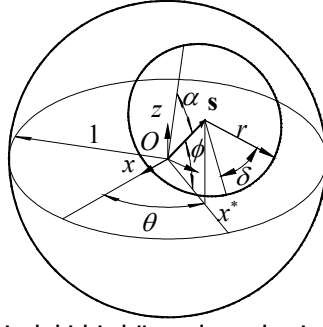
Çember iki boyutlu \mathbb{R}^2 Öklid Düzlemi'nde (Euclidean Plane), $x^2 + y^2 = r^2$ olarak ya da bir değişkene bağlı olarak $\{x = r \cos \delta, y = r \sin \delta\}$ şeklinde tanımlanır. Burada r yarıçap, δ ise bağımsız değişkendir. Ancak bu gösterim 3 boyutlu uzayda rastgele bir konumdaki bir çember için uygun değildir. Bunun için dönüşüm matrisleri ile çarpılabilmesi açısından, çemberin $C_s = \{rC\delta \quad rS\delta \quad d\}^T$ şeklindeki vektörel gösterimi daha uygundur. Burada $C\delta$ ve $S\delta$ sırasıyla $\cos(\delta)$ ve $\sin(\delta)$ yerine kullanılmıştır. Küresel çember ise, genel olarak küre ile düzlemin arakesiti ya da ortak noktalarının geometrik yeri olarak tanımlanabilir. Ancak düzlemin katsayılarının bilinmemesi durumunda küresel çemberi bir küre-koni kesişmesi olarak ifade etmek kolaylık sağlar. Birim küre üzerindeki bir küresel çember, orta eksenini $s(\theta, \phi)$ vektörü ile ve tepe açısı da 2α ile verilmiş bir koninin birim küre ile kesişmesi olarak düşünülebilir. Burada s vektörü Oxy düzlemi üzerindeki izdüşümünün x eksenine yaptığı θ açısı ve düzlemden yaptığı ϕ yükselme açısı ile tanımlanmıştır (Şekil-1). Küre ve koninin arakesitinde bulunan bu küresel çember başlangıçta z eksenine çakışık olarak çizilmiş olan $\{S\alpha C\delta \quad S\alpha S\delta \quad C\alpha\}^T$ çemberinin orta ekseninin önce $R_z(\pi/2)R_x(\pi/2)$ dönüşümü ile x eksenine çakıştırılması, daha sonra da $R_z(\theta)R_x(\pi/2)R_z(\phi)$ dönüşümü ile s vektörüne çakıştırılması ile bulunur. Burada $R_n(\gamma)$, n eksenini etrafında γ açısı kadarlık bir dönüşü veren döndürme matrisidir. Son durumdaki çember denklemini bulmak için tüm dönüştürme matrisleri ile aşağıda gösterildiği gibi sırasıyla çarpılması gerekir.

$$C_s = R_z(\theta)R_x(\pi/2)R_z(\phi)R_z(\pi/2)R_x(\pi/2)\{S\alpha C\delta \quad S\alpha S\delta \quad C\alpha\}^T \quad (1)$$

Eşitlik (1)'deki matrislerin çarpımı bize aşağıdaki küresel çember eşitliğini verir.

$$C_s = \{A_1S\delta + B_1C\delta + C_1 \quad A_2S\delta + B_2C\delta + C_2 \quad A_3S\delta + B_3C\delta + C_3\}^T \quad (2)$$

Burada $A_1 = S\theta S\alpha$; $B_1 = -C\theta S\phi S\alpha$; $C_1 = C\theta C\phi C\alpha$; $A_2 = -C\theta S\alpha$; $B_2 = -S\theta S\phi S\alpha$; $C_2 = S\theta C\phi C\alpha$; $A_3 = 0$; $B_3 = C\phi S\alpha$ ve $C_3 = S\phi C\alpha$ 'dir. Eşitlik (2)'de ifade edilen çember Şekil (1)'de görülmektedir. Bu şekilde δ açısının, başlangıçta x eksenine çakışık olan ve tüm dönüşümlerden sonra x^* konumunu alan vektörden itibaren ölçüldüğüne dikkat edilmelidir.

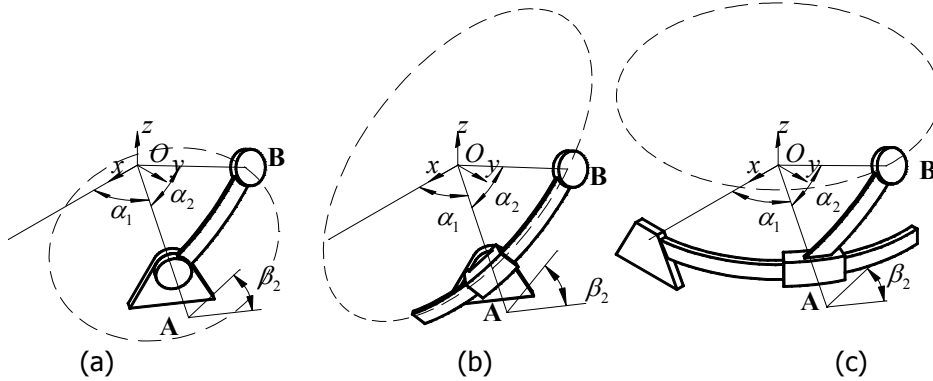


Şekil-1 Birim küre üzerindeki bir küresel çemberin geometrik tanımlaması

Özel olarak $\alpha = \pi/2$ alınırsa Eşitlik (2) $C_s = \{-C\theta S\phi C\delta \quad -C\theta S\delta -S\theta S\phi C\delta \quad C\phi C\delta\}^T$ şeklini alır. Bu, orta eksenine s vektörü olan büyük dairedir. Eğer $\alpha = 0$ alınırsa $C_s = \{C\theta C\phi \quad S\theta C\phi \quad S\phi\}^T$ şeklini alır. Bu durumda çember yarıçapı 0 olur ve çember vektörü s vektörüne eşit hale gelir.

2.2 Döner Mafsal ve Çembersel Kayar Mafsal

Küresel düzeneklerin elemanları tanım gereği devinimleri sırasında küre yüzeyinde kalmak zorundadır. Eğer devingen bir eleman durağan bir elemana bir döner mafsal ile bağlı ise bu eleman, eksenini küre merkezinden geçen bir küresel çember yörüngesini izler. Eğer bir kayar mafsal kullanılmak isteniyorsa bu mafsalın devinim yörüngesi çembersel olmak zorundadır. Çünkü doğrusal kayar mafsal ya da vida mafsal kullanılması elemanların küre yüzeyinden ayrılmasına yol açar. Çembersel kayar mafsal kullanılması durumunda da iki durum vardır. Devinimli eleman kendi bulunduğu düzlem üzerinde kayabilir veya durağan elemanın bulunduğu düzleme paralel bir düzlem üzerinde kayabilir. Bu iki durum da sırasıyla Şekil-2(b) ve (c)'de gösterilmiştir. Bu şekilde her üç durumda da birbirinden farklı küresel çemberlerden oluşan yörüngeler açıkça görülmektedir. Küresel çember eksenleri Şekil-2 (a)'da A vektörü, (b)'de $A \times B$ vektörü, (c)'de ise z eksenidir.

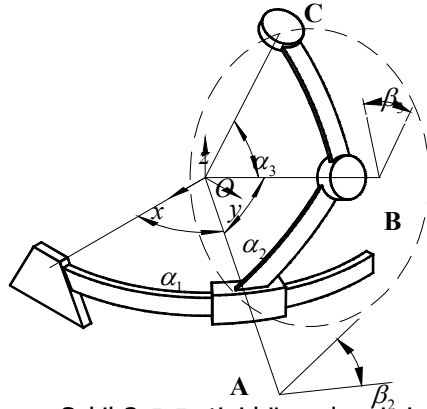


Şekil-2 (a) döner (b) P_1 tipli ve (c) P_2 tipli çembersel kayar mafsalı tek serbestlik dereceli küresel seri düzeneklerin yörüngelerinin karşılaştırılması [9]

Ö. Kilit'in yaptığı çalışmada [9], bu mafsal tiplerine sahip düzeneklerin devinim denklemleri çıkartılmış ve birbirleri arasındaki dönüşümler ayrıntılı olarak incelenmiştir.

3. DÜZENEGİN TANITILMASI

Bu çalışmada 3 bacaklı platform tipi küresel bir düzenek ele alınmıştır. Her bir bacak kendi içinde P_2R tipi seri zincirden oluşmaktadır (bkz. Şekil-3).



Şekil-3 P₂R tipi küresel seri zincir [9]

Şekil-3'deki C vektörünü Euler Değişkenleri kullanarak elde edelim. Euler Değişkenleri bilindiği gibi 3B uzayda devinen bir katı cismin devinimini dik koordinat eksenleri etrafında dönme terimleri ile ifade edilebilmesini sağlar. Açıkça görülebileceği gibi C eksenine aşağıdaki bir dizi dönme ile elde edilebilir.

$$C = R_z(\alpha_1)R_x(\beta_2)R_z(\alpha_2)R_x(\beta_3)R_z(\alpha_3)\hat{i} \quad (3)$$

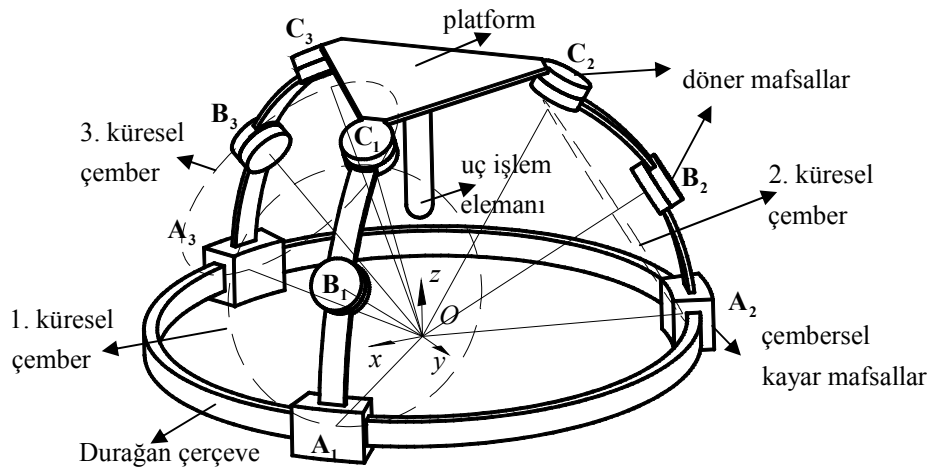
Burada \hat{i} , x-ekseni yönündeki birim vektördür. Eşitlik(3)'ün açık yazılışı aşağıda verilmiştir.

$$C = \begin{bmatrix} C\alpha_1 & -S\alpha_1 & 0 \\ S\alpha_1 & C\alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\beta_2 & -S\beta_2 \\ 0 & S\beta_2 & C\beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\alpha_2 & -S\alpha_2 & 0 \\ S\alpha_2 & C\alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\beta_3 & -S\beta_3 \\ 0 & S\beta_3 & C\beta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\alpha_3 & -S\alpha_3 & 0 \\ S\alpha_3 & C\alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Eşitlik(4)'deki matrislerin çarpılması bize aşağıdaki denklemi verir.

$$C = \{A_1S\beta_3 + B_1C\beta_3 + C_1 \quad A_2S\beta_3 + B_2C\beta_3 + C_2 \quad A_3S\beta_3 + B_3C\beta_3 + C_3\}^T \quad (5)$$

Burada $A_1 = S\alpha_1S\alpha_3S\beta_2$; $B_1 = -C\alpha_1S\alpha_2S\alpha_3 - S\alpha_1C\alpha_2S\alpha_3C\beta_2$; $C_1 = C\alpha_1C\alpha_2C\alpha_3 - S\alpha_1S\alpha_2C\alpha_3C\beta_2$; $A_2 = -C\alpha_1S\alpha_3S\beta_2$; $B_2 = C\alpha_1C\alpha_2S\alpha_3C\beta_2 - S\alpha_1S\alpha_2S\alpha_3$; $C_2 = S\alpha_1C\alpha_2C\alpha_3 + C\alpha_1S\alpha_2C\alpha_3C\beta_2$; $A_3 = S\alpha_3C\beta_2$; $B_3 = C\alpha_2S\alpha_3S\beta_2$ ve $C_3 = S\alpha_2C\alpha_3S\beta_2$ 'dir. Şekil-3'deki üç seri zincir R (döner) mafsallar ile üst platforma bağlanmıştır. Bu düzenek Şekil-4'de gösterilmiştir.



Şekil-4 3P₂RR Platform tipi küresel düzenek

Şekil-4'de verilen simgelere göre A_i , B_i ve C_i ($i=1,2,3$) her bir bacağın üzerindeki mafsalları göstermektedir. A_i ($i=1,2,3$) ile \hat{i} arasındaki açılar α_{1i} ($i=1,2,3$)'dır ve düzeneğin girdi açıları olarak seçilmiştir. A_i ve B_i eksenleri arasındaki açılar α_{2i} olarak ve B_i ve C_i arasındaki açılar ise α_{3i} olarak tanımlanmıştır. Bu açılar A_iB_i ve B_iC_i elemanlarının açılal çubuk boylarıdır ve durağandır. $\hat{i}A_i$ ve A_iB_i düzlemleri arasındaki dış açı β_{2i} olarak ve A_iB_i ve B_iC_i düzlemleri arasındaki açılar ise β_{3i} olarak tanımlanmışlardır. β_{2i} durağan, β_{3i} ise değişken açılardır. B_iC_i elemanları üst platforma C_i eksenlerindeki döner mafsallarla bağlanmıştır. Bu platformun altında bir kesici takım yer almaktadır. Küresel düzeneklerin özelliğinden dolayı tüm eksenler küre merkezinde kesişirler. Dolayısı ile üç köşesinde bulunan C_i eksenlerinden dolayı platform da küre yüzeyinde devinmek zorundadır. Böyle bir platforma yüzey normali olarak konumlandırılan bir kesici takımın eksenini de küre merkezinden geçer. Bir noktanın küre yüzeyinde konumlanması için 2 koordinat yeterli olduğu halde bir katı cisim için 3 koordinata gereksinme vardır. Şekil-4'deki platformun konumunu ve dönme açısını tam olarak denetleyebilmek için gereken 3 bağımsız girdi değişkeni de A_i eksenlerinin konumları ile sağlanmaktadır.

C_i eksenleri B_i eksenleri etrafında birer küresel çember yörüngesi çizerler. Ancak platform bir katı cisim olduğundan kenar uzunlukları, yani C_1C_2 , C_2C_3 ve C_3C_1 uzunlukları durağandır. Bu uzunluklar 3 küresel çember denkleminin çözülmesinde bize gerekli olan koşulları sağlarlar. Üç küresel çember denklemi aşağıda verilmiştir.

$$C_i = \{a_{1i}S\beta_{3i} + b_{1i}C\beta_{3i} + c_{1i} \quad a_{2i}S\beta_{3i} + b_{2i}C\beta_{3i} + c_{2i} \quad a_{3i}S\beta_{3i} + b_{3i}C\beta_{3i} + c_{3i}\}^T, \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

Eşitlik (6)'daki 3 denklemden oluşan denklem takımında bulunan durağan katsayılar EK-1'de verilmiştir. Burada i bacak numarasıdır ve ($i=1,2,3$) değerlerini almaktadır. Eğer C_1C_2 , C_2C_3 ve C_3C_1 uzaklıklarına sırasıyla l_1 , l_2 ve l_3 dersek vektör farklarının normları: $\|C_2 - C_1\| = l_1$, $\|C_3 - C_2\| = l_2$ ve $\|C_1 - C_3\| = l_3$ olacaktır. Bu eşitlikler kendi bileşenleri cinsinden yazıldığında ise aşağıdaki denklem takımı elde edilebilir.

$$\left. \begin{aligned} (C_{2x} - C_{1x})^2 + (C_{2y} - C_{1y})^2 + (C_{2z} - C_{1z})^2 &= l_1^2 \\ (C_{3x} - C_{2x})^2 + (C_{3y} - C_{2y})^2 + (C_{3z} - C_{2z})^2 &= l_2^2 \\ (C_{1x} - C_{3x})^2 + (C_{1y} - C_{3y})^2 + (C_{1z} - C_{3z})^2 &= l_3^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Tüm vektörler tanım gereği birim küre üzerinde olduklarından $C_{1x}^2 + C_{1y}^2 + C_{1z}^2 = 1$, $C_{2x}^2 + C_{2y}^2 + C_{2z}^2 = 1$ ve $C_{3x}^2 + C_{3y}^2 + C_{3z}^2 = 1$ eşitlikleri yazılabilir. Bunları Eşitlik (7)'de yerine koyarsak aşağıdaki denklem takımını elde ederiz.

$$\left. \begin{aligned} C_{1x}C_{2x} + C_{1y}C_{2y} + C_{1z}C_{2z} &= 1 - l_1^2/2 \\ C_{2x}C_{3x} + C_{2y}C_{3y} + C_{2z}C_{3z} &= 1 - l_2^2/2 \\ C_{1x}C_{3x} + C_{1y}C_{3y} + C_{1z}C_{3z} &= 1 - l_3^2/2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Eğer Eşitlik (8)'deki vektör bileşenleri yerine Eşitlik (6)'daki karşılıklarını koyarsak ve β_{31} , β_{32} ve β_{33} yerine sırasıyla δ_1 , δ_2 ve δ_3 değişkenlerini kullanırsak aşağıdaki eşitliği elde ederiz.

$$\left. \begin{aligned} K_{11}S\delta_1S\delta_2 + K_{12}S\delta_1C\delta_2 + K_{13}C\delta_1S\delta_2 + K_{14}C\delta_1C\delta_2 + K_{15}S\delta_1 + K_{16}C\delta_1 + K_{17}S\delta_2 + K_{18}C\delta_2 + K_{19} &= 0 \\ K_{21}S\delta_2S\delta_3 + K_{22}S\delta_2C\delta_3 + K_{23}C\delta_2S\delta_3 + K_{24}C\delta_2C\delta_3 + K_{25}S\delta_2 + K_{26}C\delta_2 + K_{27}S\delta_3 + K_{28}C\delta_3 + K_{29} &= 0 \\ K_{31}S\delta_1S\delta_3 + K_{32}S\delta_1C\delta_3 + K_{33}C\delta_1S\delta_3 + K_{34}C\delta_1C\delta_3 + K_{35}S\delta_1 + K_{36}C\delta_1 + K_{37}S\delta_3 + K_{38}C\delta_3 + K_{39} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Eşitlik (9)'daki durağan katsayılar EK-2'de verilmiştir. Eşitlik (9)'u daha da sadeleştirmek için $S\delta_i = 2t_i/(1+t_i^2)$, $C\delta_i = (1-t_i^2)/(1+t_i^2)$, $t_i = \tan(\delta_i/2)$, ($i=1,2,3$) şeklindeki Tanjant-yarım-açı eşitliklerini kullanarak,

$$\left. \begin{aligned} L_{11}t_1^2t_2^2 + L_{12}t_1^2t_2 + L_{13}t_1t_2^2 + L_{14}t_1t_2 + L_{15}t_1^2 + L_{16}t_2^2 + L_{17}t_1 + L_{18}t_2 + L_{19} &= 0 \\ L_{21}t_2^2t_3^2 + L_{22}t_2^2t_3 + L_{23}t_2t_3^2 + L_{24}t_2t_3 + L_{25}t_2^2 + L_{26}t_3^2 + L_{27}t_2 + L_{28}t_3 + L_{29} &= 0 \\ L_{31}t_1^2t_3^2 + L_{32}t_1^2t_3 + L_{33}t_1t_3^2 + L_{34}t_1t_3 + L_{35}t_1^2 + L_{36}t_3^2 + L_{37}t_1 + L_{38}t_3 + L_{39} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

denklemlerini elde ederiz. Buradaki durağan katsayılar EK-3'de verilmiştir. Eşitlik (10), üç bilinmeyenli üç denklemden oluşan ve doğrusal olmayan bir denklem takımıdır.

4. SAYISAL ÖRNEK

Bu bölümde durağan katsayıları $\alpha_2 = \{30, 30, 30\}^T$, $\alpha_3 = \{30, 30, 30\}^T$ ve $\beta_2 = \{90, 90, 90\}^T$ olarak verilen bir düzeneğin giriş açılarının $\alpha_1 = \{0, 120, 240\}^T$ olarak verilmesi durumunda β_3 çıkış açıları hesaplanmıştır. Bunun için önce EK-1'deki a_{ij} , b_{ij} ve c_{ij} ($i=1,2,3; j=1,2,3$) katsayıları, daha sonra sırasıyla EK-2'deki K_{ij} ($i=1,2,3; j=1,2,\dots,9$) ve EK-3'deki L_{ij} ($i=1,2,3; j=1,2,\dots,9$) katsayıları hesaplanmıştır. Bulunan L_{ij} katsayıları Eşitlik (10)'daki yerlerine konularak MATLAB programı yardımı ile t_i ($i=1,2,3$) değerleri hesaplanmıştır. Verilere bağlı olarak 16 farklı kökün 14 tanesi sanal 2 tanesi gerçel çıkmıştır. Bu 2 gerçel çözümün $\delta_i = 2 \tan^{-1}(t_i)$ ters dönüşümü alınarak $(\delta_i)_1 = 27.67232096(^{\circ})$ ve $(\delta_i)_2 = -27.67232096(^{\circ})$ ($i=1,2,3$) değerleri bulunmuştur.

5. SONUÇ

Seri ve paralel robotik düzenekler için genel olarak kabul gören bir kurala göre, seri düzeneklerde geriye doğru kinematik çözümlenme, paralel düzeneklerde ise ileriye doğru kinematik çözümlenme daha zordur. Bu zorluk problemin çözüm kümesinin eleman sayısında yatmaktadır. Bu çalışmada verilen platform tipi paralel düzenek için geriye doğru çözümlenmenin daha kolay olduğu Şekil-3'den kolayca anlaşılmaktadır. Bu şekilde tüm durağan katsayıların ve C vektörünün verildiğini varsayalım. B vektörünün yeri hem C 'den α_3 kadarlık açısız bir uzaklıkta hem de α_1 'in değişmesi ile oluşan tabana paralel bir çember üzerinde olmalıdır. Uzayda kesişen ve özdeş olmayan iki çember en çok iki noktada kesişeceğinden her iki koşulu da sağlayan iki çözüm vardır. Platformun konumu verildiğinde giriş açılarını veren denklemler birbirinden bağımsız üç tane ikinci dereceden denklemdir ve analitik çözümü vardır. Oysa üç giriş açısı verilen düzenekte platformun konumunu bulmak 16. dereceden polinomun çözümünü gerektirmektedir. Bilindiği gibi 4. derecenin üzerindeki polinom çözümlerinin analitik çözümü yoktur ve sayısal olarak çözülmek zorundadır.

Bu çalışmada tanıtılan 3 serbestlik dereceli platform tipli $3P_2RR$ küresel düzenek özgün bir tasarım olup bu tasarıma ilişkin ilgili yazında herhangi bir çalışma saptanamamıştır. Bu çalışmanın yazarları, bazı nedenlerden dolayı bu düzeneğin BSD araçlarında kullanım için çok uygun olduğunu düşünmektedirler. Bu nedenler aşağıda sıralanmıştır:

- a) Seri robotlarda çalışma uzayı robotun etrafında oluşmaktadır. Bu nedenle robotun kendisi bir ölü bölge oluşturmakta ve bu boşlukta çalışmayı olanaksız hale getirmektedir. Oysa önerilen bu düzeneğin geometrisinden dolayı iç kısımda küresel bir boşluk oluşmakta ve bu da küre merkezine yerleştirilen iş parçasının her tarafına erişilmesini sağlamaktadır.
- b) Küresel robotlarda tüm çubuk boyları açisal olarak verilmektedir. Bütün kinematik çözümlene denklemleri birim küre varsayımına göre hesaplanmaktadır. Bu nedenle küresel düzenekler ölçeklenebilir düzeneklerdir. Yani gereksinmeye göre farklı büyüklükler için tasarlanacak küresel düzeneklerde tamamen aynı denklemler kullanılabilir.
- c) Genellikle seri robotik düzenekler daha büyük bir iş boşluğuna sahiptir. Bu paralel düzenekler için bir zayıflık gibi değerlendirilebilse bile daha yüksek duyarlılık gerektiren işlerde bir üstünlük sağlamaktadır. Çünkü devinmekte olan uç işlemcisi durağan çerçeveye birden fazla ayak ile bağlanmakta ve bu da hem kuvvetin ayaklara paylaştırılması nedeni ile yükü dağıtmakta hem de yatak boşluklarının karşılıklı olarak birbirlerini yoketmelerine yolaçmaktadır. Bu da yapılan işin duyarlılığını arttırmaktadır.
- d) Bu çalışmada önerilen düzenek durağan çerçeveye çenbersel kayar mafsallar ile bağlanmıştır. Bu da, genellikle kullanılan **3RRR** tipi küresel düzeneklerde olmayan önemli bir üstünlüğü beraberinde getirmektedir. Uç işlem birimi herhangi bir engelle karşılaşmaksızın iş parçasının etrafında sürekli olarak dönebilmektedir. Bu tür bir sonsuz devinim Şekil-4'den kolayca görülebileceği gibi A_1 mafsallarının, kendi aralarındaki açisal uzaklıkları değiştirmeden aynı yönde ve aynı oranda dönmeleriyle sağlanabilmektedir.
- e) Bu düzeneğin kullanım yeri olarak ilk akla gelen talaşlı üretim amaçlı kullanmaktır. Ancak olanaklar bununla sınırlı değildir. Platformun kendi eksenini etrafında da dönebilmesi yüzünden uç işlem birimi oldukça esnek yörüngeler üzerinde devinebilmektedir. Uç işlem biriminin kesici takım yerine bir ışın kaynağı olması yoluyla örneğin kafa tomografisi gibi tıbbi uygulamalar da düşünülebilir. Düzeneğin içindeki küresel boşluk özellikle insanın kafa anatomisi için bu düzeneği uygun yapmaktadır. Ayrıca bu düzenek insansı robotlarda omuz düzeneği olarak da kullanılabilir.
- f) Düzeneğin geometrisinden dolayı uç işlem birimi eksenini de küre merkezinden geçmektedir. Eğer uç işlem birimi kürenin merkezine olabildiğince çok yaklaştırılırsa iş boşluğu o oranda azalacaktır ancak diğer yandan bu değişiklik düzeneği çok küçük ölçekli işleme (micro-machining) için daha uygun duruma getirecektir.

Yukarıda sayılan nedenler bu çalışmada çözümlenmesi yapılan düzeneğin uygulama alanlarının çok geniş olabileceği üzerinde bir fikir vermektedir. Bu nedenle Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde bu düzeneğin ilkörneğinin (prototipinin) üretilmesi için bir proje çalışması başlatılmıştır. Böylece gerçek bir örnek üzerinde yapılacak çalışmalar uygulamada çikabilecek sorunlar üzerinde daha iyi bir fikir edinmeyi olanaklı kılacaktır.

6. KAYNAKÇA

- [1] Alizade, R. I., Tagiyev, N. R., Duffy, J., "A Forward and Reverse Displacement Analysis of an In-parallel Spherical Manipulator", Mechanism and Machine Theory, 29(1), pp. 125-137, 1994.
- [2] Gosselin, C. M., Hamel J. F., "Agile eye: a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device", Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 781—786, 1994, San Diego.
- [3] Ge, Q. J., Larochele, P., "Algebraic motion approximation with NURBS motions and its application to spherical mechanism synthesis", ASME Journal of Mechanical Design, 121(4), pp. 529-532, 1999.
- [4] Alizade, R. I., Kilit, Ö., "Analytical synthesis of function generating spherical four-bar mechanism for the five precision points", Mechanism and Machine Theory, 40(7), pp. 863-878, 2005.
- [5] McCarthy, J. M., "Geometric Design of Linkages", pp. 116, Springer-Verlag, New York, 2000.
- [6] Tsai, L. W., "Robot Analysis-The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators", pp. 28, John Wiley & Sons Inc., 1999.

[7] Kim, J., Park, C., Ryu, S. J., Kim, J., Hwang, J. C., Park, C., Iurascu, C.C., "Design and Analysis of a Redundantly Actuated Parallel Mechanism for Rapid Machining", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 17(4), pp. 423-434, 2001.

[8] Kim, J., Hwang, J. C., Kim, J. S., Iurascu, C. C., Park, F. C., and Cho, Y. M., "Eclipse II: A new Parallel Mechanism Enabling Continuous 360-Degree Spinning Plus Three-Axis Translational Motions", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 18(3), 2002.

[9] Kilit, Ö., "Classification of Spherical Linkages with Circular Sliding Joint", submitted to Journal of Mechanical Design (under review).

EK-1 EŞİTLİK(6)'NİN KATSAYILARI

$$\begin{aligned} a_{1i} &= S\alpha_{1i}S\alpha_{3i}S\beta_{2i}; b_{1i} = -C\alpha_{1i}S\alpha_{2i}S\alpha_{3i} - S\alpha_{1i}C\alpha_{2i}S\alpha_{3i}C\beta_{2i}; c_{1i} = C\alpha_{1i}C\alpha_{2i}C\alpha_{3i} - S\alpha_{1i}S\alpha_{2i}C\alpha_{3i}C\beta_{2i}; \\ a_{2i} &= -C\alpha_{1i}S\alpha_{3i}S\beta_{2i}; b_{2i} = C\alpha_{1i}C\alpha_{2i}S\alpha_{3i}C\beta_{2i} - S\alpha_{1i}S\alpha_{2i}S\alpha_{3i}; c_{2i} = S\alpha_{1i}C\alpha_{2i}C\alpha_{3i} + C\alpha_{1i}S\alpha_{2i}C\alpha_{3i}C\beta_{2i}; \\ a_{3i} &= S\alpha_{3i}C\beta_{2i}; b_{3i} = C\alpha_{2i}S\alpha_{3i}S\beta_{2i}; c_{3i} = S\alpha_{2i}C\alpha_{3i}S\beta_{2i} \quad (i=1,2,3) \end{aligned}$$

EK-2 EŞİTLİK (9)'UN KATSAYILARI

$$\begin{aligned} K_{11} &= a_{11}a_{12} + a_{21}a_{22} + a_{31}a_{32}; K_{12} = a_{11}b_{12} + a_{21}b_{22} + a_{31}b_{32}; K_{13} = b_{11}a_{12} + b_{21}a_{22} + b_{31}a_{32}; \\ K_{14} &= b_{11}b_{12} + b_{21}b_{22} + b_{31}b_{32}; K_{15} = a_{11}c_{12} + a_{21}c_{22} + a_{31}c_{32}; K_{16} = b_{11}c_{12} + b_{21}c_{22} + b_{31}c_{32}; \\ K_{17} &= c_{11}a_{12} + c_{21}a_{22} + c_{31}a_{32}; K_{18} = c_{11}b_{12} + c_{21}b_{22} + c_{31}b_{32}; K_{19} = c_{11}c_{12} + c_{21}c_{22} + c_{31}c_{32} + l_1^2/2 - 1 \\ K_{21} &= a_{12}a_{13} + a_{22}a_{23} + a_{32}a_{33}; K_{22} = a_{12}b_{13} + a_{22}b_{23} + a_{32}b_{33}; K_{23} = b_{12}a_{13} + b_{22}a_{23} + b_{32}a_{33}; \\ K_{24} &= b_{12}b_{13} + b_{22}b_{23} + b_{32}b_{33}; K_{25} = a_{12}c_{13} + a_{22}c_{23} + a_{32}c_{33}; K_{26} = b_{12}c_{13} + b_{22}c_{23} + b_{32}c_{33}; \\ K_{27} &= c_{12}a_{13} + c_{22}a_{23} + c_{32}a_{33}; K_{28} = c_{12}b_{13} + c_{22}b_{23} + c_{32}b_{33}; K_{29} = c_{12}c_{13} + c_{22}c_{23} + c_{32}c_{33} + l_2^2/2 - 1 \\ K_{31} &= a_{11}a_{13} + a_{21}a_{23} + a_{31}a_{33}; K_{32} = a_{11}b_{13} + a_{21}b_{23} + a_{31}b_{33}; K_{33} = b_{11}a_{13} + b_{21}a_{23} + b_{31}a_{33}; \\ K_{34} &= b_{11}b_{13} + b_{21}b_{23} + b_{31}b_{33}; K_{35} = a_{11}c_{13} + a_{21}c_{23} + a_{31}c_{33}; K_{36} = b_{11}c_{13} + b_{21}c_{23} + b_{31}c_{33}; \\ K_{37} &= c_{11}a_{13} + c_{21}a_{23} + c_{31}a_{33}; K_{38} = c_{11}b_{13} + c_{21}b_{23} + c_{31}b_{33}; K_{39} = c_{11}c_{13} + c_{21}c_{23} + c_{31}c_{33} + l_3^2/2 - 1 \end{aligned}$$

EK-3 EŞİTLİK(10)'UN KATSAYILARI

$$\begin{aligned} L_{11} &= K_{14} - K_{16} - K_{18} + K_{19}; L_{12} = -2K_{13} + 2K_{17}; L_{13} = -2K_{12} + 2K_{15}; L_{14} = 4K_{11}; \\ L_{15} &= -K_{14} - K_{16} + K_{18} + K_{19}; L_{16} = -K_{14} + K_{16} - K_{18} + K_{19}; L_{17} = 2K_{12} + 2K_{15}; L_{18} = 2K_{13} + 2K_{17}; \\ L_{19} &= K_{14} + K_{16} + K_{18} + K_{19}; L_{21} = K_{24} - K_{26} - K_{28} + K_{29}; L_{22} = -2K_{23} + 2K_{27}; L_{23} = -2K_{22} + 2K_{25}; \\ L_{24} &= 4K_{21}; L_{25} = -K_{24} - K_{26} + K_{28} + K_{29}; L_{26} = -K_{24} + K_{26} - K_{28} + K_{29}; L_{27} = 2K_{22} + 2K_{25}; \\ L_{28} &= 2K_{23} + 2K_{27}; L_{29} = K_{24} + K_{26} + K_{28} + K_{29}; L_{31} = K_{34} - K_{36} - K_{38} + K_{39}; L_{32} = -2K_{33} + 2K_{37}; \\ L_{33} &= -2K_{32} + 2K_{35}; L_{34} = 4K_{31}; L_{35} = -K_{34} - K_{36} + K_{38} + K_{39}; L_{36} = -K_{34} + K_{36} - K_{38} + K_{39}; \\ L_{37} &= 2K_{32} + 2K_{35}; L_{38} = 2K_{33} + 2K_{37}; L_{39} = K_{34} + K_{36} + K_{38} + K_{39}. \end{aligned}$$