

6 Serbestlik dereceli 6-3, özel yapı 6-3 ve 6-4 paralel mekanizmaların genişletilmiş çalışma uzayı analizi

Hüseyin ALP*, İbrahim ÖZKOL

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojisi Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Paralel mekanizmalar kapalı çevrim yapılarıdır. Paralel mekanizmalarda hareketli platform, sabit platforma en az iki noktada birbirinden bağımsız kinematik bağlantı elemanlarıyla bağlıdır. Paralel mekanizmaların avantajları yüksek katılık, hassasiyet, doğruluk, yük taşıma kapasitesi ve yüksek hız uygulamalarında çalışabilme olarak sıralanabilir. Fakat çalışma uzayları seri mekanizmalara göre daha küçüktür. Stewart Platform Mekanizması (SPM), ilk olarak 1965 yılında D. Stewart tarafından uçuş simülatörü olarak önerilen en meşhur paralel manipülatördür. Bu çalışmada iki farklı tip olan 6-3, özel yapı 6-3 SPM ve 6-4 SPM kullanılmıştır. 6-3 SPM'si sabit ve hareketli platformdan oluşmaktadır. 6 adet lineer eyleyici sabit platforma 6 noktadan universal mafsallarla ve üst platforma 3 noktadan küresel mafsallarla bağlanmıştır. Ardışık lineer eyleyiciler ikili grup halinde birbirine bağlanarak üst platforma üç noktadan bağlanmışlardır. Aynı zamanda 6-4 SPM'de sabit ve hareketli platformdan oluşmaktadır. 6 adet lineer eyleyici sabit platforma 6 noktadan universal mafsallarla ve üst platforma 4 noktadan küresel mafsallarla bağlanmıştır. Çalışma uzayı analizine örnek olarak, 6-3 SPM, özel yapı 6-3 SPM ve 6-4 SPM'lerin ters kinematik analizleri yapılmıştır. Bu denklemler Matematica ve Matlab programları kullanılarak çözülmüştür. 6-3 SPM, özel yapı 6-3 SPM ve 6-4 SPM'lerin yönelme çalışma uzayı analizleri Euler açıları temeline dayanan ayrıklaştırma metodu kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yorumlama açısından kolay olması için, silindirik koordinatlara dönüştürülerek yönelme çalışma uzayı grafikleri çizdirilmiştir. 6-3 SPM, özel yapı 6-3 SPM ve 6-4 SPM'lerin yönelme çalışma uzayları karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda hareketli platformun alanı değiştirilerek 6-3 ve 6-4 SPM'lerin çalışma uzayları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Paralel mekanizmalar, çalışma uzayı, Stewart Platformu.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hüseyin ALP. alphu@itu.edu.tr; Tel: (212) 294 29 00.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojisi Programında tamamlanmış olan "Heuristik Yöntemler Kullanılarak Paralel Mekanizmaların Çalışma Uzayı Analizi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 22.01.2007 tarihinde dergiye ulaşılmış, 19.04.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 01.03.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Extended workspace analysis of 6-3 SPM, the particular 6-3 SPM and 6-4 SPM

Extended abstract

Parallel mechanisms, which are closed loop mechanisms, consist of a base platform, a moving platform, and at least two links actuated in parallel. The Stewart Platform Mechanism (SPM), which is originally proposed by D. Stewart as a flight simulator in 1965, is the most renowned parallel manipulator. In 1949, the first working parallel mechanism was designed by Gough. For this reason, such a parallel mechanism is sometimes referred to as the Gough-Stewart Platform. Hunt suggested using parallel manipulators in robotic applications due to their advantages.

Recent advances in high-precision technology necessitated the replacement of serial mechanisms by parallel working mechanisms in many industrial applications. The advantages of parallel manipulators are high rigidity, precision, accuracy, load carrying capacity, stiffness, ability to be utilized in high speed applications and ease of control are given in literature by many authors. However, the workspace of parallel mechanism is smaller than serial mechanism. In addition to this, a number of studies on parallel mechanisms, often on the 3 degrees of freedom (DOF) and 6 DOF types exist in open literature. 6-3 SPM, studied in this thesis, consists of a fixed base platform and a mobile platform. Six linear actuators are connected to the base at six points via universal joints and to the top platform at three points via spherical joints. Consecutive linear actuators are attached to each other in groups of two so that there are three points of attachment to the top platform. The particular 6-3 SPM's moving platform is connected to spherical joints via small rods. 6-4 SPM also consists of a base platform and a mobile platform. Six linear actuators are connected to the base at six points via universal joints and to the top platform at four points via spherical joints. These structures are called 6-UPS (Universal-Prismatic-Spherical) mechanisms due to the types of joints in the architecture. Both platforms have 6 DOF, ability to move positional and orientation in 3 directions.

To give a model for the workspace analysis of 6-3 SPM, the particular 6-3 SPM and 6-4 Stewart platform mechanisms kinematics are carried out. Work-

space analysis of parallel mechanisms is not generalized so far in literature. However, many problems, like small workspace, poor dexterity and difficulty in design are still open for an efficient exploitation of the concept. Most of the studies in the literature examined two dimensional orientation workspace. Some other studies cover only the boundary scanned 3D orientation workspace.

In literature, workspace analysis methods are classified into 3 main groups as the discretization method, geometrical method and the Jacobian matrix technique. After carrying out kinematic analysis, discretization method, which is based on Euler angles, is used to represent the orientation workspace of 6-3 SPM, the particular 6-3 SPM and 6-4 SPM. In order to simplify interpretation, the orientation workspace is illustrated in a cylindrical coordinate system. The orientation workspaces of the 6-3 SPM, the particular 6-3 SPM, and the 6-4 SPM are compared. In this study, the method used is fully scanned orientation workspace, which is extended, in the mostly workable direction for 6-3 SPM, the particular 6-3 SPM and 6-4 SPM.

Possible gaps, which are omitted in representation of boundary orientation workspace, can be realized in fully scanned orientation workspace. For these types of working mechanisms, i.e. a mechanical tool used material processing the determination of the points, which makes the workspace maximum be outlined. The workspace of the 6-4 mechanism with trapezoidal upper platform is larger than that of the 6-3 mechanisms with triangular upper platform. However, in the case of the 6-4 mechanism, there are greater gaps within the workspace. Even though the workspace of the 6-4 mechanism is greater than that of the 6-3 mechanism, the trapezoid platform cannot reach every point in the vicinity of C, gravity centre, and at the boundaries of the workspace. A 6-3 SPM should be preferred if it is desired to work close to C and the boundaries of the workspace as in flight simulator case. In addition, a triangular moving platform is structurally more stable than a trapezoidal moving platform. When greater or distributed loads need to be carried by the mechanism, such as in the case of heavy loads lifting, a trapezoidal moving platform should be preferred.

Keywords: Parallel mechanism, workspace analysis, Stewart Platform.

Giriş

Teknolojideki son gelişmeler ile birlikte yüksek hassasiyet gerektiren birçok endüstriyel uygulamalarda paralel mekanizmalar seri mekanizmaların yerine geçmiştir. Paralel mekanizmalar aşırı yük taşıma kapasitesi, yüksek dayanım, yüksek doğruluk, kararlılık, yüksek hız uygulamalarında çalıştırılabilirlik, iyi bir dinamik performans, hassas konumlanma ve kolay kontrol edilmesi (Dasgupta vd., 2000) gibi özellikleri son yıllarda birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur ve bu özelliklerinden dolayı seri mekanizmalara karşı tercih edilen mekanizmalardır. Paralel mekanizmaların sık kullanıldığı başlıca alanlar aşağıdaki gibidir:

- Talaşlı imalat, (Wang vd., 2001)
- Tıbbi operasyonlar
- Robot kol uç organı, (Jeong vd., 1999)
- Oyun simülatörleri,
- Petrol platformları,
- Ağır yük taşımacılığı (helikopterle),
- Hafif metal işleme,
- Cilalama,
- Kesme,
- Şekil verme ve montaj işlemleri
- Uçuş simülatörleri (Luh vd., 1996)

Bu çalışmada 6-3, özel yapıdaki 6-3 ve 6-4 Stewart platform mekanizmaları kullanılmıştır. 6 serbestlik dereceli (SD) mekanizmalar için var olan çalışmaları biraz daha genişleterek çalışma uzay probleminin kolay anlaşılmasına ve çözülmesine ışık tutacak niteliktedir. Bu çalışmada kullanılan SPM'ler en çok hareket yönüne sahip z eksenini yönünde yukarı ve aşağıya hareket ettirilerek çalışma uzayı analizinin değişimi gözlenmiştir. Literatürde bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, çalışma uzayı analizinde kullanılan yöntem, çalışma uzayı verilerinin gösterimini tam anlamıyla ifade edecek ve göze hoş gelecek bir biçim üzerinde ortak görüşe varılamamıştır. Bu çalışmada 6-3, özel yapıdaki 6-3 ve 6-4 SPM'lerin yönelme çalışma uzayı analizleri Euler açıları (Gosselin, 1990) temeline dayanan ayrıklaştırma metodu kullanılarak ya-

pılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yorumlama açısından kolay olması için, silindirik koordinatlara dönüştürülerek yönelme çalışma uzayı grafikleri çizdirilmiştir. 6-3, özel yapıdaki 6-3 ve 6-4 SPM'lerin yönelme çalışma uzayları karşılaştırılmıştır.

Paralel mekanizmalar

Paralel mekanizmalar, hareketli platformu sabit platforma en az iki noktada birbirinden bağımsız kinematik bağlantı elemanlarıyla bağlayan kapalı çevrimli yapılar olarak tanımlanmaktadır. Stewart platform mekanizması, ilk olarak 1965 yılında D. Stewart tarafından uçuş simülatörü olarak önerilen en meşhur paralel manipülatördür. Gough (Dasgupta vd., 2000), hareketli platformun 6 adet lineer eyleyici ile sabit platforma bağlanmasını önermiştir. Böylece tamamen paralel olarak çalışan elemanlardan oluşan bu mekanizmalar Stewart-Gough Platform ismini almıştır. İlk defa Hunt (Alp vd., 2004) tarafından seri robotlara göre yüksek taşıma kapasitesi ve yüksek doğruluk gibi avantajlarından dolayı uçuş simülatörlerinde kullanılan paralel mekanizmaların robotik uygulamalarında kullanılması önerilmiştir.

Uçuş simülatörlerinde kullanılan paralel mekanizmalarda hareketli platform için üst platform, sabit platform için ise taban platform ifadesi kullanılmaktadır. Üst platform, taban platforma göre 6 serbestlik derecesine sahiptir. Bazı uygulamalarda ise hareketli platformun tabanda, sabit platformun üstte olduğu görülmektedir. Petrol platformları, tıbbi operasyonlarda kullanılan paralel mekanizmalar bu tip kullanım alanlarına örnek gösterilebilir. Bu çalışmada Şekil 1 de görülen 6-3, özel yapı 6-3 SPM ve 6-4 SPM'leri kullanılmıştır. 6-3 SPM'si sabit ve hareketli platformdan oluşmaktadır. 6 adet lineer eyleyici sabit platforma 6 noktadan üniversal mafsallarla ve üst platforma 3 noktadan küresel mafsallarla bağlanmıştır. Ardışık lineer eyleyiciler ikili grup halinde birbirine bağlanarak üst platforma üç noktadan bağlanmışlardır. Özel yapı olan 6-3 SPM de ise (Yurt, 2002) hareketli platform küresel mafsallara doğrudan değil Şekil 1' de görüldüğü

Kinematik analiz

Hareketli mekanizmalarda kinematik analiz düz ve ters kinematik analiz diye 2 grupta sınıflandırılır. Düz kinematik analizde problem bacak uzunlukları verildiğinde uç organın veya hareketli platformun ağırlık merkezinin konumunu (öteleme ve yönelme) bulmaktır. Ters kinematik analizde problem ise hareketli platformun ağırlık merkezinin konumu verildiğinde bacak uzunluklarının bulunmasıdır. Paralel mekanizmaların düz kinematik analizi seri mekanizmalara göre daha karmaşıktır. Ters kinematik analizi ise seri mekanizmalara göre daha kolaydır. Bu çalışmada çalışma uzayı analizi yapılırken düz kinematik denklemlerinin çözümüne gerek olmadığı için burada verilmeyecektir.

Genel bir SPM’de ters kinematik problem, hareketli platformun verilen bir konum ve yönelmesi için bacak uzunluklarının bulunması olarak tanımlanabilir. Bir yörüngeyi gerçek zamanda takip etmek gerekirse hareketli platformun her noktası için ters kinematik denklemlerinin anlık ve sürekli olarak çözülmesi gereklidir. Düz kinematik problem çözümü aksine ters kinematik problemin çözümü tektir, yani verilen hareketli platformun konum ve yönelmesi için bacak boyları çözüm kümesi tekdir. Paralel mekanizmaların önceden de bahsedildiği gibi ters kinematik analizi düz kinematik analizi göre daha kolaydır.

$$R = R_z \cdot R_y \cdot R_x \quad (1)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -\sin \varphi \cos \psi & \sin \varphi \sin \psi \\ \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \psi & -\sin \psi \cos \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \quad (2)$$

Bu çalışmada 6-3, özel yapı 6-3 ve 6-4 SPM’lere ait ters kinematik denklemler hesaplanmıştır. Ters kinematik denklemler hesaplanırken ilk önce R dönme matrisi ve t öteleme vektörü ile hareketli platformun konumu ifade edilir.

R dönme matrisi ve t öteleme vektörü kullanılarak hareketli platformun C eksen takımına göre olan köşe noktaları \mathbf{p}_j (6-3 SPM için ($j=1..3$), 6-4 SPM için ($j=1..4$)), sabit platforma bağlı sabit eksen takımındaki ifadeleri \mathbf{P}_j denklem (3) kullanılarak elde edilir. Daha sonra sabit platformun köşe noktaları B_i $i=1..6$ bulunur. Böylece L_i bacak uzunlukları P_j ve B_i denklemleri ve \mathbf{L}_i bacak vektörü kullanılarak hesaplanır.

$$\mathbf{P}_j = \mathbf{R}\mathbf{p}_j + \mathbf{t} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (3)$$

Alt platformun köşe noktalarının sabit eksen takımındaki koordinatlarını B_i ile göstermiştik. Alt ve üst platformun köşe noktalarının sabit eksen takımındaki ifadeleri kullanılarak bacak vektörü L_i bulunur.

$$L_i = P_j - B_i \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

Böylece ters kinematik denklemler

$$l_i^2 = \mathbf{L}_i \cdot \mathbf{L}_i \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece hareketli platformun verilen her hangi bir yönelmesi için bacak uzunlukları yukarıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

Çalışma uzayı analizi

Genel olarak çalışma uzayı bir paralel manipülatör için hareketli platformun ağırlık merkezine seri manipülatör için ise uç organına yerleştirilen koordinat sisteminin merkezinin uzayda ulaşabileceği noktalar kümesi veya bölge diye tanımlanır. Çalışma uzayı büyüklüğü bir paralel veya seri mekanizmanın performansını (Synman vd., 2000) belirlemedeki en önemli kriterlerden biridir.

Literatürden görüleceği gibi çalışma-uzayı konusunda yapılan araştırmalar 2 ana grupta toplanmıştır. Bunlardan birincisi hareketli platformun belli bir yönelmede sabit tutulup x, y ve z eksenlerinde yapabileceği ötelemelerin sınırlarını gösteren **konumsal** çalışma uzayı analizidir (Synman vd., 2001). İkinci grup ise incelenen hareketli platformun ağırlık merkezi sabit bir

noktada tutulup x, y ve z eksenlerine göre yapabileceği yönelmelerin sınırlarını gösteren yönelme çalışma uzayıdır. Genel olarak çalışma uzayı analizi yapılırken yalnızca ötelenme veya dönme serbestliğine sahip yapılar incelenmektedir. Çünkü 6 yönde hareket etmesi istenilen bir paralel mekanizma, biri yalnızca öteleme diğeri yalnızca dönme hareketi yapan 2 adet paralel mekanizmanın (Lee vd., 2000) seri bağlanması ile elde edilebilir. Son yıllarda yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu yönelme çalışma uzayı (Bonev vd., 2001) üzerinedir. Yönelme çalışma uzayı analizinin hesaplanmasında kullanılan yöntemler 3 ana grupta (Gosselin, 1990) sınıflandırılmıştır. Ayrıklaştırma yöntemi, Geometrik yöntem ve Jakobyen yöntemidir. Genel olarak konumsal çalışma uzayı analizinde geometrik yöntem (Merlet, 1995) kullanılmaktadır. Bununla birlikte birçok mühendislik uygulamalarında yönelme çalışma uzayı analizi göz önüne alınmak zorundadır. Çünkü birçok uygulamada örneğin uçak simülatörleri, metal işleme v.b.hareketli platform yönelme hareketine maruz kalmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada 6 serbestlik derecesine sahip 6-3, özel yapı 6-3 ve 6-4 SPM yapılarının çalışma uzayı analizinde ayrıklaştırma metodu tercih edilmiştir.

Paralel mekanizmalar konusunda yapılan çalışma uzayı analizinin gerçekleştirilebilir ve kullanışlı olması için, bu uzayın sınırlandırılmasında başkın rol oynayan piston uzunlukları ve mafsal açılarının endüstride kullanılan ürünlere göre belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple bu çalışma yapılırken paralel mekanizmaların limitlerinin hesaplanmasında ana parametre olarak yer alan endüstriyel standartlardaki pinömatik silindirler, üniversal mafsallar ve küresel mafsallar örnek olarak seçilmiştir. Curtisüniversal ve Festo firmasına ait seçilen ürünlerin limit değerleri Tablo 1’ de verilmiştir.

Simülasyon için Tablo 1 de verilen değerler kullanılarak ters kinematik denklemler çözüldü ve aşağıda verilen algoritma kullanılarak çalışma uzayı analizi Matlab 6.5 üzerinde Pentium 4 2.6 Ghz HT işlemcili, 512 Mb Dual DDRAM HT özellikli bir PC üzerinde geliştirilen program ile yapıldı. Elde edilen sonuçlar yorumlama açısından kolay olması için Şekil 2, 3 ve 4 de görül-

düğü gibi silindirik koordinatlara dönüştürülerek Matlab programında çizdirildi.

Tablo 1. Mafsal limit değerleri

Mafsal Tipi	Min.	Max.
θ_p	-35°	35°
θ_b	-45°	45°
L_i	1200 mm	2200 mm

Stewart platform mekanizmalarının çalışma uzayı analizi yapılırken aşağıdaki adımlar takip edilmiştir:

1. Bir SPM’in çalışma uzayını hesaplamak için öncelikle paralel mekanizmanın ters kinematik denklemleri çözülerek başlangıç konumu bacak uzunlukları L_i hesaplanır.

$$L_i = P_j - B_i \quad (i=1\dots 6) \quad (j=1\dots 6) \quad (6)$$

2. Başlangıç konumu için N_i ($i=1\dots 6$) vektörü hesaplanır. (Üniversal ve Küresel mafsal açı değerlerini hesaplamak için)

$$N_i = \text{transpose}[(P_j - B_i)/L_i] \quad (i=1\dots 6, j=1\dots 3) \quad (7)$$

3. Hareketli platforma $\pm 45^\circ$ derece aralığında 0.5 derecelik adımlar ile x, y, ve z eksenlerinde sırasıyla ϕ , θ , ve ψ dönme-leri yaptırılarak yeni bacak uzunlukları ve NL_i vektörü hesaplanır.

$$NL_i = [(P_j - B_i)/L_i] \quad (8)$$

$$i=1\dots 6, j=1\dots 3 \quad (6-3 \text{ SPM}) \quad j=1\dots 4 \quad (6-4 \text{ SPM})$$

4. Hesaplanan L_i eklem uzunlukları Tablo 1’de verilen sınır değerler içinde olup olmadığı kontrol edilir.

$$L_{i \min} \leq L_i \leq L_{i \max} \quad i=1, 2, \dots, 6$$

5. Her bir adımda hesaplanan üniversal mafsal açı değerleri Tablo 1’ de verilen sınır değerler içinde olup olmadığı kontrol edilir.

$$\theta_{b_i} = \text{ArcCos}(N_i \cdot NL_i) \quad (i=1..6) \quad (9)$$

Üniversal mafsal açı değerleri

$$\theta_{b_i \min} \leq \theta_{b_i} \leq \theta_{b_i \max} \quad i=1, 2, \dots, 6$$

6. Her bir adımda hesaplanan küresel mafsal açı değerleri Tablo 1' de verilen sınır değerler içinde olup olmadığı kontrol edilir.

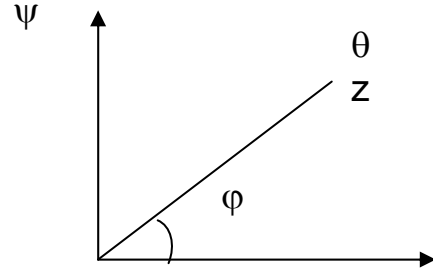
$$\theta_{p_i} = \text{ArcCos}(N_i \cdot R \cdot NL_i) \quad (i=1..6) \quad (10)$$

Küresel mafsal açı değerleri

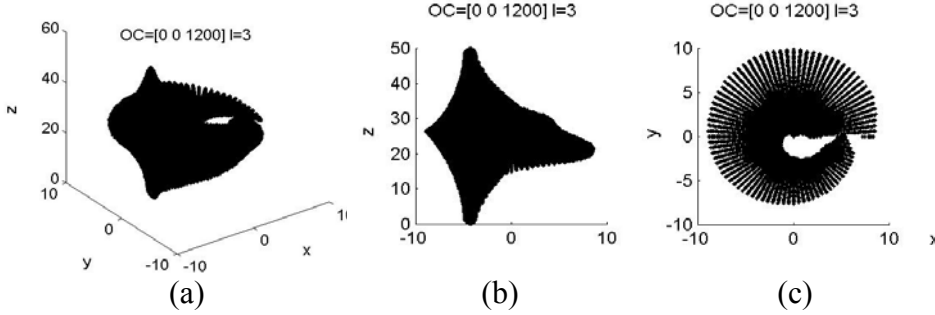
$$\theta_{p_i \min} \leq \theta_{p_i} \leq \theta_{p_i \max} \quad i=1, 2, \dots, 6$$

Tablo 1'deki sınırlar içinde kalan bacak uzunlukları, üniversal ve küresel mafsal açı değerlerinin aynı anda hepsini sağlayan φ , θ , ve ψ yönelme açı değerleri bir diziye atanır. Dizi içindeki φ , θ , ve ψ değerleri 6 SD Paralel mekanizmanın erişebildiği noktalarıdır. Böylece bir

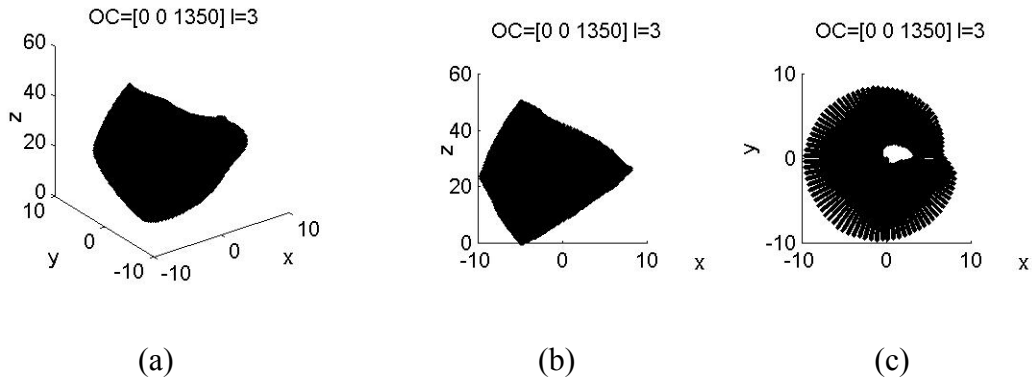
paralel mekanizmanın çalışma uzayı hesaplanmış olur. Bulunan bu değerler Kartezyen, Küresel veya Silindirik koordinatlarda çizdirilebilir. Burada, önceden de bahsedildiği gibi silindirik koordinatlar tercih edilmiştir. Elde edilen φ değerleri 0-360, θ değerleri 0-10 ve ψ değerleri ise 0-50 arasında ölçeklenerek silindirik koordinatlarda yazılmıştır. Bu yönelme açılarının silindirik koordinatlardaki gösterimi Şekil 2' de verilmektedir.



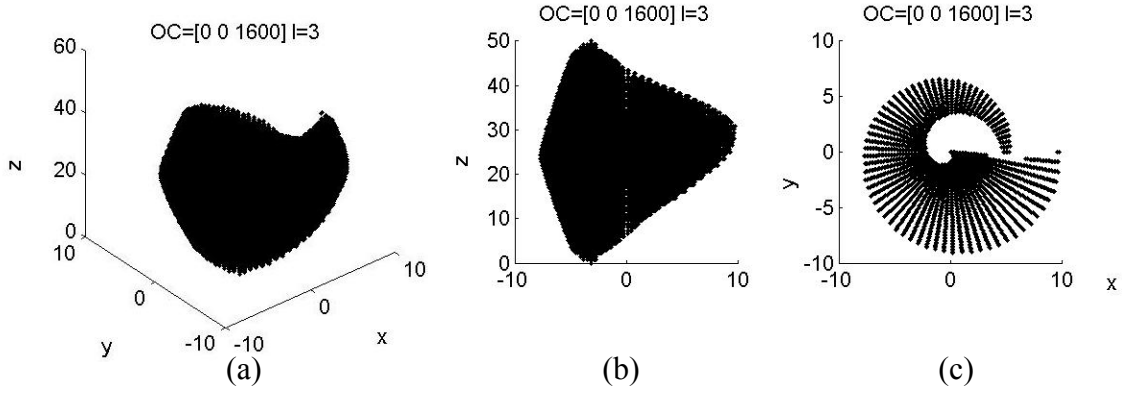
Şekil 2. φ , θ ve ψ değerlerinin silindirik koordinat sisteminde gösterimi



Şekil 3. $\psi_{\min}=-45, \psi_{\max}=45, \phi_{\min}=-45, \phi_{\max}=45, \theta_{\min}=-45, \theta_{\max}=45, OC=[0,0,1200]^T$ için 6-3 SPM'in yönelme çalışma uzayının görünüşleri (a) 3B görünüş, (b) $Az=0, El=0$, (c) $Az=0, El=90$

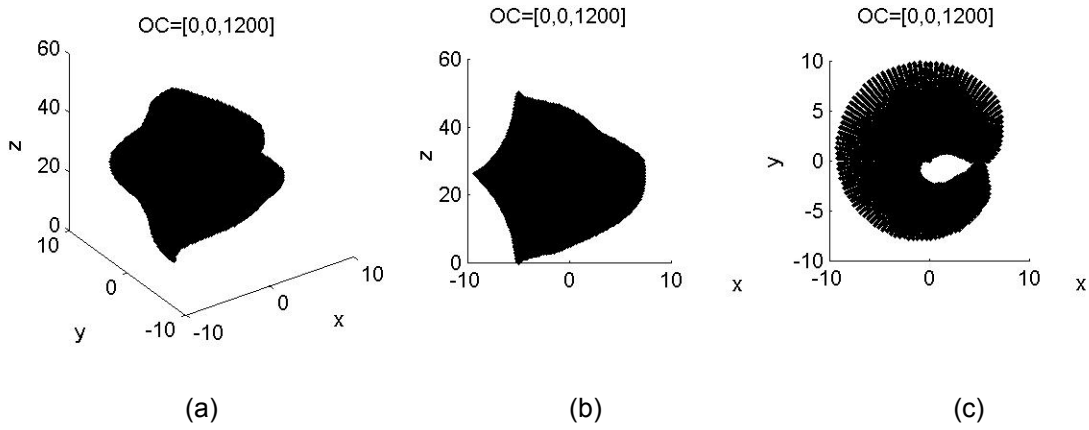


Şekil 4. $\psi_{\min}=-45, \psi_{\max}=45, \phi_{\min}=-45, \phi_{\max}=45, \theta_{\min}=-45, \theta_{\max}=45, OC=[0,0,1350]^T$ için 6-3 SPM'in yönelme çalışma uzayının görünüşleri (a) 3B görünüş, (b) $Az=0, El=0$, (c) $Az=0, El=90$

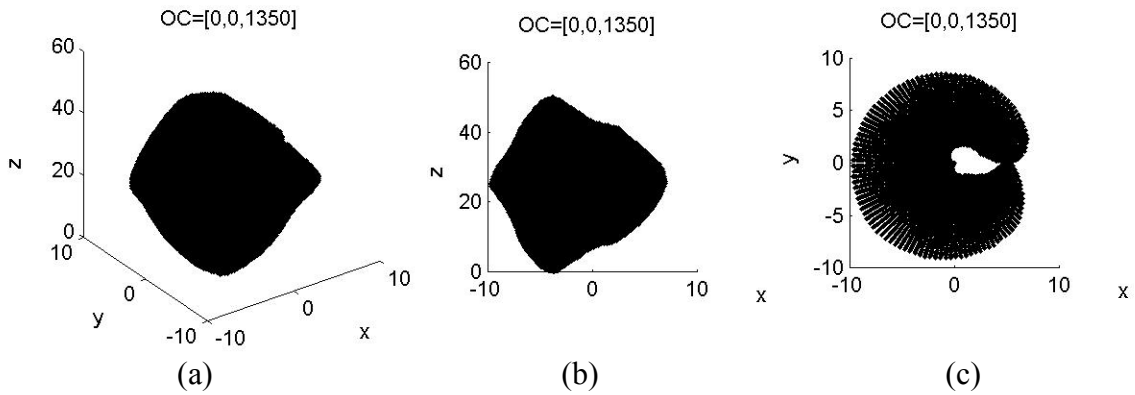


Şekil 5. $\psi_{min}=-45, \psi_{max}=45, \phi_{min}=-45, \phi_{max}=45, \theta_{min}=-45, \theta_{max}=45, OC=[0,0,1600]^T$ için 6-3 SPM'in yönelme çalışma uzayının görünümleri (a) 3B görünüş , (b) $Az=0, El=0$, (c) $Az=0, El=90$

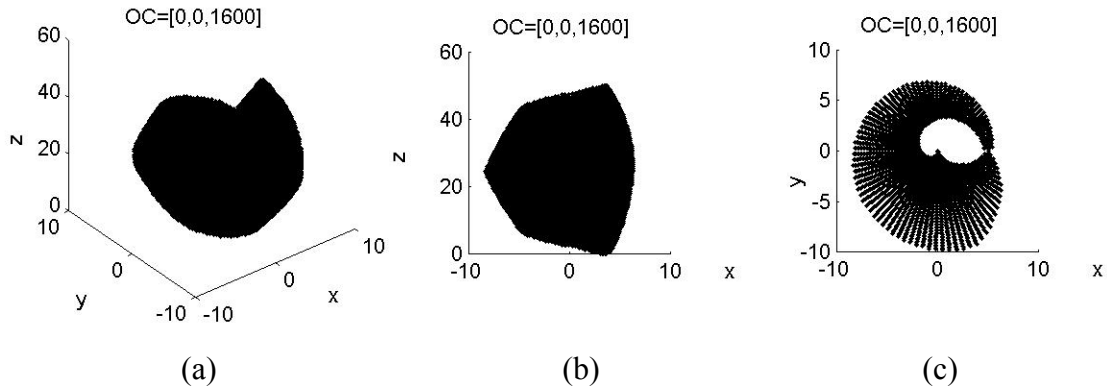
Yukarıdaki algoritma kullanılarak 6-4 SPM'in z ramında çizdirilerek Şekil 6, 7 ve 8'deki grafikler elde edilmiştir. Elde edilen çalışma uzayı verileri Matlab prog-



Şekil 6. $\psi_{min}=-45, \psi_{max}=45, \phi_{min}=-45, \phi_{max}=45, \theta_{min}=-45, \theta_{max}=45, OC=[0,0,1200]^T$ için 6-4 SPM'in yönelme çalışma uzayının görünümleri (a) 3B görünüş , (b) $Az=0, El=0$, (c) $Az=0, El=90$



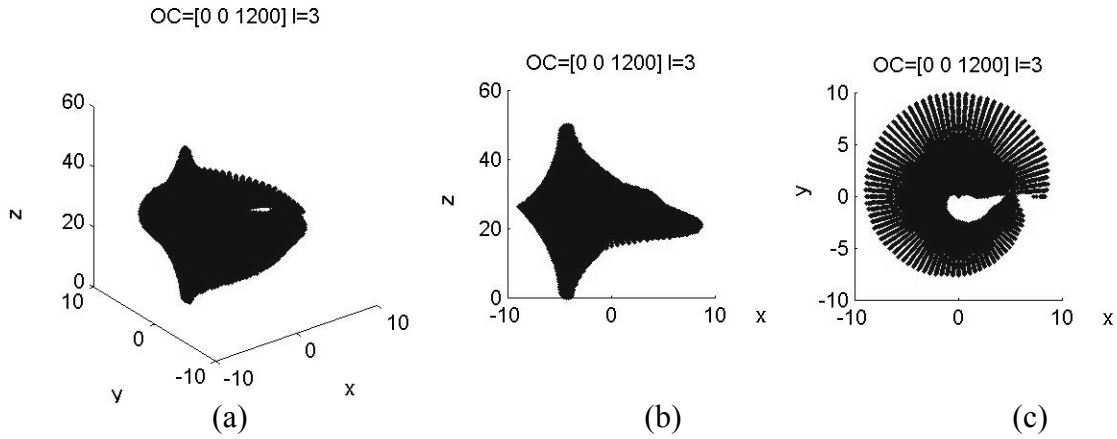
Şekil 7. $\psi_{min}=-45, \psi_{max}=45, \phi_{min}=-45, \phi_{max}=45, \theta_{min}=-45, \theta_{max}=45, OC=[0,0,1350]^T$ için 6-4 SPM'in yönelme çalışma uzayının görünümleri (a) 3B görünüş , (b) $Az=0, El=0$, (c) $Az=0, El=90$



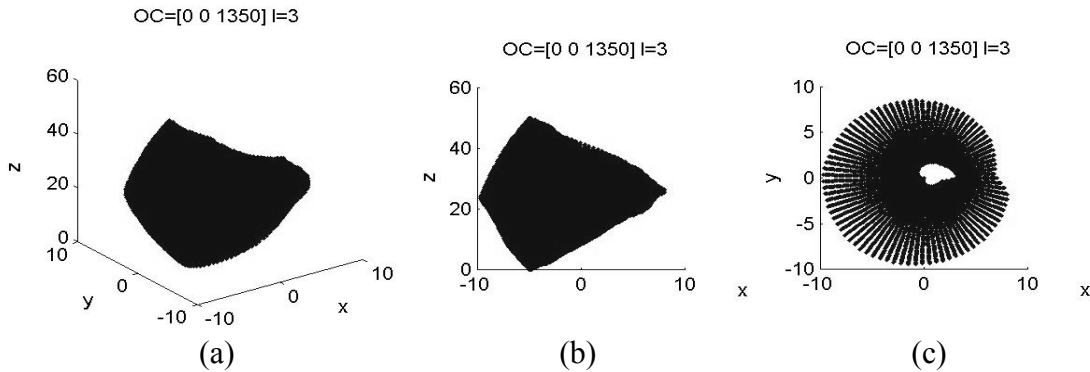
Şekil 8. $\psi_{min}=-45, \psi_{max}=45, \phi_{min}=-45, \phi_{max}=45, \theta_{min}=-45, \theta_{max}=45, OC=[0,0,1600]^T$ için 6-4 SPM'in yönelme çalışma uzayının görünüşleri (a) 3B görünüş , (b) $Az=0, El=0$, (c) $Az=0, El=90$

Son olarak özel bir yapıya sahip 6-3 SPM'sının çalışma uzayı analizi incelenmiştir. Yukarıdaki algoritma kullanılarak özel yapıdaki 6-3 SPM'in z ekseninde yukarı ve aşağı ötelenerek her bir t değeri için çalışma uzayı analizi hesaplanmıştır.

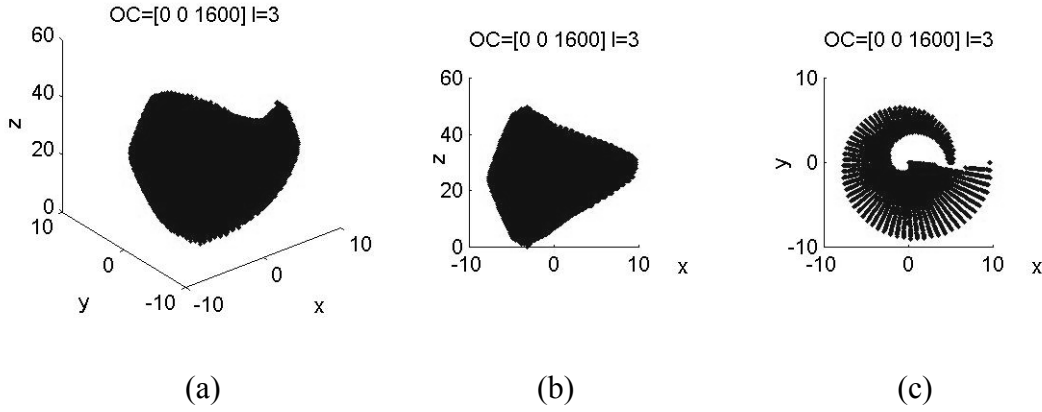
Yukarıdaki 3 farklı yapı için t değerleri {1,20 1,35 1,6 } metre olarak alınmıştır. Elde edilen çalışma uzayı verileri Matlab programında çizdirilmiştir.



Şekil 9. $\psi_{min}=-45, \psi_{max}=45, \phi_{min}=-45, \phi_{max}=45, \theta_{min}=-45, \theta_{max}=45, OC=[0,0,1200]^T$ için 6-3 özel SPM'in yönelme çalışma uzayının görünüşleri (a) 3B görünüş , (b) $Az=0, El=0$, (c) $Az=0, El=90$



Şekil 10. $\psi_{min}=-45, \psi_{max}=45, \phi_{min}=-45, \phi_{max}=45, \theta_{min}=-45, \theta_{max}=45, OC=[0,0,1350]^T$ için 6-3 özel SPM'in yönelme çalışma uzayının görünüşleri (a) 3B görünüş , (b) $Az=0, El=0$, (c) $Az=0, El=90$



Şekil 11. $\psi_{min}=-45, \psi_{max}=45, \phi_{min}=-45, \phi_{max}=45, \theta_{min}=-45, \theta_{max}=45, OC=[0,0,1600]^T$ için 6-3 özel SPM'in yönelme çalışma uzayının görünüşleri (a) 3B görünüş, (b) $Az=0, El=0$, (c) $Az=0, El=90$

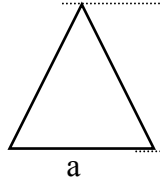
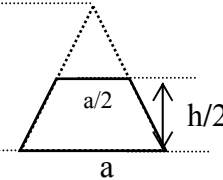
Sonuçlar

Şekil 3 ve 11 incelendiğinde grafiklerdeki boş alanlar (kardiyoide benzeyen) çalışma uzayı dışındaki noktalardır. Bir başka deyişle bu noktalar önceden tanımlanan bacak uzunlukları ve eklem açılarının maksimum ve minimum değerleri dışındaki noktalardır. Şekil 4-7 ve 10 incelendiğinde $OC=[0 0 1350]$ vektörü noktasında maksimum çalışma uzayı elde edildiği görülmektedir. Bunun sebebi platformun bacak uzunlukları $OC=[0 0 1350]$ noktasında tam orta noktada olmasıdır. Üst platformun z yönünde hareket ettirilmesi sonucu bacak uzunlukları ve eklem açılarında ek kısıtlamalar gelmektedir. Ek kısıtlamalar sonucu OC vektörünün $[0 0 1350]$ değeri dışındaki değerlerde çalışma uzayı küçülmektedir. Literatür incelemesi yapıldığında paralel mekanizmaların yönelme çalışma uzayı herhangi bir ekseninde uzatılmadığı görülmektedir. Bu çalışmada ise z ekseninde platform yukarı aşağı hareket ettirilerek çalışma uzayının z eksenine bağlı olarak değişimi incelenmiştir. z ekseninin genişletilme eksen seçilmesinin sebebi ise bu yönde platformun hareket yeteneği x ve y eksenine göre daha fazla olmasıdır.

Ayrıca, Şekil 6-8'de ise 6-4 SPM çalışma uzayı analizi hesaplanmış ve diğer çalışma uzayı analizleriyle kıyaslama yapılmıştır. Tablo 2'de görüldüğü gibi 6-3 SPM'in üçgen yapıdaki hareketli platformunun taban kenarı sabit kalmak üzere yüksekliği h yerine h/2 alınarak yamuk geometride yeni hareketli platform oluşturulmuştur. Elde edilen yapı 6-4 SPM mekanizması

haline gelmiştir. Aynı bacak uzunlukları, küresel ve üniversal açı değerleri kullanılarak çalışma uzayı analizi yapılmıştır. Sabit platformun yapısında her hangi bir değişiklik yapılmamıştır. Şekil 4 ve 7'de $OC=[0 0 1350]$ vektörü için çalışma uzayı analizi grafikleri ve çalışma uzayı noktalarının karşılaştırılması Tablo 2'de görülmektedir. 6-3 SPM'in hareketli platformun yüksekliği yarıya indirilerek elde edilen 6-4 SPM'in çalışma uzayının 6-3 SPM'e göre %49.55 kadar arttığı görülmektedir.

Tablo 2. 6-3 ve 6-4 SPM Çalışma uzayı kıyaslaması (Taban kenar= Sabit)

Üçgen	Üçgen-Yamuk
	
Erişebilir Nokta Sayısı /Toplam Nokta Sayısı	Erişebilir Nokta Sayısı /Toplam Nokta Sayısı
233.978/1.000.000= 0.23397	349.822/1.000.000= .349822
%23.39	% 34.98

Şekil 6,7 ve 8 de görüldüğü gibi 6-4 SPM'in çalışma uzayı içinde 6-3 SPM çalışma uzayına göre daha büyük boşluklar vardır. Bunun sebebi

6-4 SPM, hareketli platformun ağırlık merkezi olan C noktasının yakınına ve çalışma uzayı sınırlarına erişemediğini göstermektedir. Eğer bir paralel mekanizmanın C noktası yakınında ve çalışma uzayı sınırlarına yakın noktalarda çalışması isteniyorsa 6-3 SPM mekanizması tercih edilmelidir. 6-3 SPM hassas işlem gerektiren alanlarda örneğin uçak simülatörü, tıbbi operasyonlar, yüksek hassasiyet gerektiren talaşlı imalat, frezeleme ve delme gibi uygulamalarda tercih edilmelidir. Eğer yüksek hassasiyet ve doğruluk istenmiyorsa, 6-4 SPM' deki yamuğun alanı 6-3 SPM'deki üçgenin alanından büyük olduğu için dağıtılmış yük veya ağır yük taşımacılığı gibi alanlarda 6-4 SPM tercih edilmelidir

Bu çalışmalara ek olarak 6-3, ve özel 6-3 yapı olan SPM'lerin çalışma uzayları kıyaslanmıştır. Tablo 3'den görüldüğü gibi 6-3 ve özel 6-3 yapıdaki SPM'lerin çalışma uzayı birbirine çok yakındır. Stewart platform mekanizmasının kolay imal edilmesi isteniyorsa özel yapı 6-3 SPM kullanılmalıdır. Aksi takdirde 6-3 SPM yapısının imalatı zor olmakla birlikte kararlılığı daha yüksektir.

Tablo 3. Çalışma uzayı nokta sayıları

t	6-3 SPM	Özel Yapı 6-3 SPM	6-4 SPM
1.2	148402	148402	289104
1.35	233978	233849	349822
1.6	78302	78302	109685

Kaynaklar

Alp, H, Yurt, S.N. ve Özkol, İ, (2004). A general approach for directionally extended workspace analysis of a 6 dof parallel mechanism, *9th Mechatronics Forum Int. Conference*, 71-78, Ankara

Bonev, I. A., Ryu, J., (2001). A new approach to orientation workspace analysis of 6-DOF parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, **36**, 15-28.

Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S., (2000). The Stewart platform manipulator: a review, *Mechanism and Machine Theory*, **35**, 15-40.

Du Plessis, L.J., Synman, J.A., (2001). A numerical method for the determination of dextrous workspaces of Gough-Stewart platforms, *I. Journal for numerical methods in engineering*, **52**, 345-369.

Gosselin, C., (1990). Determination of workspaces of 6-dof parallel manipulators, *Transactions of ASME Journal of Mechanical Design*, **112**, 331-336 .

Jeong, J. W., Kim, S. H., Kwak, Y. K., (1999). Kinematics and workspace analysis of a parallel wire mechanism for measuring a robot pose, *Mechanism and Machine Theory*, **34**, 825-841.

Lee, M. K. ve Park, K. W., (2000). Workspace and Singularity Analysis of a Double Paralel Manipulator, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **5**(4), 367-374.

Luh, C.-M., Adkins, F.A., Haug, E.J., Qiu, C.C., (1996). Working Capability Analysis of Stewart Platforms, *Journal of Mech. Design Transactions of ASME*, **118**, 220-227.

Ma, O. ve Angeles, J., (1991). Architecture Singularities of Platform Manipulators, *Proceedings of the 1991 IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, 1542-1547.

Majid, M.Z.A., Huang, Z. ve Yao, Y.L., (2000). Workspace analysis of a six-degrees of freedom, Three-Prismatic-Prismatic-Spheric-Revolute Parallel Manipulator, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **16**, 441-449.

Merlet, J.-P., (1995). Determination of the orientation workspace of parallel manipulators, *Journal of Intelligent Robotics Systems*, **13**, 143-160.

Shim, J.H. , Kwon, D.S. ve Cho, H.S., (1999). Kinematic analysis and design of a six D.O.F. 3-PRPS in parallel manipulator, *Robotica*, **17**, 269-281.

Synman, J.A. , Du Plessis, L.J. ve Duffy, J., (2000). An optimization approach to the determination of the boundaries of manipulator workspaces, *Journal of Mechanical Design ASME*, **122**, 447-456.

Wang, Zhe., Wang, Zhi., Liu, W. ve Lei, Y., (2001). A study on workspace, boundary workspace anaylsis and workpieces position-

ing for paralel machine tools, *Mechanism and Machine Theory*, **36**, 605-622.

Yurt, S. N., (2002). 6-3 Stewart Platform mekanizmasının kinematiği, dinamik analizi ve kontrolü, *Doktora tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yurt, S.N., Özkol, I., Kaya, M.O. ve Hacıyev, C., (2002). Optimization of the PD coefficient in a flight simulator control via genetic algorithms, *Aircraft Engineering and Aero-*

space Technology: An international Journal, **74**: 2, 147-153.

<http://curtisuniversal.thomasnet.com/viewitems/universal-joints/type-303-stainless-steel-non-magnetic-single-joint?&plpver=10&forward=1&backtoname=&pane=>, (05.03.2004)
<http://catalog.festo.com/enu/asp/default3.asp>, (05.03.2004)