



**HAVA HARP OKULU
HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ
ENSTİTÜSÜ**



STEWART PLATFORM MEKANİZMASI ÇALIŞMA UZAYI ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Serdar AY

Havacılık Mühendisliği Ana Bilim Dalı Başkanlığı

Havacılık Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Abdurrahman HACIOĞLU

Eş Danışman: Doç. Dr. O.Ergüven VATANDAŞ

OCAK 2013

HAVA HARP OKULU
HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ ENSTİTÜSÜ

STEWART PLATFORM MEKANİZMASI ÇALIŞMA UZAYI ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Serdar AY
(407202)

Havacılık Mühendisliği Ana Bilim Dalı Başkanlığı

Havacılık Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Abdurrahman HACIOĞLU
Eş Danışman: Doç. Dr. O.Ergüven VATANDAŞ

OCAK 2013

Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsünün 407202 numaralı Doktora Öğrencisi **Serdar AY**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra Prof. Dr. Abdurrahman HACIOĞLU danışmanlığında ve Doç.Dr. O.Ergüven VATANDAŞ eş danışmanlığında hazırladığı “**STEWART PLATFORM MEKANİZMASI ÇALIŞMA UZAYI ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Abdurrahman HACIOĞLU**
Hava Harp Okulu



Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. M. Fevzi ÜNAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Seyhan Onbaşıoğlu
İstanbul Teknik Üniversitesi



Yrdc.Doç.Dr. Zafer KAZANCI
Hava Harp Okulu



Teslim Tarihi : 27 Aralık 2012
Savunma Tarihi : 28 Ocak 2013

Bu tez çalışmasında belirtilen görüş ve yorumlar yazara aittir. Türk Silahlı Kuvvetleri'nin ya da diğerk kamu kuruluşlarının görüşlerini yansıtmaz. Ayrıca bu tez çalışması bilimsel ahlak ve etik değerkere uygun olarak yazılmış olup, yararlanılan tüm eserler kaynaklarda gösterilmiştir.

Ocak 2013

Serdar AY

Sevgili aileme ve tüm dostlarıma,

ÖNSÖZ

Bir paralel mekanizma türü olan Stewart Platform Mekanizması, sahip olduğu yüksek hız, hassasiyet, yükleme kapasitesi ve rijidite özellikleriyle uzay teleskoplarının titreşim kontrolü ve optiklerinin ayarlanmasında, uydu çanağı konumlandırma, tıpta, CNC tezgahlarda ve denizaltı araştırmalarında vb. bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, üçü öteleme ve üçü de dönme hareketi olmak üzere altı serbestlik dereceli yapısı ile Stewart Platform Mekanizması, ticari uçak, ulaştırma uçak ve helikopter pilot intibak ve tazeleme eğitimleri kapsamında ihtiyaç duyulan doğrusal ve açısal hareketleri, uçuş simülatörlerinde sağlamakta kullanılmaktadır. Uçaklı eğitimle birlikte uçuş simülatör eğitiminin yapılması, yalnız uçaklı eğitimlere göre performans artışı sağlamakta, ayrıca pilot ve diğer uçuş mürettebatı tarafından acil durum prosedürlerinin gerçek uçakla uçmadan önce, yerde bir çok kez simülatörde uygulanması uçuş emniyeti açısından gerekli bir eğitim olup, can ve mal kaybının en aza indirilmesine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.

Kontrolü, tekilliği, dinamiği ile birlikte Stewart Platform Mekanizmasının sınırlı olan çalışma uzayı ve karmaşık olan düz kinematik analizi üzerine literatürde bir çok değerli çalışma bulunmaktadır. Stewart Platform Mekanizması çalışma uzayı ve sınırlarının şekil ve büyüklük bilgisi, CNC makineleme işlemlerinde iş parçasının tezgaha doğru olarak yerleştirilerek kesici takım ve iş parçasının çarpışmasının önlenmesinden, cerrahi operasyonlarda hastaya zarar vermeden, ameliyat personelinin operasyonu arzu edilen hassasiyette gerçekleştirebilmelerine kadar bir çok alanda görevin başarılmaması ve istenmeyen durumların yaşanmaması açısından önem arz etmektedir. Ayrıca ulaşılabilen çalışma uzayının tespiti, Stewart Platform Mekanizmasının görev/yol planlamaları ve bir makine elemanı olarak kullanımının fizibilite değerlendirilmesi açısından en önemli faktörlerden biridir.

Bu tez çalışmada; özgün olarak 6-3 Stewart Platform Mekanizmasının yeni bir geometrik yaklaşımla tüm bacak konfigürasyonları için ulaşılabilen çalışma uzayı belirlenmektedir.

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteği veren ve sabırla her zaman yol gösteren danışmanım Prof.Dr.Hv.Müh.Alb. Abdurrahman HACIOĞLU'na ve eş danışmanım Doç.Dr.Hv.Müh.Alb. O.Ergüven VATANDAŞ'a, teşvikleri ile beni destekleyen ve motive eden Yrdc.Doç.Dr.Hv.Müh.Alb. Aydemir ARISOY'a, Yrdc.Doç.Dr.Hv.Müh.Yb.Süleyman BAŞTÜRK'e, Yrdc.Doç.Dr.Hv.Müh.Yb. Haydar UYANIK'a, Yrdc.Doç.Dr.Hv.Müh.Yb.İbrahim KOÇ'a, özellikle doktora sınıf arkadaşım Yrdc.Doç.Dr.Hv.Müh.Yb. Y.Volkan PEHLİVANOĞLU'na, fedakar aileme, canım oğullarım A.Hakan'a, A.Kaan'a ve sevgili eşim Zeynep Bilge AY'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YAZARIN NOTU.....	v
ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1.GİRİŞ	1
1.1 Stewart Platform Mekanizmasının Tasarımı ve Sınıflandırılması	3
1.2 Tekillik	3
1.3 Kontrol	5
1.4 Dinamik Analiz	6
1.5 Kinematik Analiz	7
1.6 Çalışma Uzayı Analizi	8
1.7 Tezin Önemi ve Katkısı.....	10
2. SPM’NİN GELİŞİMİ, KULLANIMI VE SINIFLANDIRILMASI....	13
2.1 Stewart Platform Mekanizmasının Gelişimi	13
2.2 Seri ve Paralel Mekanizmaların Karşılaştırılması	16
2.3 Stewart Platform Mekanizmasının Kullanım Alanları	19
2.3.1 Simülatörlerde SPM kullanımı.....	19
2.3.2 Uzay çalışmalarında SPM kullanımı.....	20
2.3.3 CNC tezgahlarda SPM kullanımı.....	21
2.3.4 Tıpta SPM kullanımı.....	21
2.4 Stewart Platform Mekanizmasının Yapısı, Tasarımı ve Sınıflandırılması.....	22
3 TEKİLLİK, KONTROL, DİNAMİK VE KİNEMATİK ANALİZ	25
3.1 Tekillik.....	25
3.1.1 Tip I tekillik	28
3.1.2 Tip II tekillik	29
3.1.3 Tip III tekillik.....	29
3.2 Kontrol	32
3.2.1 Mafsal uzayı kontrolü	32
3.2.2 Görev uzayı kontrolü	33
3.3 Dinamik Analiz	41
3.3.1 Dinamik model türleri.....	41
3.3.1.1 Ters dinamik model.....	41
3.3.1.2 Düz dinamik model.....	42
3.3.2 Dinamik analizde kullanılan yöntemler	42
3.3.2.1 Newton-Euler yöntemi	42
3.3.2.2 Lagrange formülasyonu	46

3.3.2.3 Sanal iş yöntemi	48
3.4 Kinematik Analiz.....	50
3.4.1 Ters kinematik analiz	51
3.4.1.1 Bacak boy uzunlukları.....	52
3.4.1.2 Mafsal açıları.....	54
3.4.1.3 Bacakların çarpışma durumu.....	55
3.4.2 Düz kinematik analiz.....	56
3.4.2.1 Analitik yaklaşımlar	57
3.4.2.2 Sayısal yaklaşımlar.....	61
4. ÇALIŞMA UZAYI	71
4.1 Çalışma Uzayı Sınıflandırılması.....	72
4.1.1 Ulaşılabilen çalışma uzayı.....	72
4.1.2 Yönelim çalışma uzayı	72
4.1.3 Sabit yönelim/öteleme çalışma uzayı	73
4.2 Çalışma Uzayı Belirlemede Kullanılan Yöntemler	73
4.2.1 Sayısal yöntemler	73
4.2.2 Analitik yöntemler.....	76
4.2.3 Geometrik yöntemler.....	76
5. TERS KİNEMATİK YÖNTEMLE SABİT YÖNELİMLİ ÇALIŞMA UZAYI ANALİZİ	81
6. GELİŞTİRİLEN GEOMETRİK YÖNTEM VE UYGULAMASI	87
6.1 Geliştirilen Geometrik Yöntemle Düzlemsel SPM Çalışma Alanının Belirlenmesi.....	87
6.1.1 P_1 köşesinin konumunun belirlenmesi	88
6.1.2 P_2 köşesinin konumunun belirlenmesi	88
6.1.3 Geliştirilen geometrik yöntemin uygulaması ve mevcut yöntemle kıyaslanması.....	92
6.2 Geliştirilen Geometrik Yöntemle 6-3 SPM Çalışma Uzayının Belirlenmesi...	94
6.2.1 P_1 köşesinin konumunun belirlenmesi	96
6.2.2 P_2 köşesinin konumunun belirlenmesi	98
6.2.3 P_3 köşesinin konumunun belirlenmesi	103
6.2.4 Geliştirilen geometrik yöntemin uygulaması ve mevcut yöntemle kıyaslanması.....	106
7. SONUÇ ve ÖNERİLER	109
KAYNAKLAR.....	111
EKLER.....	131
ÖZGEÇMİŞ	147

KISALTMALAR

SPM	: Stewart Platform Mekanizması
FAA	: Federal Aviation Administration
FTD	: Flight Training Device
FSS	: Full Flight Simulator
G	: Yer çekimi ivmesi (Gravity)
DOF	: Serbestlik Derecesi (Degree Of Freedom)
CNC	: Computer Numerical Control
SPS	: Küresel Prizmatik Küresel Mafsallı
UPS	: Üniversal Prizmatik Küresel Mafsallı
PD	: Oransal-Türevsel (Proportional-Differential) Kontrolör
PDGC	: Proportional Derivative Controller with Dynamic Gravity Compensation
PID	: Oransal-İntegral-Türev (Proportional-Integral-Derivative) Kontrolör
ISO	: Uluslararası Standartlar Organizasyonu
HOSM	: Yüksek Dereceli Kayma Kipli
LTD	: Doğrusal Yer Değiştirme Transdüsörü
CCPC	: Cross-Coupling Pre-Compensation
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
SISO	: Tek Girişli-Tek Çıkışlı (Single Input-Single Output)
MIMO	: Çoklu Girişli-Çoklu Çıkışlı (Multi Input-Multi Output)
JIR	: SPM Atalet İndeksi (Joint Reflected Inertia)
ICA	: Bağımsız Bileşen Analizi (Independent Component Analysis)

SEMBOL LİSTESİ

B_i	: i 'nci bacağın sabit tabana bağlandığı nokta
P_i	: i 'nci bacağın hareketli platforma bağlandığı nokta
O	: Sabit koordinat sistemi
C	: Hareketli koordinat sistemi
$\vec{L}_i$	: i 'nci bacak vektörü
L_i	: i 'nci bacağın boyu
$\vec{p}_j$	: Hareketli platformdaki j 'nci noktanın konum vektörü
$\vec{b}_i$	: Sabit tabandaki i 'nci noktanın konum vektörü
$\vec{t}$	: Hareketli platformun sabit tabana göre konum vektörü
${}^B R_P$	: Dönüşüm matrisi
α	: Hareketli platformun x eksenine etrafında dönme miktarı
β	: Hareketli platformun y eksenine etrafında dönme miktarı
γ	: Hareketli platformun z eksenine etrafında dönme miktarı
θ_{bi}	: i 'nci bacağı sabit tabana bağlayan mafsalsal açısı
θ_{pi}	: i 'nci bacağı hareketli platforma bağlayan mafsalsal açısı
$\vec{n}_{bi}$	: Sabit tabana dik birim vektör
$\vec{n}_{pi}$	: Hareketli platforma dik birim vektör
D	: Ortalama bacak çapı
e	: Bacaklar arası mesafe
r_j	: j 'nci üçgenin yarıçapı
$\emptyset_j$	: j 'nci üçgen düzleminin sabit tabanla arasındaki açı değeri
d	: Hareketli platformun kenar uzunluğu
L	: Sabit tabanın kenar uzunluğu
O_j	: j 'nci sabit tabandaki kenarlar arası merkez
α_j	: Sabit tabandaki O_j merkezinin x eksenine etrafında dönme miktarı
X	: Uç organın yörüngesi
W	: Uç organın hızı
$\dot{W}$	: Uç organın ivmesi
τ	: Hareket ettirici mafsalsal kuvvet ve torkları
M	: Atalet matrisi
C	: Merkezkaç, Coriolis terimi
m_u	: Bacağın hareketli kısmının kütlesi
F_i	: Elektrik motoru tarafından üretilen kuvvet
s_i	: Bacak boyunca birim vektör
g	: Yer çekimi ivmesi
a_{ui}	: Hareketli parçanın ivmesi
f_i	: Tahrik kuvveti
I_{di}	: Sabit parçanın atalet momenti
I_{ui}	: Hareketli parçanın atalet momenti

v_p	: Hareketli platformun merkezindeki hız
a_p	: Hareketli platformun merkezindeki ivme
ω_p	: Hareketli platformun merkezindeki açısal hız
Q_{1i}	: Dinamik hesaplamada kullanılan matrisler
m_p	: Hareketli platformun kütlesi
q_p	: Genelleştirilmiş koordinat
A ve B	: Jakobyen matrisler

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : D seviyesi tam uçuş simülatörü hareket gereklilikleri	2
Çizelge 2.1 : Seri ve paralel mekanizmaların karşılaştırması.....	18
Çizelge 4.1 : 6-3 ve 6-4 SPM çalışma uzayı kıyaslaması	75
Çizelge 5.1 : Mafsal konum yarıçapları ve çalışma alan büyüklükleri.....	83

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Eric Gough'un universal lastik test makinesi.....	14
Şekil 2.2 : Stewart'ın önerdiği uçuş simülatörünün şematik gösterimi	14
Şekil 2.3 : D.Stewart tarafından önerilen mekanizmanın mimarisi	15
Şekil 2.4 : Klaus Cappel tarafından tasarlanan uçuş simülatörü	15
Şekil 2.5 : Otomobil üretim bandında kullanılan bir seri mekanizma	16
Şekil 2.6 : Bir paralel mekanizma olan Delta robot.....	16
Şekil 2.7 : Paralel ve seri mekanizmalardan oluşan bir hibrit mekanizma.....	17
Şekil 2.8 : Seri mekanizmanın şematik gösterimi	17
Şekil 2.9 : Paralel mekanizmanın şematik gösterimi	18
Şekil 2.10 : Airbus A340 uçuş simülatörü.....	19
Şekil 2.11 : Uzay teleskobunda SPM kullanımı	20
Şekil 2.12 : Uydu çanağında SPM kullanımı.....	20
Şekil 2.13 : CNC tezgahında SPM kullanımı	21
Şekil 2.14 : Ameliyatlarda mikroskobun hassas kontrolü için SPM kullanımı.....	21
Şekil 2.15 : Doğrusal eyleyicili düzlemsel SPM	22
Şekil 2.16 : SPM'lı CNC tezgah kafasının katı modeli	22
Şekil 2.17 : Değişken uzunluklu bacaklara sahip SPM	23
Şekil 2.18 : Sabit uzunluklu bacaklara sahip SPM	23
Şekil 2.19 : 3-3 SPM'nın katı modeli	24
Şekil 3.1 : Hunt tekilliği.....	26
Şekil 3.2 : Fichter tekilliği	26
Şekil 3.3 : $\psi=\theta=\Phi=30^\circ$ olmak üzere sabit yönelimdeki tekillikler	30
Şekil 3.4 : Yönelme çalışma uzayındaki tekil bölgeler	31
Şekil 3.5 : Mafsal uzayında genişletilmiş CTC uygulaması.....	34
Şekil 3.6 : Görev uzayında genişletilmiş CTC uygulaması	35
Şekil 3.7 : Eşleşmesiz kontrol yöntemi.....	36
Şekil 3.8 : CCPC'li kuvvet-hız kontrol yöntemi	36
Şekil 3.9 : Klasik PID kontrol yöntem.....	37
Şekil 3.10 : SPM'lı balonla uzaktan gözetim sistemi şematik gösterimi	37
Şekil 3.11 : 500 nm çözünürlüğe sahip DC motor.....	38
Şekil 3.12 : SPM mafsal uzayı adaptif kontrol modeli blok diyagramı.....	40
Şekil 3.13 : Dinamik denklemleri çıkarılan SPM'nın şematik gösterimi.....	43
Şekil 3.14 : Bir bacağın üzerindeki kuvvetlerin serbest cisim diyagramı	43
Şekil 3.15 : Bacaklardan birinin kuvvet analiz diyagramı	47
Şekil 3.16 : Maksimum yatay düzlemde JRI dağılımı.....	49
Şekil 3.17 : 6-3 SPM şematik gösterimi	52
Şekil 3.18 : Bacak olarak kullanılan örnek doğrusal eyleyici.	52
Şekil 3.19 : t öteleme vektörü ve eksen takımları.....	53
Şekil 3.20 : Çeşitli mafsalların şematik gösterimi	54
Şekil 3.21 : Mafsal açılarının şematik gösterimi	54
Şekil 3.22 : İki bacak arası mesafe	55

Şekil 3.23 : Bacak çapları ve bacaklar arası mesafe	56
Şekil 3.24 : Kürelerin kesişimi ile oluşan çemberler.	59
Şekil 3.25 : Bacakların oluşturduğu kürelerle ilgili geometrik parametreler.....	59
Şekil 3.26 : 6-3 SPM'nin katı modeli	63
Şekil 3.27 : 6-3 SPM'nin üstten şematik görünüşü.....	64
Şekil 3.28 : Sabit tabandaki çember merkezlerinin x eksenine ile yaptığı açılar	64
Şekil 3.29 : Pozisyon ve yönelim alt uzaylarını içeren çözüm kümeleri	68
Şekil 4.1 : 6-3 özel SPM yönelme çalışma uzayı görünüşleri.....	74
Şekil 4.2 : Kısıtlar dahilinde tek bacağın çalışma alanı	77
Şekil 4.3 : Kısıtlar dahilinde tek bacağın çalışma uzayının kesit düzlemi.....	77
Şekil 4.4 : Tek bacağın kısıtlar dahilinde çalışma uzayının katı modeli	78
Şekil 4.5 : Yönelme çalışma uzayı.....	78
Şekil 4.6 : İki bacaklı geometrik yaklaşım.....	79
Şekil 4.7 : Düzlemde bacakların ulaşabildiği bölge.	80
Şekil 5.1 : Farklı mafsalları için çalışma alanları.....	81
Şekil 5.2 : 6-3 SPM ve araştırma uzayı	82
Şekil 5.3 : Sabit ve hareketli platformların mafsalları yerleşimi.....	83
Şekil 5.4 : $r_s = 0.149$ m ve $r_h = 0.1$ m olduğu durumda çalışma alanı.....	84
Şekil 5.5 : $r_s = 0.149$ m ve $r_h = 0.11$ m olduğu durumda çalışma alanı.....	84
Şekil 5.6 : $r_s = 0.149$ m ve $r_h = 0.12$ m olduğu durumda çalışma alanı.....	84
Şekil 5.7 : $r_s = 0.1$ m ve $r_h = 0.149$ m olduğu durumda çalışma alanı.....	85
Şekil 5.8 : $r_s = 0.11$ m ve $r_h = 0.149$ m olduğu durumda çalışma alanı.....	85
Şekil 5.9 : $r_s = 0.12$ m ve $r_h = 0.149$ m olduğu durumda çalışma alanı.....	85
Şekil 5.10 : $z = 0.2121$ m- 0.2641 m değerleri arasında çalışma uzayı	86
Şekil 6.1 : Düzlemsel SPM'nin şematik gösterimi	87
Şekil 6.2 : P_1 köşesinin tüm muhtemel konumlarının şematik gösterimi	88
Şekil 6.3 : Çemberlerin kesişim noktası olan P_2 köşesi	89
Şekil 6.4 : Bacakların sabit platformla yaptıkları açılar ϕ_1 ve ϕ_2	91
Şekil 6.5 : l_3 bacağının sabit platformla yaptığı ϕ_3 açısı.	91
Şekil 6.6 : Geliştirilen geometrik yöntemle elde edilen çalışma alanı.....	92
Şekil 6.7 : Ayırıklaştırma yöntemi ile elde edilen sabit yönelim çalışma alanı.....	93
Şekil 6.8 : Düzlemsel SPM çalışma alanlarının kıyaslanması	93
Şekil 6.9 : Düzlemsel SPM çalışma alanlarının karşılaştırması	94
Şekil 6.10 : 6-3 Stewart Platform Mekanizmasının katı modeli	94
Şekil 6.11 : Kürelerin kesişimi ile oluşan r_1 yarıçaplı çember	96
Şekil 6.12 : P_1 köşesinin konumu	96
Şekil 6.13 : Sabit tabanın üstten şematik görünümü.....	98
Şekil 6.14 : P_1 merkezli d_1 yarıçaplı küre.....	99
Şekil 6.15 : O_2 merkezli r_2 yarıçaplı çember	99
Şekil 6.16 : x-y düzlemindeki izdüşümler.....	100
Şekil 6.17 : t-z düzlemindeki izdüşümler.....	101
Şekil 6.18 : P_3 köşesinin üzerinde hareket ettiği çember ve eksen takımları	103
Şekil 6.19 : P_3 köşesinin çember üzerinde ulaştığı noktalar	105
Şekil 6.20 : 6-3 SPM'nin ulaşılabilen çalışma uzayının perspektif görünümü	106
Şekil 6.21 : 6-3 SPM'nin çalışma uzaylarının x-y düzlemindeki karşılaştırması	107
Şekil 6.22 : 6-3 SPM'nin çalışma uzaylarının x-z düzlemindeki karşılaştırması	107
Şekil 6.23 : 6-3 SPM'nin çalışma uzaylarının y-z düzlemindeki karşılaştırması	108

STEWART PLATFORM MEKANİZMASI ÇALIŞMA UZAYI ANALİZİ

ÖZET

Ulaşılabilen çalışma uzayı, Stewart Platform Mekanizmasının düzlemsel/uzaysal hareketinde hareketli platformun geometrik merkezine yerleştirilen eksen takımının/uç organın, düzlemde veya uzayda hareketli platformun yönelimi ne olursa olsun ulaşabileceği noktalardan oluşan bölgedir.

Bu çalışmada, 6-3 Stewart Platform Mekanizmasının (SPM) ulaşılabilen çalışma uzayı yeni bir geometrik yaklaşım kullanılarak elde edilmiştir. İlk olarak; bir paralel mekanizma türü olan SPM'nin gelişimi hakkında bilgi verilmiş, seri mekanizmalarla kıyaslaması yapılmış, kullanım alanları, yapısı, tasarımı ve sınıflandırılmasından bahsedilmiştir. İkinci olarak; SPM sınıflandırılması, tasarımı, tekilliği, dinamiği, kontrolü, ters ve düz kinematiği konuları ele alınmıştır. Üçüncü olarak; çalışmanın esas konusu olan çalışma uzayı hakkında ayrıntılı bilgi sunulmuştur. Dördüncü olarak; geliştirilen geometrik yöntemle geçilmeden önce, ters kinematik teknik kullanılarak 6-3 SPM'nin ayrıklaştırma yöntemi ile sabit yönelim çalışma uzayı elde edilerek, incelenmiş ve mafsalları konum yarıçaplarının çalışma uzayına etkisi analiz edilmiştir.

Önerilen yeni geometrik yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi için düzlemsel SPM üzerinde anlatımı ve uygulaması yapıldıktan sonra, 6-3 SPM ele alınarak yöntemin aşamaları anlatılmış ve gerçekleştirilen uygulama ile mekanizmanın ulaşılabilen çalışma uzayı elde edilmiştir. Geliştirilen yöntemle elde edilen ulaşılabilen çalışma uzayı, ayrıklaştırma yöntemi ile edilen sabit yönelim (hareketli platform sabit tabana paralel durumda) çalışma uzayı ile kıyaslanmıştır.

Mevcut çalışmalarda yaygın olarak kullanılmakta olan sabit yönelim ve yönelim çalışma uzay analizlerinde, kartezyen veya polar koordinatlarda araştırma uzayı bir çözüm ağı ile temsil edilmektedir. Söz konusu ağa ait düğüm noktalarının çalışma uzayına ait olup/olmadığı, mafsalları ve bacak uzunluk sınır kısıtları göz önüne alınarak, ters kinematik yöntem ile araştırılmaktadır. Çalışmanın doğruluk ve hassasiyeti, ters kinematik yöntemle analizde kullanılan örnekleme adım büyüklüğüne bağlıdır. Adım büyüklüğünün büyük seçilmesi halinde hesaplama süresi azalmakla birlikte, çalışma uzayına ait olan noktalar gözden kaçabilmekte, çalışma uzayı içinde boşluklar oluşmaktadır. Adım büyüklüğünün küçültülmesi ile çalışma uzayının içindeki boşluklardan kaçınmak ve daha hassas analiz yapmak mümkündür. Fakat bu durum hesaplama süresini üssel olarak artırmaktadır.

Ayrıca araştırma uzayının şekli ve büyüklüğünün de önceden doğru tespit edilebilmesi, çalışma uzayı analizinde hesaplama süresini ve analizin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle ters kinematik tekniği basit olmasına karşın uzun hesaplama süresi SPM'nin endüstriyel uygulamalarını sınırlandırmaktadır.

SPM'nin gerçek zamanlı uygulamalarında düz kinematik tekniğin kullanılıyor olması nedeni ile önerilen yeni geometrik yöntem de ters kinematik teknik ile birlikte

kısmen düz kinematik teknik de kullanılmıştır. Araştırma uzayına ihtiyaç duyulmaksızın, bacak boy ve mafsalsınır kısıtları göz önüne alınarak ele alınan 6-3 SPM'nın tüm bacak konfigürasyonlarında ulaşılabilen çalışma uzayı, geometrik yaklaşımla ve hibrit kinematik teknik kullanılarak elde edilmektedir.

Ulaşılabilen çalışma uzayının elde edildiği geliştirilen yöntem, geometrik esaslı olması nedeni ile basit ve kolay anlaşılabilir. Çalışma uzayı ile ilgili elde edilen bilgi, SPM seçim ve tasarım aşamaları için çok önemlidir.

THE WORKSPACE ANALYSIS OF STEWART PLATFORM MECHANISM

SUMMARY

The reachable workspace can be defined as a region which consists of points that the coordinate system attached to the geometric center of moving platform reach whatever orientation of moving platform in planar or spatial movements.

In this study, the reachable workspace of 6-3 Stewart Platform Mechanism (SPM) is determined by utilizing a novel geometrical method. Firstly, the development of SPM as a type of parallel mechanism is mentioned. The serial and parallel mechanisms are compared with reference to some advantages and disadvantages inherent to each class. The application areas, classification and design of different types of SPMs are presented. Secondly, singularity, dynamics, control, inverse and forward kinematics of SPM are introduced. Thirdly, the workspace of SPM is particularly investigated as a core subject of this dissertation in detail. Fourthly, the constant orientation workspace of 6-3 SPM is analyzed by utilizing inverse kinematics and discretization methods and the effects of radii of joint locations on workspace of 6-3 SPM are presented. In order to explain the proposed geometric method well, the planar SPM is taken into account and a case study is conducted. Finally, the proposed geometric method relating to 6-3 SPM is mentioned and a case study is conducted. The reachable workspace obtained via the proposed geometric is compared with the constant orientation workspace via discretization method in accordance with attainable points.

In recent investigations related to the constant orientation and orientation workspaces, the search space is covered by a regularly arranged grid in either cartesian or polar forms of nodes. Each node is then investigated to see whether it belongs to the workspace by taking into account all constraints of active and passive joints via inverse kinematics. The accuracy and precision of the boundary depends upon the sampling step that is utilized to form the grid. The larger the sampling step size is, the less the computation time. However, problems occur when the workspace possesses voids. It is possible to avoid the voids in workspace and attain more accurate and more precise analysis by reducing the sampling step. However, the computation time increases exponentially with the sampling step.

Furthermore, that the size and shape of search space must be selected prior to determination of workspace affects directly on computation time and accuracy of workspace analysis. Therefore, inverse kinematic method of SPM limits the practical and industrial application of SPM although it is straightforward and simple. Since forward kinematics is utilized to perform joint space control in real-time applications of SPM, the forward kinematics in addition to inverse kinematics is employed in the proposed geometrical method to make SPM more suitable for the real time applications. The reachable workspace of all possible configurations of 6-3 SPM is obtained by utilizing hybrid kinematics and taking into account all constraints without the search space.

The proposed method based on a geometric approach providing reachable workspace of 6-3 SPM is rather straightforward. The knowledge obtained in the proposed method relating to workspace is great important in the phases of the selection and design of SPM.

1. GİRİŞ

Uçuş simülasyonu, Wilbur ve Orville Wright kardeşlerin 1903 yılında gerçekleştirdikleri ilk motorlu uçuşdan günümüze kadar sivil ve askeri havacılığın önemli bir parçası olmuştur. Uçuş mürettebatına, yerde simülatör içinde görsel algılama ile birlikte doğrusal ve açısal hareketi içeren hareket ivmelenmelerinin nisbeten sağlanması mümkündür. Uçak ile uçuş eğitiminin yanı sıra uçuş simülatörlerinin kullanılması, sadece uçaklı eğitime göre daha yüksek performans artışına neden olmakta ve uçuş eğitim maliyetleri azaltılmaktadır [1]. Ayrıca acil durum prosedürlerinin gerçek uçakla uçmadan önce, pilot tarafından birçok kez yerde simülatörde uygulanması, uçuş emniyeti açısından gerekli bir eğitimidir [2].

FAA kurallarına göre bir teçhizatın uçuş simülatörü olarak adlandırılabilmesi için en az bir hareketli platforma sahip olması gerekmektedir. Aksi halde teçhizat, uçuş simülatörü olarak değil uçuş eğitim aracı (FTD) olarak adlandırılmaktadır [3].

Normal görevlerde sivil ticari bir uçak yaklaşık 1.4 G ile uçarken, yüksek irtifa manevra veya acil durumdan kurtulma eğitimlerinde 3 G veya 4 G tecrübe edilmektedir. Günümüzde düşük G yüklerine maruz ticari uçak, ulaştırma uçak ve helikopter pilotlarının intibak ve tazeleme eğitimlerinde yerde, uçuş sırasında maruz kalacakları G yüklerini hissetmelerini sağlayan uçuş simülatörlerinin hareket sisteminde altı serbestlik derecesine sahip Stewart Platform Mekanizması mevcuttur. Yüksek G yüklerine maruz savaş/eğitim uçak pilot uçuş hareket simülasyonunda ise daha çok yaygın olarak G-seat ve sabit simülatörler ile birlikte yüksek çözünürlüklü projeksiyon sistemleri kullanılmaktadır [4].

Uluslararası sivil havacılık uçuş simülatör standartlarına göre en yüksek seviye olan D seviyesi/ Tip VII için tam uçuş simülatörlerinin (FSS) altı serbestlik derecesine sahip olması gerekmekte olup, D seviyesi tam uçuş simülatörü için hareketli platform gereklilikleri Çizelge 1.1' de özetlenmektedir [5-7].

Çizelge 1.1 : D seviyesi tam uçuş simülatörü hareket gereklilikleri [4].

Eksenler	Yer değiştirme	Hız	İvmelenme
Dikey	± 34 in.	30 in./s	1 G
Yanal	± 60 in.	35 in./s	1 G
Boylamasına	± 60 in.	39 in./s	1 G
Burun aşağı-yukarı	$\pm 35^\circ$	22°/s	400°/s
Sağa-sola yatış	$\pm 33^\circ$	24°/s	400°/s
Sağa-sola dönüş	$\pm 37^\circ$	28°/s	400°/s

Gough tarafından tekerlek test düzeneği olarak üretilmiş bir paralel mekanizma türü olan Stewart Platform Mekanizmasının (SPM) uçuş simulatör hareket sisteminde kullanılması fikri, ilk olarak D. Stewart tarafından 1965 yılında bir makale ile önerilmiştir [8]. Üçü öteleme (heave, sway, surge) üçü de dönme (pitch, roll, yaw) hareketi olmak üzere toplam altı serbestlik derecesine sahip Stewart Platform Mekanizması, yüksek yük/ağırlık oranı, hız, hassasiyet ve rijitlik özellikleri ile günümüzde yalnız uçuş simülatörlerinde değil CNC makinelerden, uzay teleskoplarına kadar endüstrinin ve tıbbın birçok farklı alanında başarı ile kullanılmaktadır [2, 10, 15]. Söz konusu makalenin yayımlanmasını takip eden 15 yıl süresince konu ile ilgili kayda değer bir araştırma yapılmamış olmasına rağmen 1983 yılında Hunt'ın paralel mekanizmaların dolayısıyla SPM'nin potansiyel kullanım alanlarını işaret ettiği çalışması sonrasında, SPM robot manipulatörler alanında en popüler araştırma ve geliştirme konularından biri olmuştur [9,10].

Literatürde Stewart Platform Mekanizmanın tasarımı, tekiliği, dinamiği , kontrolü ve ters kinematiği hakkında değerli araştırmalar bulunmakla birlikte, düz kinematiğinin karmaşık, çalışma uzayının sınırlı olması birçok araştırmacıyı bu konular hakkında araştırma yapmaya yöneltmiştir.

1.1 Stewart Platform Mekanizmasının Tasarımı ve Sınıflandırılması

SPM tasarımı, konfigürasyonu ve sınıflandırılması ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelendiğinde SPM sınıflandırmasının çok farklı başlıkları kapsadığı tespit edilmiştir [11-70]. SPM hakkındaki çalışmaların düzlemsel SPM ve uzaysal SPM olarak iki ana başlıkta toplandığı görülmektedir. Düzlemsel SPM, sabit taban ve hareketli platformla birlikte üç bacaklı oluşmaktadır. Üç serbestlik derecesine sahip olan düzlemsel SPM'nin gerek çalışma uzayı gerekse kinematik analiz yönünden incelenmesi, altı serbestlik derecesine sahip uzaysal SPM'na göre daha kolay olduğu açıktır. Literatürde sabit uzunluklu veya değişebilen uzunluklu bacaklara sahip SPM'ler hakkında da çalışmalar mevcuttur. Ayrıca kullanılan mafsallara göre de SPS ve UPS gibi değişik SPM tipleri vardır. En yaygın olarak kullanılan sınıflandırma şekli, bacakların platforma bağlanma düzenlemesine göre, bir başka ifade ile sabit taban ve hareketli platformdaki bağlantı sayına göre sınıflandırmadır. Bu kapsamda 3-3 SPM, 6-6 SPM, 6-4 SPM ve 6-3 SPM gibi farklı tipler söz konusudur. Ayrıca helikopterlerde ve petrol arama platformlarında kullanılan SPM uygulamalarında olduğu gibi sabit platformun üstte hareketli platformun altta olduğu SPM tipleri de vardır [11,12].

1.2 Tekillik

Tekillik, genel olarak mekanizmanın kontrol edilemediği, istenmeyen bir durumdur. Tekil konfigürasyonlarda bir yandan tüm bacaklar kilitlenirken, diğer yandan mekanizma bir veya daha fazla istenmeyen serbestlik derecesi kazanır veya kaybeder [71]. Bu arada hareketli platform üzerine etkiyen yükleri dengelemek için çok büyük aktif kuvvet uygulanması gerekir, yoksa mekanizma hasarlanır [72]. Bir başlangıç noktasından bir varış noktasına kadar yapılacak yol planlamasında mekanizmanın kesintisiz, sürekli ve yumuşak hareket etmesi istenir [71,73]. Gerek mekanizma tasarımında gerekse mekanizmanın hareket kontrolünde, yol planlamasında tekil noktalardan kaçınmak büyük önem arz etmektedir [74].

Literatürde değişik tekillik sınıflandırmaları vardır. Tekillikler düz, ters ve birleşik tekillikler olmak üzere üç ana gruba ayrılır. İlk grup olan düz tekilliklerdeki konfigürasyonda, ya çalışma uzayının sınırını veya çalışma uzayının çeşitli alt bölgelerini sınırlayan dahili sınırlara ulaşılır. Başka bir deyişle bu tür tekillikler, uç

organın ölü noktaya ulaştığı zaman ortaya çıkar. İkinci grup olan ters tekillikler mekanizmanın kontrol edilemediği ve bacaklar kilitlendiğinde bile uç organın yerel olarak hareket edebildiği zaman meydana gelir. Mekanizmanın yüksek kararlılığına rağmen, uç organdaki herhangi bir harici yüke karşı konulamaz. Bu durumda çalışma uzayının alt bölgelerini kuşatan bazı tekil yüzeyler vardır. Bu nedenle uç organ bir bölgeden diğer bir bölgeye geçemez. Bu koşullarda çalışılan uzayı bu alt bölgelerden birine düşürmek gerekir. Üçüncü grup olan birleşik tekillikler ilk iki tekillik türünden çok daha az farklı bir yapıya sahiptir [71].

Paralel mekanizmaların tekillik analizinde, matris analizi ve Grassman geometrisi yöntemleri yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir [72]. Matris analizinde paralel mekanizmanın Jakobyen matrisinin determinantı incelenir. Tekil konfigürasyonlar Jakobyen matrisin determinantına karşılık gelen doğrusal olmayan denklem kökleridir. Bu çok değişkenli doğrusal olmayan denklem doğrudan çözülemez [74]. Bu yöntemde karmaşık sembolik hesaplama yazılımı kullanılarak tekil konumların sembolik analitik ifadeleri kolayca elde edilir. Fakat mekanizmanın Jakobyen matrisinin oluşturulması oldukça zor ve zaman alıcıdır. Ayrıca mekanizma tekil konfigürasyonda iken bu yöntem kinematik açıdan esasen tekilliği tanımlayamaz. Tekillik analizinde kullanılan ikinci ana yöntem Grassmann çizgi geometri tekniğidir. Grassmann çizgi geometrisi kullanılarak tekil konfigürasyonlardaki paralel mekanizmanın tekilliği açıkça tanımlanır veya tekilliklerin geometrik koşulları belirlenir [72]. Bu iki ana tekillik analiz yönteminin dışında vida teoremi de kullanılan yöntemlerden biridir [74].

1.3 Kontrol

SPM kontrolu için yaygın olarak mafsalsal uzay kontrolu ve görev uzay kontrolu olmak üzere iki kontrol mimarisi kullanılmaktadır. Mafsalsal uzay kontrolünde, hareketli platformun kartezyen koordinat bilgileri kullanılarak ters kinematik yöntemle arzu edilen bacak uzunluk değerleri hesaplanmakta ve gerçek bacak uzunluklarının kontrolör tarafından bu değerlerle olması sağlanmaktadır. Mekanizma rijit bağlı olduğundan hareketli platformun kartezyen koordinatları ile bacak uzunlukları arasında kesin bir ilişki vardır. Eğer altı bacağın uzunluğu uygun olarak kontrol edilirse, hareketli platform arzu edilen yörüngeyi takip edebilir [3, 102, 105].

Mafsalsal uzay kontrol mimarisi SISO (Tekli Girişli-Tekli Çıkışlı) sistem olarak her bir bacak ayrı ayrı kontrol edilecek şekilde geliştirilmektedir. Gerçek ve istenen mafsalsal konumu arasındaki hata, kontrolöre geri besleme sinyali olarak kullanılmaktadır. Mafsalsal uzay kontrolünde ters kinematik yöntem kullanılmakta olup, SPM ters kinematik tekniğinin basit olması nedeniyle, mafsalsal uzay kontrolu basit bir yapıya sahiptir. Buna rağmen örneğin; uçuş simülöründe stall acil durum eğitiminde yüksek genliğe sahip manevralarda mafsalsal uzay kontrolu yüksek izleme performansı veremez. Bunun nedeni söz konusu durumda mafsalsal uzay kontrolünün dinamik eşleşme sağlayamamasıdır [3, 105].

Görev uzay kontrol mimarisi dinamik temellidir ve hareketli platformun kartezyen koordinatlarına ihtiyaç vardır. Bu bilgi konum veya yönelim sensörleri ile düz kinematik yöntemle elde edilebilir. Bununla birlikte söz konusu sensörler çok pahalıdır veya istenen hassasiyeti elde etmek her zaman mümkün olmayabilmektedir. Bu nedenle gerçek zamanlı kontrolde, düz kinematik yöntem kullanmak uygundur [3, 102]. Diğer yandan görev uzay kontrolu SPM'nin dinamik eşleşmesini sağlamakta ve düz kinematik teknik kullanılarak mafsalsal uzayının ölçümleri görev uzayına eşleştirilmektedir. SPM'nin düz kinematik yapısının karmaşık olması nedeniyle görev uzay kontrolu zordur [105].

PID kontrol [101], PD kontrol [107, 112], adaptif kontrol [110, 111], kayma kipli kontrol [104,106,113,114], bulanık kontrol [115] ile bulanık kontrol ve PI kontrolün birlikte uygulandığı [116] çeşitli SPM kontrol uygulamaları literatürde mevcuttur.

1.4 Dinamik Analiz

Dinamik modelleme robotik sistemlerde çok önemlidir. Bir dinamik model belirlenmiş görevleri test etmek için gerçek sisteme ihtiyaç duyulmaksızın robotik sistemin bilgisayar simülasyonu için kullanılabilir [102]. Paralel mekanizmalarda ters ve düz dinamik olmak üzere iki farklı çeşit dinamik model vardır. Ters dinamik modelde uç organın yörünge, hız ve ivme bilgileri verildiğinde hareket ettiren mafsallık kuvvetleri belirlenir. Ters dinamik model ileri beslemeli kontrol uygulamalarında kullanılır. Düz dinamik modelde ise hareket ettiren mafsallık kuvvetleri/torklar bilindiğinde, uç organın yörünge, hız ve ivmesi saptanır. Düz dinamik model simülasyonlarda kullanılır [15,130].

Dinamik analiz konusunda farklı mekanik prensipleri esas alan Newton-Euler yöntemi, Lagrange formülasyonu ve sanal iş prensibi gibi yöntemler geliştirilmiştir. Fakat kapalı çevrim yapı nedeniyle bu yöntemlerle dinamik hesaplama, özellikle gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında çok zaman alıcıdır. Mekanizmanın dinamik modellenmesinde sanal iş prensibi en etkin yaklaşım olarak kabul edilmektedir [129,131,135].

Mekanik sistemin dinamik analizinde, Newton-Euler yaklaşımında katı cismin serbest cisim diyagramları, Lagrange formülasyonunda ise iş ve enerji kavramları esasına dayanır. Bunlar klasik mekanik prensipleridir [127]. Lagrange formülasyonu kapalı formda ifade edilmekte olup, iyi yapılandırılmıştır. Fakat bu yöntemde kısmi türevleri bulmak için çok sayıda sembolik hesaplama gereklidir. Newton-Euler yaklaşımı bacaklar arasındaki tüm kısıt kuvvetlerin ve momentlerin hesaplanmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte mekanizmanın simülasyonu ve kontrolü için bu hesaplamalar gereksizdir. Yukarıda da bahsedildiği gibi sanal iş yöntemi SPM'nin ters dinamik analizi için gerekli dinamik denklemlerin çıkarmada etkin bir yaklaşımdır. Fakat düz dinamik için sanal iş yönteminin uygulanması basit değildir, çünkü mafsallık uzayı ve görev uzayı arasındaki hız dönüşümleri karmaşıktır [129].

Sanal iş yönteminin temel prensibine göre, mekanizma üzerine etkiyen kısıtlarla uyumlu olmak üzere tüm harici, dahili ve ataletsel yükler tarafından yapılan sanal iş herhangi genel bir sanal yer değiştirme boyunca yok olursa mekanizma dinamik

denge durumunda kabul edilir. Mafsallardaki sürtünme kuvvetleri ihmal edildiğinde, mafsallardaki kısıt kuvvetleri tarafından yapılan sanal iş sıfıra eşittir [135].

1.5 Kinematik Analiz

SPM kinematik analiz, ters kinematik ve düz kinematik analiz olmak üzere farklı iki yöntem kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Ters kinematik yöntemde; hareketli platformun konum ve yönelme bilgileri verildiğinde bacak boy uzunlukları hesaplanmaktadır. Düz kinematik problemin çözümünde ise; verilen bacak boyuna karşılık gelen hareketli platformun konum ve yönelim bilgileri hesaplanmaktadır. [155,156]. SPM kinematik analizi ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğu düz kinematik problemin çözümü üzerine yoğunlaşmaktadır [156].

Seri mekanizmalarda düz kinematik analiz kolay, ters kinematik analiz karmaşık iken paralel mekanizmalarda ve dolayısıyla SPM’nda tam tersi bir durum söz konusudur, Ters kinematik analiz kolay, düz kinematik analiz karmaşıktır. Çünkü belirli bacak boylarına karşılık gelen birden çok konfigürasyon mevcuttur. Herhangi bir konfigürasyondaki genel SPM için gerçek ve kompleks çözüm sayısı 40 adettir [19,151].

Mekanizmanın çalışma uzayını belirlemek için normalde düz kinematik yöntem gereklidir. Ancak paralel mekanizmaların çalışma uzayı analizleri söz konusu olduğunda (özellikle ayırıklaştırma yöntemi ile çalışma uzayı analizlerinin araştırma çalışma uzayındaki her bir düğüm noktası için ters kinematik çözüm gerektirmesi ve bunun da çok zaman alıcı olmasına rağmen) basitliği nedeniyle ters kinematik yöntem kullanılmaktadır [157].

Düz kinematik analiz, hem SPM’nın konum kontrolü hem de hareketli platform üzerine yerleştirilen uç organın hız kontrolü açısından gereklidir. Düz kinematik yöntem gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında, görev uzay kontrolünde, kalibrasyonda ve hareket planlamada kullanılmaktadır. Eğer mekanizmanın altı bacağının uzunlukları uygun şekilde kontrol edilirse hareketli platform arzu edilen yörüngeleri izleyebilir [102]. Mekanik basitliği SPM’na birçok mühendislik uygulaması için potansiyel sağlamasına rağmen düz kinematiğinin karmaşıklığı, onun gerçek zamanlı endüstriyel uygulamalar için kullanılmasını sınırlamaktadır. Düz kinematik problemin çözümü için birçok araştırmacı tarafından analitik ve

sayısal yöntem esaslı çalışmalar yapılmıştır. Analitik esaslı çalışmalar yüksek dereceli doğrusal olmayan denklemlerin çözümünü gerektirmekte iken sayısal yöntem esaslı çalışmalar da iyi bir başlangıç değeri ile çok sayıdaki iterasyon gerektiren zaman alıcı çalışmalardır. Bu durumlar da SPM'nın yüksek hızlı gerçek zamanlı mühendislik uygulamaları için kullanımını elverişsiz hale getirmektedir [212].

1.6 Çalışma Uzayı Analizi

Çalışma uzayı, paralel mekanizma hareketli platformunun geometrik merkezinin/uç organın, ulaşabildiği tüm koordinatlardan, noktalardan oluşan bölgedir. [213,214].

Paralel mekanizmaların kapalı çevrim yapısı, çalışma uzaylarını sınırlar ve çalışma uzayı içinde karmaşık kinematik tekillikler oluşturur. Ayrıca mekanizmanın geometrisi nedeniyle çalışma uzayı içinde boşluklar da meydana gelebilir. Bu nedenlerle çalışma uzayı içinde yörünge planlama çok güçleşir [215]. Paralel mekanizmalar ve dolayısıyla SPM için problem, çalışma uzayı içindeki engellerden kaçınma değil, verilen yörüngenin tümüyle mekanizmanın çalışma uzayı içinde olup olmadığını tespit etmek veya iki konum arasındaki yörüngenin çalışma uzayında bulunması ve tekilliksiz olmasıdır. Etkin yol planlama için çalışma uzayının ayrıntılı analizi gereklidir [216]. Çünkü tüm robotlar belirlenmiş görevleri yerine getirme amacıyla kullanılırlar ve verilen görevin başarılabilmesi için ulaşılması gerekli olan tüm konum ve yönelimlerin de çalışma uzayı içinde bulunması gereklidir. Robotun ve ilgili ekipmanların istenen görevleri emniyetle yerine getirebilmesi ve kullanıcının zarar görmemesi açısından ihtiyaç duyulan çalışma ortam boyutlandırmasında çalışma uzayı ana tasarım kriterlerinden biridir [213].

Çalışma uzayı analizi ve optimizasyonu mekanizma tasarımında önemlidir. Paralel mekanizmaların seri mekanizmalara göre birçok üstün özelliği olmasına rağmen, çalışma uzayının daha küçük olması nedeniyle çalışma uzayı nitelik ve niceliği en önemli performans indislerindendir ve tasarım ile mekanizma hareket planlamasında kritik öneme sahiptir. Bu nedenle bacakların, mafsalların, sabit taban ve hareketli platformun geometrik parametreleri çalışma uzayını en iyileyecek şekilde tasarlanmalıdır [217].

Çalışma uzayının şekli ve büyüklüğü ana tasarım kriterlerindendir [218]. CNC makinelemede kullanılan SPM çalışma uzayını ve sınırlarını bilmek, kullanım aralığını genişletmek açısından gereklidir. Ayrıca, iş parçasının konumu ve yönelimi göz önüne alındığında işlenip işlenemeyeceğine karar verilmesi çalışma uzayı ile doğrudan ilgilidir [219]. Çünkü makineleme işlemi gibi paralel mekanizmaların endüstrideki pratik uygulamaları ve çevrim dışı programlamada tanımlanan görevin başarısı için, önceden tanımlanan takım yolunun çalışma uzayı içinde olması gerekmektedir [13]. İş parçasının şeklindeki, hacmindeki düzensizliklerin bilinmesi ile tezgahı kullanan operatör ve üretim mühendislerinin işini kolaylaştıracak ve iş gücü ile malzeme kayıpları en aza indirilecektir. Ayrıca bu bilgi kesici takım ile iş parçası arasında çarpışma olmaması için gerekli önlemlerin alınması açısından da önemlidir [220].

Genellikle SPM çalışma uzayı ile ilgili araştırmalar, ulaşılabilen çalışma uzayı [221-230], sabit yönelim/öteleme çalışma uzayı [231-235] ve yönelim çalışma uzayı [236-245] olarak literatürde üç ana başlık altında yoğunlaşmaktadır.

Farklı çalışma uzaylarını elde etmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır [214]. Çalışma uzayı analizinde kullanılan yöntemler genel olarak sayısal yöntemler, analitik yöntemler ve geometrik yöntemler olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır [216,247,248].

Çalışma uzayını belirlemek için kullanılan sayısal yaklaşımların çoğunda ayrıklaştırma yöntemi tercih edilmektedir [248]. Ayrıklaştırma yaklaşımında araştırma uzayı kartezyen ya da kutupsal koordinatlarda düzenli olarak çözüm ağına ayrılmaktadır. Söz konusu ağa ait her bir düğüm noktasının (nod) çalışma uzayına ait olup olmadığı ilgili kısıtlar göz önüne alınarak ters kinematik yöntem kullanılarak analiz edilmektedir. Kısıtları sağlayan düğüm noktaları çalışma uzayına dahil edilmektedir. Araştırmanın hassasiyeti ağ oluşturmak için kullanılan örnekleme adım büyüklüğüne bağlıdır. Hesaplama süresi örnekleme adım büyüklüğüne bağlı olarak üssel olarak değişmektedir. Bu durum hassasiyet üzerinde önemli bir etkidir. Ayrıca çalışma uzayının boşluklar içermesi de problemlere neden olmaktadır. Bu durumda boşlukların saptanabilmesi için adım büyüklüğü küçültülmekte ve iterasyon sayısı, dolayısıyla da hesaplama süresi artmaktadır. Söz konusu problemle ilgili

olarak bazı araştırmacılar çalışma uzayını belirlemek amacıyla sayısal yöntemi esas alan optimizasyon teknikleri kullanmışlardır [252].

Analitik yöntemlerde çalışma uzayı sınırları optimizasyon problemi olarak ele alınmaktadır. Analitik yaklaşımların çoğu önemli ölçüde robot mimarisine bağlıdır. Bu nedenle analitik yöntemlerin geliştirilmesi güçtür ve belirli manipulator uygulamaları için kullanışlıdır [216].

Geometrik yöntem, ilk olarak Gosselin tarafından önerilmiş olup, SPM'nin ulaşılabilen sabit yönelim/öteleme çalışma uzayını tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemde; her bir bacak tarafından oluşturulan ulaşılabilen çalışma uzaylarının kesişimi ile çalışma uzayı sınırları elde edilmektedir [231].

1.7 Tezin Önemi ve Katkısı

Literatürde yönelim ve sabit yönelim (öteleme) çalışma uzaylarını kapsayan birçok değerli çalışma vardır. Bu çalışmaların çoğunda; ele alınan mekanizmanın daha önceden tanımlanan küresel, silindirik veya prizmatik şekle sahip araştırma uzayındaki çözüm ağı düğüm noktalarına ulaşp/ulaşamayacağı, ters kinematik yöntem kullanılarak değerlendirilmekte ve çalışma uzayı belirlenmektedir. Bu durum ilk olarak uygun şekil ve büyüklükte araştırma uzayı tanımlamayı gerektirmektedir. Araştırma uzayında tanımlanacak olan nokta sayısı ve adım büyüklüğü doğrudan hesaplama süre ve hassasiyetini etkileyecektir.

Mekanizmanın hareketi sırasında alabileceği tüm bacak konfigürasyonları için, bacak ve mafsalları açısı kısıtları göz önüne alınarak, ulaşabilecek çalışma uzayının bilinmesi tasarım mühendisi ve operatörün mekanizma seçim, görev/yol planlama ve kullanım işlerini kolaylaştıracaktır. SPM'nin endüstriyel kullanımında, özellikle makineleme işlemlerinde, önceden tanımlanmış takım yolunun çalışma uzayı içinde olması ve uç organın verilen bilgileri için tanımlanan görevin, çalışma uzayında kontrol sistemi tarafından garanti ediliyor olması gereklidir [13].

Ayrıca tüm bacak konfigürasyonları için ulaşılabilecek nokta bilgileri, çevrim dışı belirlendikten sonra yapay sinir ağları gibi optimizasyon tekniklerinde sinir ağının eğitilip çevrim içi olarak bu bilgilerin kullanılması da mümkündür [42].

Bu gerçeklerden hareketle tasarım mühendislerinin ve operatörlerin işlerini kolaylaştırmak için gerekli çalışma uzayı bilgisini veren geometrik esaslı yeni bir yöntem bu tez çalışması kapsamında geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında önerilen algoritma için MATLAB programında kodlar yazılmıştır Yöntem üç ana aşamadan oluşmaktadır.

Özet olarak birinci aşamada; ilk iki bacağın uzunlukları sırasıyla , en küçük ve en büyük bacak uzunluk değerleri göz önüne alınarak, değiştirilmekte ve hareketli platformun ilk köşe noktasının koordinatları elde edilmektedir.

İkinci aşamada; ilk iki köşe noktası arasındaki geometrik ilişkiden faydalanılmaktadır. Bu aşama alt kısımlardan oluşmaktadır. Hareketli platformun ikinci köşe noktası, üçüncü ve dördüncü bacakların hareketli platformda birleştiği nokta olup, ilk köşe noktasını merkez ve hareketli platformun kenar uzunluğunu yarıçap kabul eden küre üzerindedir. Söz konusu köşe, ilgili bacakları sabit tabanda birleştiren kenar üzerinde merkezi bulunan ve bu merkezden geçen, sabit taban düzlemine dik olarak özel tanımlanan düzlemdeki çember üzerinde de bulunmaktadır. İkinci köşe noktasının koordinatlarını belirlemek için küre ile çemberin kesişim noktaları araştırılır. Bu amaçla sabit düzlem üzerindeki kürenin izdüşümü olan çember ve çemberin izdüşümü olan doğrunun kesişme durumu incelenir. Ayrıca kürenin özel tanımlanan düzlem üzerindeki izdüşümü çemberi ile bu düzlem üzerinde bulunan diğer çemberin kesişim durumu da incelenir. Her iki kesişimin de mevcut olması halinde çözüm kümesinden ikinci köşe noktasının koordinatları elde edilir. İlk iki köşe noktasının koordinatlarının tespiti kısmen düz kinematik yöntem kullanılarak yapılmaktadır.

Üçüncü aşamada, üçüncü köşe noktasının tespitinde ters kinematik yöntemden faydalanılmaktadır. İlk iki köşe noktası sabitlenmiş kabul edilirse ve üçüncü köşe noktasının ilgili bacaklarının uzunlukları sırasıyla, en küçük ve en büyük bacak uzunluk değerleri göz önüne alınarak değiştirilirse, söz konusu köşe bir çember

üzerinde olacaktır. Çember üzerinde belirli aralıklarla noktalar alınır ve bu noktalarla ters kinematik analiz gerçekleştirilir. Bacak boyu ve mafsalsal açısı kısıtlarını sağlayan noktalar, söz konusu köşenin koordinatlarının çözüm kümesine dahil edilir. Üç köşe noktasının koordinatları belirlendikten sonra dönüşüm matrisinden de yararlanılarak, hareketli platformun geometrik merkezi tespit edilir. Üç köşe noktasının muhtemel tüm konumları için ilgili işlemler tekrarlanarak, 6-3 SPM'nin kısıtlar dahilindeki tüm konfigürasyonları için ulaşılan çalışma uzayı belirlenir ve çizdirilir.

Geometrik esasa dayanan yöntemin ayrıntıları Bölüm 6'da sunulmaktadır. Önerilen geometrik yöntemin ve kapsamının daha iyi anlaşılabilmesi için düzlemsel SPM ulaşılabilen çalışma alanı önerilen yöntemle ve platformların paralel durumda olduğu durumdaki sabit yönelim çalışma alanı ise ayrıklaştıma yöntemi ile elde edilerek kıyaslanmış ve önerilen yöntemle elde edilen çalışma alanının diğer çalışma alanını kapsadığı tespit edilmiştir. Söz konusu bölümde ayrıca önerilen geometrik yöntem kullanılarak 6-3 SPM ulaşılabilen çalışma uzayı tespit edilmiştir. Tez kapsamında; Bölüm 2 Stewart Platform Mekanizmasının gelişimi, paralel mekanizmalar ile seri mekanizmaların karşılaştırılması, kullanım alanları yapısı ve sınıflandırılması konularını içermektedir. Bölüm 3'de Stewart Platform Mekanizmasının literatürde sıkça karşılaşılan konularından tekillik, kontrol, dinamik ve kinematik analiz konuları ele alınmaktadır. Bölüm 4'de çalışma uzayı kavramı ayrıntılı olarak incelenmektedir. Bölüm 5'de ters kinematik yöntem kullanılarak 6-3 SPM'nin sabit yönelim (öteleme) çalışma uzayı belirlenmekte ve bu kapsamda platform mafsalsal konum yarıçaplarının çalışma uzayına etkisi analiz edilmektedir. Bölüm 7'de sonuç ve öneriler sunulmaktadır.

Önerilen yöntemin ters kinematik yöntemle birlikte, özellikle kontrol mühendisliği uygulamaları kapsamındaki gerçek zamanlı görev planlamalarında kullanılan düz kinematik analizi de kısmen içeriyor olması ve tüm işlemlerin karmaşık denklemler ile zaman alıcı iterasyonlardan uzak, basit geometrik ilişkilerin kullanılarak yapılıyor olması ayrıca bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

2. SPM’NİN GELİŞİMİ, KULLANIMI VE SINIFLANDIRILMASI

2.1 Stewart Platform Mekanizmasının Gelişimi

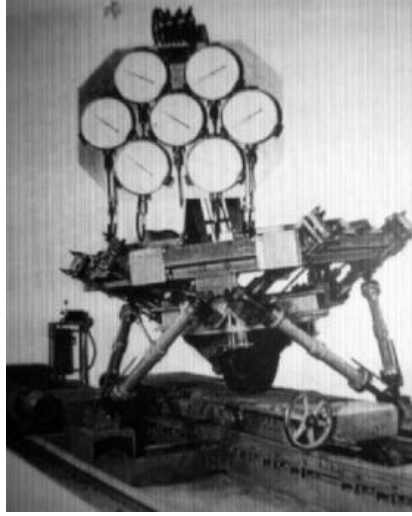
Robot kelimesi, ilk olarak 1920 yılında Çek yazar Karel Capek tarafından “Rossum’s Universal Robots (Rossum’un Evrensel Robotları)” adlı tiyatro oyununda kullanılmıştır. Kelime Çek dilinde "herhangi bir ücret almaksızın zorunlu olarak el işleri yapan işçi" anlamına gelen “robota” sözcüğünden türetilmiştir. Robotik (Robotics)” sözcüğü ise ilk kez, 1941 yılında Isaac Asimov tarafından yazılan “Runaround” isimli bilim-kurgu türündeki kısa öyküde kullanılmıştır. Eserde geçen robot Merkür gezegeninde selenyum elementi madeninde çalışmaktadır.

Uluslararası Standartlar Organizasyonu (ISO) 8373 de robot “endüstriyel otomasyon uygulamalarında bir yere sabitlenmiş veya hareketli olarak kullanılan, otomatik olarak kontrol edilebilen, programlabilen üç veya daha çok eksenli çok amaçlı manipulatör” olarak tanımlanmaktadır.

İlk elektronik, otonom robotlar (Elmer ve Elsie) 1948 yılında İngiltere’ de Grey Walter tarafından üretilmiş olsa da sayısal, programlanabilir ilk robot patenti, robotların babası olarak tanınan Joseph Engelberger ve ortağı George C.Devol Jr. tarafından Devol adına 1961 yılında Amerika Birleşik Devletleri’nde alınmış ve ilk endüstriyel robot olan Unimate üretilerek General Motors şirketinin montaj hattında pres dökümden sıcak metal parçaların kaldırılarak istiflenmesinde kullanılmaya başlanmıştır [14].

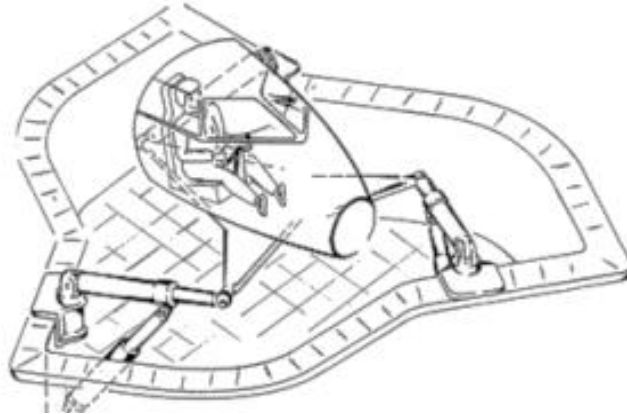
Dunlop lastik fabrikasında otomotiv mühendisi olarak çalışan Dr. Eric Gough, boyları değiştirilebilen altı bacadan oluşan ve bacakların bir ucunun zemine diğer ucunun da hareketli bir platforma bağlı olduğu Şekil 2.1 de gösterilen universal lastik test makinasını 1954 yılında üretti. Platforma tutturulan otomobil lastiği bir bant üzerinde hareket ettiriliyor ve değişik yükler altında lastikte meydana gelen aşınma

ve yıpranmalar ölçölüyordu. Bu boyları değiştirilebilen altı bacaklı test makinası bir paralel mekanizmaydı [15].



Şekil 2.1 : Eric Gough'un üniversal lastik test makinesi [15].

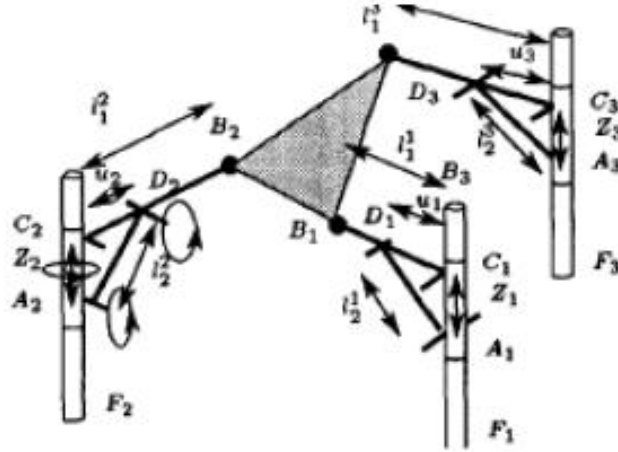
1965 yılında ise D.Stewart yazdığı makalede altı serbestlik dereceli (6 DOF) Şekil 2.2 de gösterilen hareketli bir platformun helikopter pilotlarının eğitiminde uçuş simülatörü olarak kullanılmasını önermiştir [8].



Şekil 2.2 : Stewart'ın önerdiği uçuş simülatörünün şematik gösterimi [8].

D.Stewart'ın makalesinde anlattığı altı serbestlik derecesine sahip uçuş simülatörü bir adet hareketli üçgen platform ve bir adet sabit platform ile altı bacedan oluşmaktaydı.

Şekil 2.3 de gösterilen bacaklardan üç tanesinin birer uçları hareketli platforma küresel, diğer uçları sabit platforma iki eksenli yataklarla, diğer üç bacağın ise birer uçları sabit platforma iki eksenli, diğer uçları da hareketli platforma tek eksenli yataklarla bağlıydı.



Şekil 2.3 : D.Stewart tarafından önerilen mekanizmanın mimarisi [8].

Bu altı serbestlik dereceli hareketli platform, D.Stewart'a atfen Stewart Platform Mekanizması olarak adlandırılmakla birlikte bu mekanizmanın benzeri daha önce lastik test makinası olarak Dr. Eric Gough tarafından önerildiği için Stewart-Gough Mekanizması olarak da adlandırılmaktadır. Ayrıca mekanizma altı bacadan oluştuğu için Hexapod olarak da adlandırılmakta olup, bu isim Geodetic Technology firmasının ticari markası olarak tescillenmiştir. Uçuş simülatörü olarak kullanılmak üzere Şekil 2.4 de gösterilen ilk mekanizma 1960' lı yılların ortalarında Skorsky firmasının talebi üzerine, helikopterler için Klaus Cappel tarafından tasarlanmış ve üretilmiştir [15].



Şekil 2.4 : Klaus Cappel tarafından tasarlanan uçuş simülatörü [15].

Hunt, Stewart'ın uçuş simülatörüne benzer paralel mekanizmaların daha iyi rijitlik ve hassas konumlandırma avantajları ile seri mekanizmaların yerine robotik uygulamalarda kullanılmasını önermiştir. Dasgupta ve Mruthyunjaya'ya göre bu öneri SPM'nin robotik uygulamaları için bir başlangıç noktası olmuştur [11].

2.2 Seri ve Paralel Mekanizmaların Karşılaştırması

Robotlar algılama, haberleşme ve hareket etme/ettirme yetenekleri ile günümüzde ağır makine parçalarının kaynak edilmesi, nükleer santrallerde onarım yapılması, deniz altından enkaz çıkarılması, Mars gezegeni üzerinde araştırma yapılması, mayınlı arazilerin temizlenmesi gibi insanların kullanılmadığı, hassasiyet gerektiren, tehlikeli veya rutin ortamlarda görev yapmaktadırlar. Robotlar endüstride özellikle otomotiv sektörü gibi sektörlerin seri üretim bantlarında tekrarlı, hassas işlerde insan hatalarını ortadan kaldırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu robotlar seri bağlanmış bağlardan oluşan Şekil 2.5 de gösterilen seri mekanizmalar olup, açık döngülüdürler.



Şekil 2.5 : Otomobil üretim bandında kullanılan seri mekanizma [14]

Paralel mekanizmalar, Şekil 2.6 da gösterildiği gibi hareketli platformun sabit platforma birbirinden bağımsız en az iki kinematik bağla bağlandığı kapalı döngüye sahip mekanizmalardır. Stewart Platform Mekanizması da altı bacaklı bir paralel mekanizma türüdür.



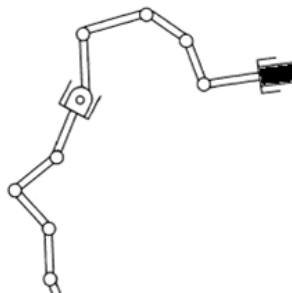
Şekil 2.6 : Bir paralel mekanizma olan Delta robot [14].

Laser kesme gibi hafif makinalama işlemlerinde kullanılan, her iki mekanizmanın avantaj ve dezavantajlarının optimize edildiği Şekil 2.7 de gösterildiği gibi hibrit mekanizmalar da mevcuttur. Ancak hibrid yapılarda yönelme hareketi yeteneği yüksek olmasına rağmen rijitlik düşmektedir [16,17].



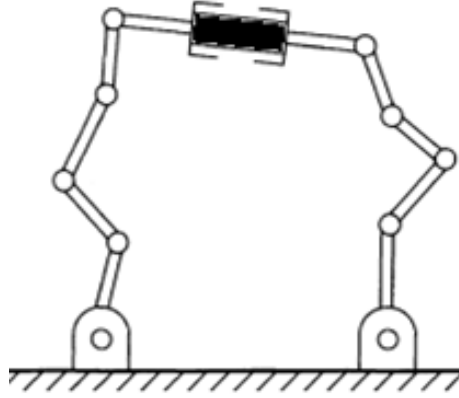
Şekil 2.7 : Paralel ve seri mekanizmalardan oluşan bir hibrit mekanizma [16].

Memeliler, böcekler veya yılanlar gibi çeşitli canlılardan esinlenen bilim insanları mekanik tasarım, kontrol, seyrü sefer gibi alanlarda benzer mekanizmalar geliştirmişlerdir [18]. Şekil 2.8 de gösterilen kinematik bağların seri olarak birbirine bağlandığı açık döngülü seri mekanizmalar, insan koluna benzerler. İnsan kolunun avantaj/ dezavantajlarına sahiptirler. Çalışma uzayları geniş, manevra kabiliyeti yüksek, fakat eklentili yapısı nedeniyle yük taşıma kabiliyetleri, hassasiyetleri ve rijitlikleri zayıftır. Ağır yükler altında eğilmeye ve yüksek hızlarda salınım meyillidirler.



Şekil 2.8 : Seri mekanizmanın şematik gösterimi.

Şekil 2.9 da şematik olarak gösterilen paralel mekanizmalar kapalı döngülü mekanizmalar olup, çalışma uzayları küçük olmasına rağmen yüksek taşıma kapasiteleri, hassasiyetleri ve rijitlikleri yüksektir. Yüksek yük taşıma kapasitesi, iyi dinamik performans ve hassas konumlandırma gerektiren durumlarda seri mekanizmalara alternatif olarak paralel mekanizmalar kullanılmaktadır [19].



Şekil 2.9 : Paralel mekanizmanın şematik gösterimi.

Benzer durumu tabiatta da görmek mümkündür. İki ayaklı insanoğlu ile karşılaştırıldığında birbirine paralel çok ayaklı hayvanlar yük altında daha kararlıdır. Ayrıca insanlar ağır yükleri kaldırırken her iki kolunu birlikte kullanırlar. Yazı yazma gibi hassas işlerde üç parmaklarını paralel olarak birlikte kullanırlar [11]. Fichter ve McDowell seri ve paralel mekanizmaları avantaj ve dezavantajlarını göz önüne alarak karşılaştırmışlardır [20]. Her iki sınıf mekanizmanın özet karşılaştırması Çizelge 2.1 de sunulmaktadır.

Çizelge 2.1: Seri ve paralel mekanizmaların karşılaştırması.

MEKANİZMA TÜRÜ	ÖZELLİK			
	Çalışma Uzayı	Rijitlik	Hassasiyet	Rijidite

Seri	Büyük	Düşük	Düşük	Düşük
Paralel	Küçük	Yüksek	Yüksek	Yüksek

Seri ve paralel mekanizmalar tekillik açısından kıyaslanacak olursa; seri mekanizmalarda tekillik durumunda serbestlik derecesi kaybetme ve kısmi kilitlenme söz konusu iken, paralel mekanizmaların baskın tekilliğinde serbestlik derecesi kazanma ve kontrol edilememe durumu vardır.

Seri ve paralel mekanizmalar kinematik açıdan kıyaslanacak olursa; bacak boyları ve mafsalları verildiğinde konum ve yönelimin hesaplandığı düz kinematik hesaplama seri mekanizmalar için basit, fakat konum ve yönelimden yola çıkarak bacak boy ve mafsalları hesaplandığı ters kinematik hesaplamalar karmaşıktır. Paralel mekanizmalar için ise tam tersi bir durum söz konusudur. Paralel mekanizmaların ters kinematik hesaplamaları basit olmasına rağmen, düz kinematik hesaplamaları genellikle yüksek dereceli lineer olmayan denklemleri içermesi nedeniyle karmaşıktır. Ayrıca paralel mekanizmaların ve dolayısıyla Stewart Platform Mekanizmasının düz kinematik hesaplamasında belirli bir bacak boy ve mafsalları açısına birden fazla konfigürasyon karşı gelmektedir [19].

2.3 Stewart Platform Mekanizmasının Kullanım Alanları

Uçuş simülatörlerinden denizaltı araştırmalarına, deprem simülasyonlarından CNC talaşlı imalat çalışmalarına, tıptan uzay çalışmalarına kadar çok geniş uygulama alanları olan Stewart Platform Mekanizmasının belli başlı kullanım alanları aşağıda özetlenmektedir:

1.7.1 2.3.1 Simülatörlerde SPM kullanımı

SPM ilk önerim amacıyla olduğu gibi uçuş simülatörü olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.10 da gösterilen uçuş simülatöründe uçuş sırasında vücudun maruz kalacağı öteleme ve yönelme hareketleri oluşturularak, pilot/pilot adayının yerde, emniyetle ve daha az maliyetle uçuş eğitimi yapması sağlanmaktadır.



Şekil 2.10 : Airbus A340 uçuş simülatörü [15].

1.7.2 2.3.2 Uzay çalışmalarında SPM kullanımı

SPM hassas konumlandırma özelliği nedeniyle Şekil 2.11 de gösterilen uzay teleskop aynalarının ve optiklerinin ayarlanmasında ve titreşim kontrolünde kullanılmaktadır



Şekil 2.11 : Uzay teleskobunda SPM kullanımı (PI) [235].

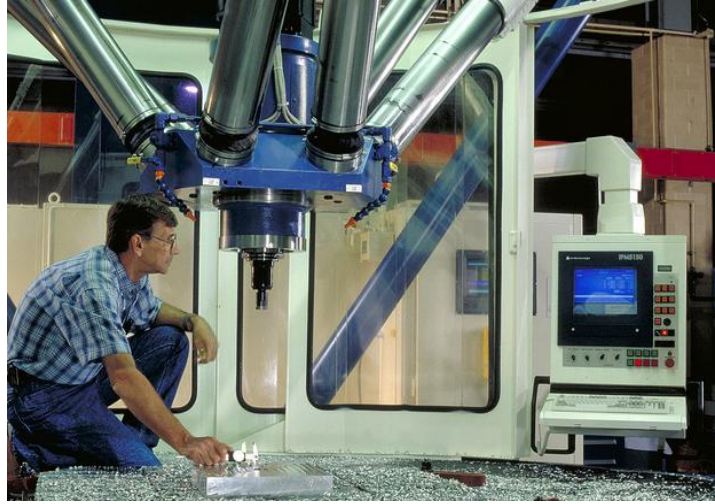
Uzay teknolojileri kapsamında SPM ayrıca Şekil 2.12 de gösterilen uydu çanağı kontrol ve konumlandırmasında kullanılmaktadır.



Şekil 2.12 : Uydu çanağında SPM kullanımı (PI) [235].

1.7.3 2.3.3 CNC tezgahlarda SPM kullanımı

Altı serbestlik dereceli SPM, klasik tezgahlara göre daha yüksek hızı, hassasiyeti ve rijitliği ile Şekil 2.13 deki gibi CNC tezgahlarda talaşlı imalatla karmaşık şekilli malzeme işlemede kullanılmaktadır.



Şekil 2.13 : Ingersoll CNC tezgahında SPM kullanımı [15].

1.7.4 2.3.4 Tıpta SPM kullanımı

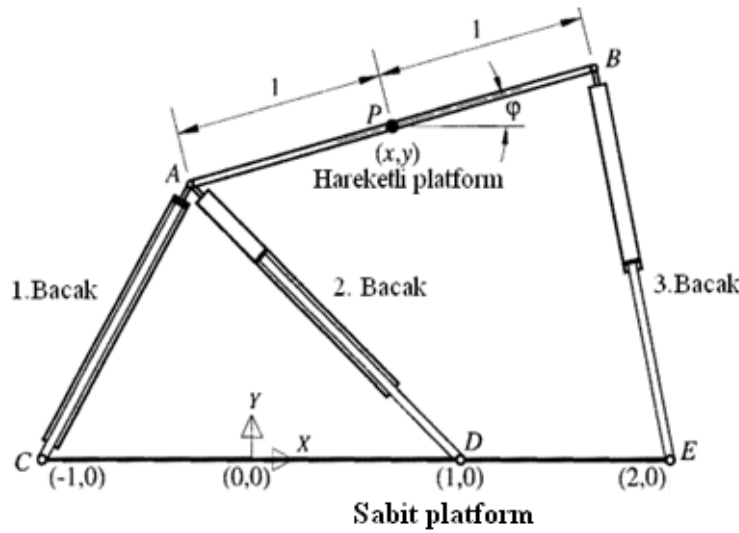
SPM, başta cerrahi operasyonlar olmak üzere yüksek hız ve hassasiyet özelliği ile Şekil 2.14 de gösterildiği gibi tıpta kullanılmaktadır.



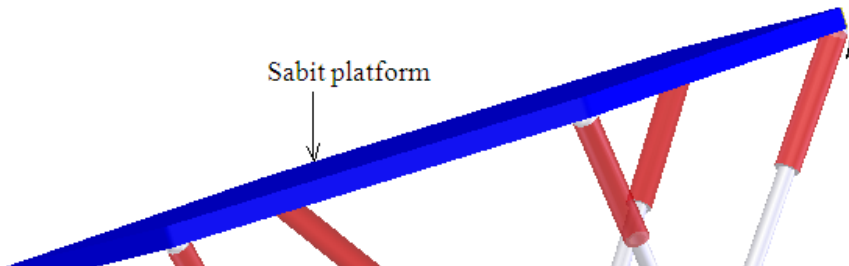
Şekil 2.14 : Ameliyatlarda mikroskopun hassas kontrolü için SPM kullanımı [15].

2.4 Stewart Platform Mekanizmasının Yapısı, Tasarımı ve Sınıflandırılması

SPM yapısal olarak rijit sabit ve hareketli platformlar, değişebilen/sabit uzunluklu bacaklar (aktif mafsall) ve bacaklarla platform arasındaki bağlantıyı sağlayan mafsallardan (pasif mafsall) oluşmaktadır. Literatürdeki SPM yapısı, tasarımı ve sınıflandırması ile ilgili çalışmalar [20-70] incelendiğinde çok farklı SPM sınıflandırmalarının olduğu görülmektedir. Şekil 2.15 de gösterildiği gibi SPM'nin düzlemsel ve Şekil 2.16 da gösterildiği gibi uzaysal olmak üzere iki türü mevcuttur.



Şekil 2.15 : Doğrusal eyleyicili düzlemsel SPM [247].



Şekil 2.16 : SPM'lı CNC tezgah kafasının katı modeli.

Düzlemsel SPM üç serbestlik derecelidir. Yaygın olarak ele alınan uzaysal SPM dır. Söz konusu SPM tipi üçü öteleme ve üçü de yönelme (dönme) olmak üzere toplam altı serbestlik derecesine sahiptir. Sabit bir alt platform ve hareketli bir üst platformdan oluşmakla birlikte, örneğin; Şekil 2.16 da gösterilen katı model CNC tezgah kafasında olduğu gibi, uzay teleskoplarında ve petrol arama çalışmalarında kullanılanlarda olduğu gibi hareketli alt platform ve sabit bir üst platformdan meydana gelenler de vardır.



Şekil 2.17 : Değişken uzunluklu bacaklara sahip SPM [15].

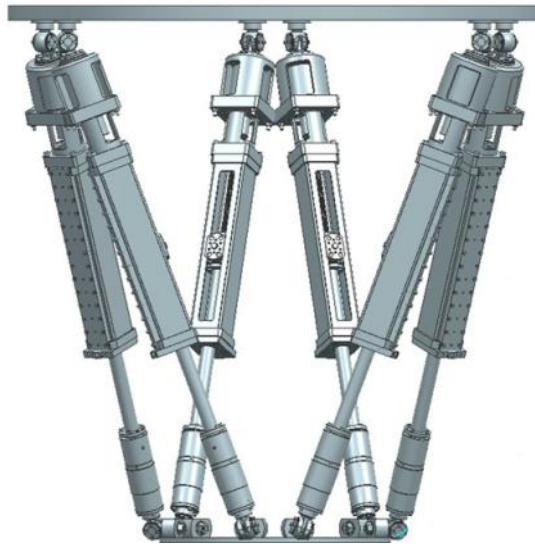
Platformları birbirine bağlayan bacak olarak Şekil 2.17 de gösterildiği gibi değişken uzunluklu (doğrusal eyleyici, piston) veya Şekil 2.18 de gösterildiği gibi sabit uzunluklu bacaklar da kullanılmaktadır.



Şekil 2.18 : Sabit uzunluklu bacaklara sahip SPM [15].

Kullanılan mafsallara göre de SPM sınıflandırması yapılmaktadır. Bacaklar platformlara mafsallarla bağlanmaktadır. Mafsallar mekanizmanın dönme veya doğrusal hareket yapmasına imkan tanır. Küresel (ball-in-socket) ve Hooke türü universal mafsallar yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin prizmatik bacaklar sabit platforma ve hareketli platforma küresel mafsallarla bağlanabildiği gibi (SPS), sabit platforma universal mafsalla hareketli platforma küresel mafsalla bağlandığı (UPS) tipleri de vardır.

En yaygın olarak kullanılan SPM sınıflandırma şekli, bacakların platformlara bağlanma düzenlemesine göre, bir başka ifade ile hareketli ve sabit platformdaki bağlantı noktalarının sayısına göre sınıflandırma [11,12]. Başlangıçtaki tasarımlarda, bacakların düzenlemesi hem hareketli platform hem de sabit platformun üçgen şeklinde olduğu ve bacakların çiftler halinde her iki platforma bağlandığı yapı (oktahedral yapı), diğeri de üçgen şeklinde hareketli platforma üç noktadan, sabit platforma ise farklı altı noktadan bacakların bağlandığı başlıca iki şekilde yapılmaktaydı. Bunlar Şekil 2.19 da gösterilen 3-3 SPM ve 6-3SPM olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca 6-4, 6-6 SPM vs. tipleri de vardır.



Şekil 2.19 : 3-3 SPM'nın katı modeli [132].

Ayrıca bacak uzunlukları sabit olmakla birlikte Şekil 2.18 de gösterildiği gibi bacakların platformlara bağlandığı mafsalları konumlarının çember üzerinde değiştirildiği, değişken geometrili SPM'da mevcuttur [15].

Bu tez çalışması kapsamında rijit düzgün altıgen şekle sahip sabit platform ve rijit eşkenar üçgen şekle sahip hareketli platformdan oluşan 6-3 Stewart Platform Mekanizması ele alınmaktadır. Söz konusu mekanizmanın değişik yükler altında ve sıcaklıklarda malzeme özelliklerinin değişmediği, boyutlarının sabit kaldığı kabul edilmektedir.

3. TEKİLLİK, KONTROL, DİNAMİK VE KİNEMATİK ANALİZ

3.1 Tekillik

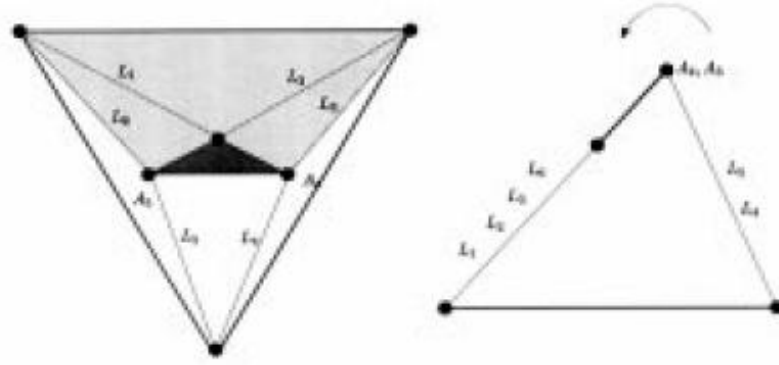
Tekillik, genel olarak mekanizmanın kontrol edilemediği istenmeyen bir durumdur. Tekil konfigürasyonlarda bir yandan tüm bacaklar kilitlenirken, diğer yandan mekanizma bir veya daha fazla istenmeyen serbestlik derecesi kazanır veya kaybeder [71]. Bu arada hareketli platform üzerine etkiyen yükleri dengelemek için çok büyük aktif kuvvet uygulanması gerekir, yoksa mekanizma hasarlanır [72]. Bir başlangıç noktasından bir varış noktasına kadar yapılacak yol planlamasında mekanizmanın kesintisiz, sürekli ve yumuşak hareket etmesi istenir [71,73]. Gerek mekanizma tasarımında gerekse mekanizmanın hareket kontrolünde, yol planlamasında tekil noktalardan kaçınmak büyük önem arz etmektedir [74].

Paralel mekanizmaların tekillik analizinde, matris analizi ve Grassman geometrisi yöntemleri yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir [72].

Matris analizinde paralel mekanizmanın Jakobyen matrisinin determinantı incelenir. Tekil konfigürasyonlar Jakobyen matrisin determinatına karşılık gelen doğrusal olmayan denklem kökleridir. Bu çok değişkenli doğrusal olmayan denklem doğrudan çözülemez [74]. Bu yöntemde karmaşık sembolik hesaplama yazılımı kullanılarak tekil konumların sembolik analitik ifadeleri kolayca elde edilir. Fakat mekanizmanın Jakobyen matrisinin oluşturulması oldukça zor ve zaman alıcıdır. Ayrıca mekanizma tekil konfigürasyonda iken bu yöntem kinematik açıdan esasen tekilliği tanımlayamaz. Tekillik analizinde kullanılan ikinci ana yöntem Grassmann çizgi geometri tekniğidir. Merlet, Jakobyen matrisin determinantından kaçınmak amacıyla bazı özel durum SPM tiplerine ait tekillikler üzerine Grassmann geometrisini esas alan yaklaşım kullanmıştır. Bu özel tip mekanizmaların her biri için tekil konfigürasyona neden olan geometrik koşul sayısı farklıdır. Bu yaklaşım karışık geometrik problemler ve denklemler içermektedir [77].

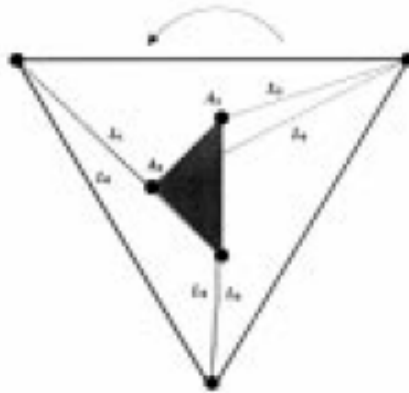
Grassmann çizgi geometrisi kullanılarak tekil konfigürasyonlardaki paralel mekanizmanın tekilliği açıkça tanımlanır veya tekilliklerin geometrik koşulları belirlenir [72]. Bu iki ana tekilik analiz yönteminin dışında vida teoremi de kullanılan yöntemlerden biridir [74].

İlk olarak Hunt Şekil 3.1 de gösterildiği gibi prizmatik eyleyiciden geçen tüm doğruların ortak bir doğruyu kesmesi durumunda tekiliğin oluştuğunu işaret etmiştir [78].



Şekil 3.1 : Hunt tekilliği [78].

Daha sonra Fichter hareketli platform ve sabit platformun birbirine paralel olduğu durumda hareketli platformun sabit platform düzlemine dik olan eksen etrafında $\pm 90^\circ$ dönmesi halinde tekiliğin oluştuğunu Şekil 3.2’de göstermiştir [79].



Şekil 3.2 : Fichter tekilliği [79].

Literatürde değişik tekilik sınıflandırmaları vardır. Tekilliklerin düz, ters ve birleşik tekillikler olmak üzere üç ana gruba ayrıldığı sınıflandırmada, düz tekilliklerdeki konfigürasyonda; ya çalışma uzayının sınırına veya çalışma uzayının çeşitli alt

bölgelerini sınırlayan dahili sınırlara ulaşılır. Başka bir deyişle bu tür tekillikler, uç organ ölü noktaya ulaştığı zaman ortaya çıkar. İkinci grup olan ters tekillikler mekanizmanın kontrol edilemediği bacakların kilitlendiği zaman bile uç organın yerel olarak hareket edebildiği zaman meydana gelir. Mekanizmanın yüksek kararlılığına rağmen, uç organdaki herhangi bir harici yüke karşı konulamaz. Bu durumda çalışma uzayının alt bölgelerini kuşatan bazı tekil yüzeyler vardır. Bu nedenle uç organ bir bölgeden diğer bir bölgeye geçemez. Bu koşullarda çalışılan uzayı bu alt bölgelerden birine düşürmek gerekir [71].

Mayer St-Onge ve Gosselin genel SPM'nın tekillik analizi için analitik denklemleri çıkararak, tekilliğin geometrisini daha iyi anlamak için grafiksel gösterim üzerine çalışmışlardır. Mekanizmanın Jakobiyen matrisinin determinantına dair açık denklemin türevini esas alan bir yöntem kullanmışlar ve daha sonra bu ifadeden, tekil konumların grafik gösteriminde faydalanmışlardır [77]. Mekanizmanın tekillik problemi ve özellikle tekil konfigürasyonların sınıflandırılması oldukça karmaşıktır. Gosselin ve Angeles bacak uzunluk denklemlerinin zamana göre türevini alarak, bir dizi kartezyen hız denklemi elde etmişlerdir [80]. Paralel mekanizmalar için aşağıdaki denklemleri elde etmişlerdir. A ve B Jakobiyen matrisler olmak üzere, hız denklemi:

$$At = B\dot{\rho} \quad (3.1)$$

$$t = \begin{bmatrix} \dot{s}^T, \omega^T \end{bmatrix}^T \quad (3.2)$$

$\dot{\rho}$: mafsal hızları vektörü,

$$\dot{\rho} = [\dot{\rho}_1, \dots, \dot{\rho}_6]^T \quad (3.3)$$

Jakobiyen matrisler:

$$B = \text{diag}(\rho_1, \dots, \rho_6) \quad (3.4)$$

$$A = \begin{bmatrix} c_1^T \\ \vdots \\ c_6^T \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

s hareketli platformun sabit platforma göre konumunu gösteren öteleme vektörü olmak üzere sabit eksen takımına göre hareketli platformdaki mafsalların konum vektörleri:

$$p_i = s + {}^B R_p p_i', i = 1, \dots, 6 \quad (3.6)$$

olmak üzere bacak vektörleri:

$$p_i - b_i = s + {}^B R_p p_i' - b_i, i = 1, \dots, 6 \quad (3.7)$$

Bacak uzunlukları:

$$\rho_i^2 = \|p_i - b_i\|^2 = (s + {}^B R_p p_i' - b_i)^T (s + {}^B R_p p_i' - b_i) \quad (3.8)$$

$$c_i = [(p_i - b_i)^T, ({}^B R_p p_i' \times (p_i - b_i))^T]^T \quad (3.9)$$

olarak yazılabilir. Gosselin ve Angeles denklem 3.1 de tanımlanan iki Jakobiye matrisi esas alarak, her biri farklı bir fiziksel anlama gelen üç tekillik tipi tanımlamışlardır [80]:

1.7.5 3.1.1 Tip I tekillik

B Jakobyen matrisi tekil olduğu zaman meydana gelir. Bilindiği üzere tekil bir matrisin determinanı sıfıra eşittir. Bu tür tekilliklere karşılık gelen konfigürasyonlar, mekanizmanın çalışma uzayı sınırlarında veya ters kinematik problem çözüm sayısının farklı olduğu çalışma uzay bölgeleri arasındaki dahili sınırlarda bulunurlar.

1.7.6 3.1.2 Tip II tekillik

1.7.7 A Jakobyen matrisi tekil olduğu zaman ($\det(A)=0$) meydana gelir.

Mekanizmanın rijitliğinin yerel olarak kaybedildiği konfigürasyonlarda ortaya çıkar. Kartezyen koordinatlar yoluyla bu matrisin yazılması oldukça zordur. Bu nedenle A Jakobyen matrisi platformun yönelimi için kullanılacak ara değişkenler verilerek x, y, z kartezyen konum koordinatlarının bir fonksiyonu olarak yazılır.

1.7.8 3.1.3 Tip III tekillik

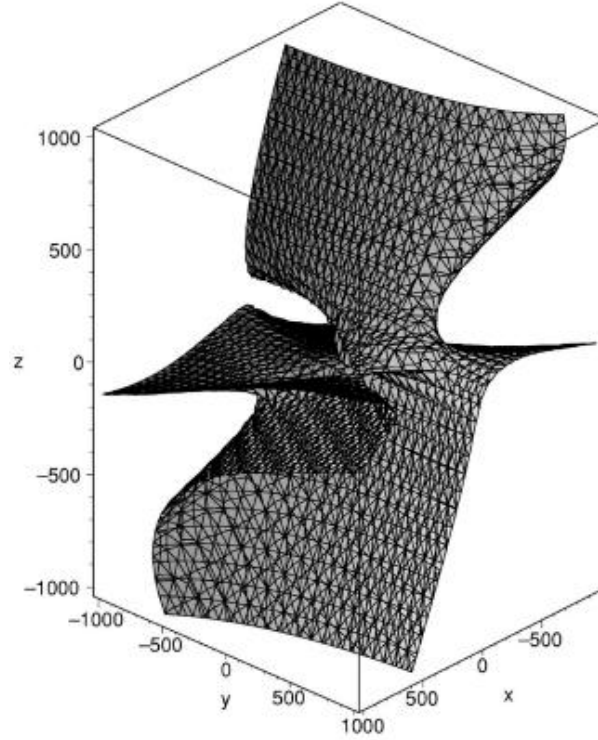
Mimari tekillik olarak da adlandırılmaktadır. Doğrusal olmayan kinematik kısıtların bozulduğu zaman, yani hem A ve hem de B Jakobiye matris determinantlarının sıfıra eşit olduğu zaman meydana gelir. Bu durumda geometrik parametreler nedeniyle bacaklar kilitlendiği halde mekanizma sürekli hareket etmektedir [77].

Bir diğer tekillik sınıflandırmasında Ma ve Angeles tekilliği yine üç kategoride, fakat farklı şekilde mimari tekillik, konfigürasyon tekilliği ve formülasyon tekilliği olmak üzere sınıflandırmışlardır [81].

SPM'nin istenilen hareketi, görevi yerine getirip getiremeyeceğinin tespiti açısından, yörünge planlamasından önce tekillik analizi yapılmalıdır. Dasgupta ve Mruthyunjaya SPM'nin çalışma uzayında mekanizmanın kontrol edilemediği statik tekil konfigürasyonların bulunduğunu belirterek etkin bir performans için SPM'nin tekilliksiz yol planlaması üzerine çalışmışlardır [82]. Geliştirdikleri algoritma ile tekilliklerden kaçınıp emniyetli noktalar tespit ederek, SPM'nin çalışma uzayında başlangıç noktasından varış noktasına kadar kesintisiz, sürekli yol almasını planlamışlardır.

Li ve arkadaşları genel SPM'nin hız denklemini kullanarak, altı boyutlu kartezyen uzayındaki tekil konumlar için üçü konum değişkeni (x, y, z), üçü de yönelim değişkeni (ψ, θ, ϕ) olmak üzere toplam altı değişkenli bir polinom olan analitik ifadeyi elde etmişlerdir [83,84]. Denklemin çok karışık olmasına rağmen hem analitik (determinantın doğrusal ayrıklaştırılması yöntemi) hem de sayısal çözümü mümkündür. Altı boyutta tekil konumların grafik olarak gösterimi mümkün olmadığı için sabit yönelim veya yönelim veya altı değişkenden üçünün sabit alındığı

durumlardan biri için verilen üç boyutlu çalışma uzayındaki tekil noktaları Şekil 3.3 de gösterildiği gibi grafik olarak sunan sayısal bir yöntem geliştirmişlerdir.



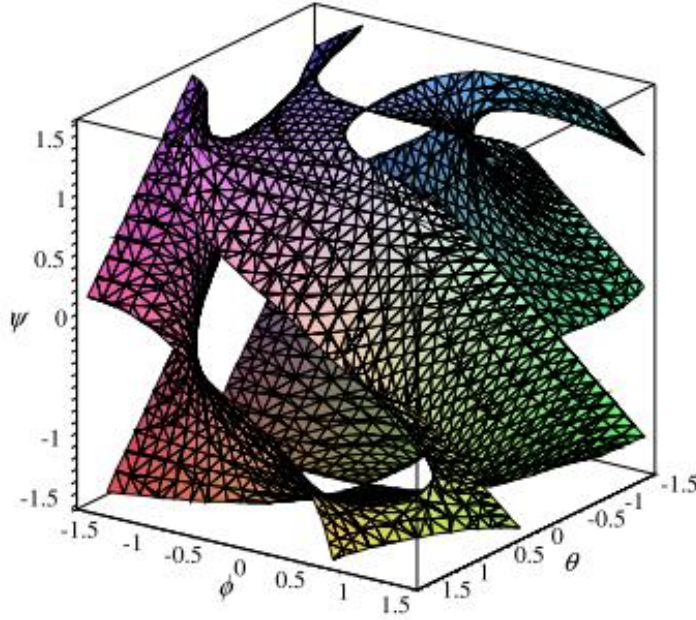
Şekil 3.3 : $\psi=\theta=\Phi=30^\circ$ olmak üzere sabit yönelimdeki tekillikler [83].

Boyları değişen altı bacak, uzunluk sınırları içinde hareket ederken mafsalların dönme açı sınırlarının aşıldığı veya bacakların birbiri ile çarpıştığı tekil konfigürasyonlardan kaçınmak gerekir. Hua ve arkadaşları bu nedenle ilk olarak altı bacak uzunluğunun maksimum veya minimum olduğu uç konumları analiz etmişlerdir. Söz konusu araştırmacılar, SPM’nda 16 uç konumun olduğunu belirterek, bu uç konumlardaki tekil noktaları homotopi yöntemi ile analiz etmişler ve tekillik oluşturmayacak maksimum bacak uzunluklarını içeren emniyet mekanizmasının en uygun tasarımını gerçekleştirmişlerdir [47].

Su ve arkadaşları uzay gözlemi yapılan büyük radyo teleskoplarının ince ayarında kullanılan SPM’nın tekillik analizinde, sezgisel yöntemlerden genetik algoritma kullanmışlardır. İlk olarak SPM’nın Jakobyen matrisini çıkarmışlar, daha sonra bu matrisin determinantının karesini amaç fonksiyonu olarak seçerek, SPM çalışma uzayı içinde minimum değerini araştırmışlardır. Eğer amaç fonksiyonun değeri sıfır

ise tekillik söz konusu, yoksa tekillik olmayan bir durumun söz konusu olduğunu ifade etmişlerdir [31,32].

Jiang ve Gosselin roll-pitch-yaw (Φ, θ, ψ) açılarını kullanarak SPM'nin üç boyutlu maksimum tekilliksiz yönelim çalışma uzayını ve bu uzayı veren maksimum minimum bacak boyu aralıklarını sayısal algorima ile Şekil 3.4 de gösterildiği gibi tespit etmişlerdir [242].



Şekil 3.4 : Yönelme çalışma uzayındaki tekil bölgeler [242].

3.2 Kontrol

Stewart Platform Mekanizması gibi paralel robotlar kapalı çevrimli mekanizmalardır ve paralel bağlantılı yapıları nedeniyle kontrol problemlerinin çözümü karmaşıktır [100]. Daha önce bahsedildiği üzere seri robotlar birbirine bağlı seri uzuvlara sahiptir. Bu nedenle yük, tüm uzuvlara ve mafsallara ayrı ayrı etki etmektedir. Konumlama hataları toplanmakta ve seri robotun uç organında düşük hassasiyete neden olmaktadır. Diğer yandan paralel robotlarda herbir bacağın konumlama hatası doğrudan uç organı etkilemekte olup, hataların toplanan bir yapısı yoktur. Bu nedenle paralel robotların konumlama doğruluğu yüksektir, çünkü hareketli platformun konumlama hatası bacak konumlarının ortalama hatasını aşamaz. Bu nedenle platform nanometre seviyesinde hareket performansı sağlayabilmektedir [101].

Paralel mekanizmaların genellikle önceden tanımlanmış hareketi takip etmeleri nedeniyle hassas yörünge izleme kontrolü çok önemli bir sistem gerekliliğidir [102]. Bu doğrultuda paralel mekanizmalarda kontrol kanunun ana amacı, mekanizmanın yapısal karışıklığından kaynaklanan olumsuz etkileri azaltırken, mekanizmanın dinamik performansını en büyükmektir [103].

Hareketli platformun başlangıç konum ve yöneliminden istenen konum ve yönelime gitmesi, başka bir deyişle yörünge planlaması için kontrolör gereklidir. SPM bacaklarında kullanılan her bir mafsal için gerekli olan kuvvetler kontrolör tarafından oluşturulur. Robot kontrolör, sürtünme ve model belirsizlik etkileriyle birlikte dışarıdan uygulanan farklı bozanetkenler altında hassas konumlama yapmak için tasarlanmaktadır [101].

Paralel mekanizmalar ve dolayısıyla SPM kontrolü, mafsal uzay kontrolü ve görev uzay kontrolü olmak üzere iki farklı kategoriye ayrılmaktadır. Mafsal uzay kontrolünde bacak uzay koordinatları, görev uzay kontrolünde ise çalışma uzayı (kartezyen) koordinatları esas alınarak kontrolör tasarlanmaktadır [104].

1.7.9 3.2.1 Mafsal uzay kontrolü

Mafsal uzay kontrolü klasik kontrol yaklaşımıdır. Kontrolör, gerçek bacak uzunlukları değerlerini, ters kinematik yöntemle hesaplanan istenen bacak uzunluk değerlerine uygun hale getirme amacıyla tasarlanmaktadır. Eğer altı adet bacağın

uzunluk değerleri iyi olarak kontrol edilirse, mekanizmanın hareketli platformu istenen altı serbestlik derecesine uygun hareket edebilir [104].

Mafsal uzay kontrolu mimarisi, SISO sistem olarak her bir bacak ayrı ayrı kontrol edilecek şekilde geliştirilmektedir. Gerçek ve istenen mafsal konumu arasındaki hata, kontrolöre geri besleme sinyali olarak kullanılmaktadır [3, 105]. Mafsal uzay kontrolünde SPM'nın her bir bacağı bağımsız bir sistem olarak ele alındığından diğer bacakların eşleşme, kuplaj etkisi de bozaneetken olarak göz önüne alınmaktadır. Sistemin tek giriş, tek çıkışlı (SISO) ve SPM ters kinematik tekniğinin de basit olması nedenleriyle uygulanması daha az maliyetli ve kolaydır. Ancak eş zamanlama hatası nedeniyle, özellikle mekanizma yüksek hızla hareket ettiğinde yüksek performans değerlerine ulaşamamaktadır [3, 105, 106]. Ayrıca mafsal uzay kontrolu, basit bir yapıya sahip olmasına rağmen örneğin; uçuş simülatöründe stol acil durum eğitimi kapsamında yüksek genliğe sahip manevralarda yüksek izleme performansı veremez. Bunun nedeni söz konusu durumda mafsal uzay kontrolünün dinamik eşleşme sağlayamamasıdır [3, 105].

1.7.10 3.2.2 Görev uzay kontrolü

1.7.11 Görev uzay kontrol mimarisi dinamik temellidir ve hareketli parformun kartezyen koordinatlarına ihtiyaç vardır. Bu bilgi, konum veya yönelim sensörleri ile düz kinematik yöntemle elde edilebilir. Bununla birlikte söz konusu sensörler çok pahalıdır ve istenen hassasiyeti elde etmek mümkün olmayabilmektedir. Bu nedenle gerçek zamanlı kontrolde düz kinematik yöntemi kullanmak uygundur [3, 102, 104]. Diğer yandan görev uzay kontrolu çok girişli çok çıkışlı (MIMO) sistemle uygulanmakta olup, sistemin eşleşme hatalarını azaltarak SPM'nın dinamik eşleşmesi sağlanmaktadır. Ayrıca düz kinematik teknik kullanılarak mafsal uzayının ölçümleri görev uzayına eşleştirilmektedir ve yüksek 6 DOF izleme performansına ulaşılmaktadır. Ancak SPM'nın düz kinematik yapısının karmaşık olması nedeniyle görev uzay kontrolu zordur [105, 106].

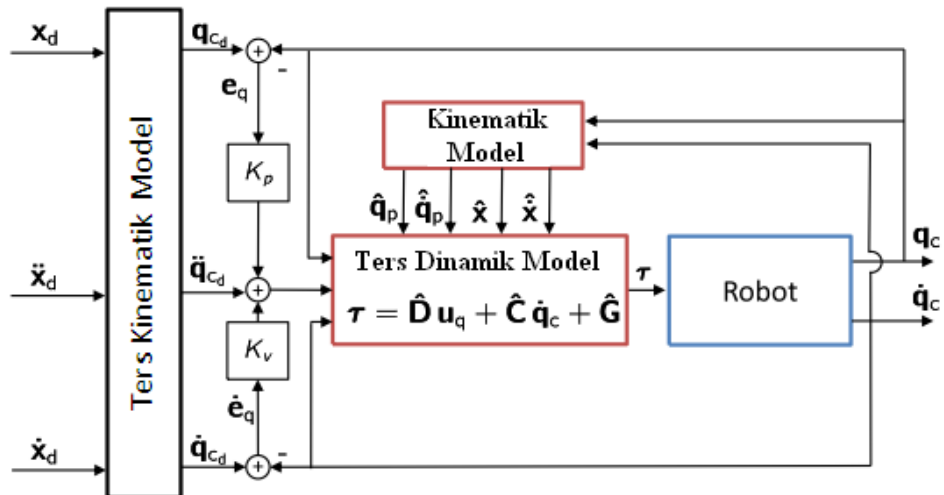
Kontrol alanında ana eğilim paralel mekanizmaların belirli özellikleri göz önüne alınmaksızın, seri mekanizmaların kontrol yaklaşımlarının paralel mekanizmalara

doğrudan uygulanmasıdır. Literatürdeki konum kontrolü ile ilgili çalışmaların çoğu yerel geri besleme kontrol yaklaşımları ve model esaslı yaklaşımlar olmak üzere iki ana başlıkta toplanmaktadır.

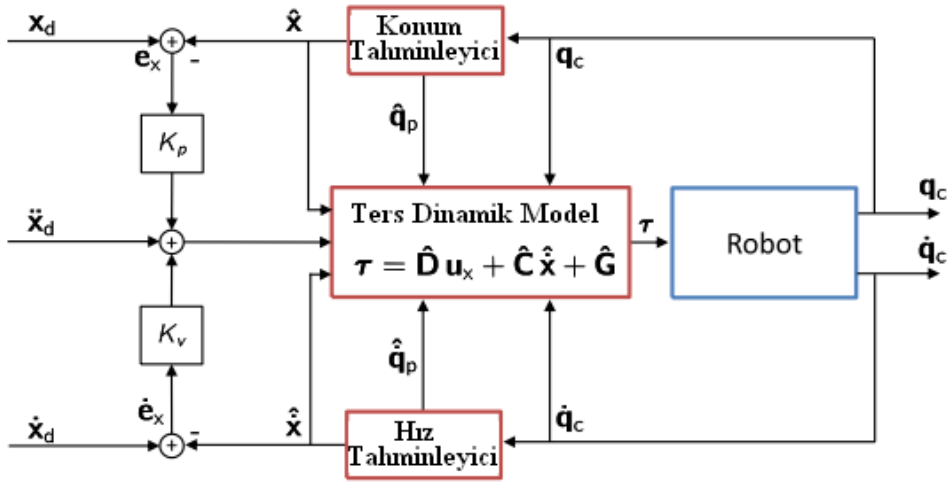
Yerel geri besleme kontrol yaklaşımlarında her bir mafsalı, mekanizmanın diğer mafsallarından bağımsız olarak kontrol etmek için yerel PID kontrolör kullanımı esastır. Genellikle basit kontrol kanunları nedeniyle bu yaklaşımların uygulaması kolaydır. Ancak bu yaklaşımlar mafsallar arasındaki dinamik eşleşme durumunu göz önüne almadıkları için, yüksek hız ve hassasiyet gerekli olduğu zaman iyi kontrol performansı sağlayamazlar.

Model esaslı yaklaşımlarda paralel mekanizmanın dinamik modeline ihtiyaç olmakla birlikte, yüksek hız, ivmelenme ve hassasiyet gerekli olduğu zaman iyi kontrol performansı sağlarlar. Hesaplanmış tork kontrol (CTC) yöntemi model esaslı yaklaşımlardan biri olup, dinamik model yeterince doğru ise iyi bir kontrol performansı sağlar. Ayrıca kontrol performansını artırmak amacıyla mekanizmanın hareketsiz mafsallarında fazladan sensörler de kullanılmaktadır. Ancak bu işlem maliyeti artırmaktadır.

Zubizarreta ve arkadaşları tarafından önerilen Genişletilmiş CTC yönteminde doğrudan kontrolöre veri temin eden fazladan sensörler kullanılmaktadır. Bu durumda model parametre belirsizliklerine karşı gürbüzlük artırılmakta ve yörünge izleme hataları azaltılmaktadır. Zubizarreta ve arkadaşları bu yaklaşımı üç farklı referans yörünge için, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 gösterilen modellerle, hem mafsal hem de görev uzayları için 10 farklı SPM konfigürasyonuna uygulamışlar ve yaklaşımın hesaplama süresini önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir [103].

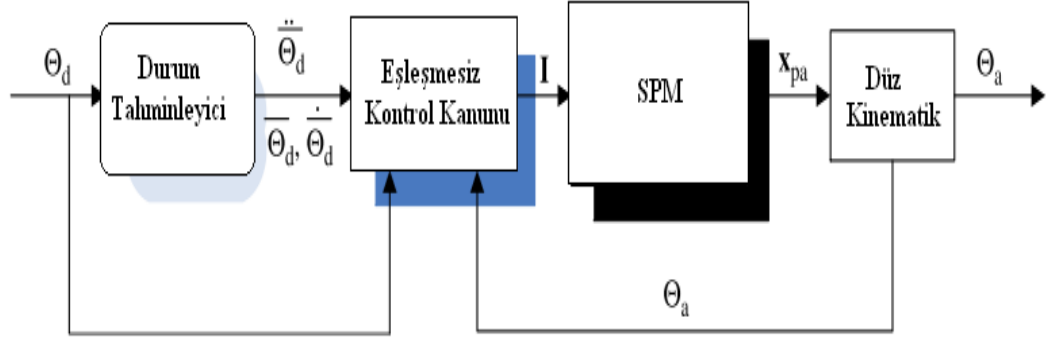


Şekil 3.5 : Mafsal uzayında genişletilmiş CTC uygulaması blok diyagramı [103].



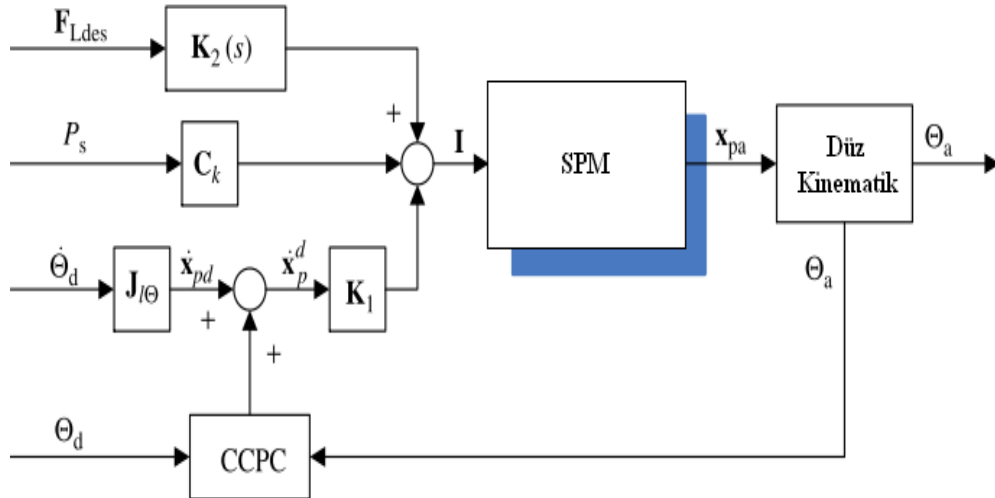
Şekil 3.6 : Görev uzayında genişletilmiş CTC uygulaması blok diyagramı [103].

Yang ve arkadaşları hareket simülasyonunda ağır yükler altında kullanılan simetrik mafsal konumlarına sahip hidrolik tahrikli SPM'nın kontrol performansını iyileştirmek amacıyla PDGC (Dinamik Yer çekimi Dengelemeli Oransal Türevsel) kontrolör geliştirmişlerdir. Dinamik hataları azaltarak ve kararlı hal hatalarını dengeleyerek, kararlılık ve dinamik hassasiyete sahip kontrol performansı elde etmişlerdir [107]. Ağır faydalı yüklü simülatörlerde ve test sistemlerinde kullanılan elektro-hidrolik oktahedral SPM'nın yüksek yükleme kapasitesine rağmen karmaşık dinamik karakteristiklerinden kaynaklanan sistem kuplajı, eşlemesi daha düşük sistem hassasiyetine ve istenmeyen çıktılara neden olarak kontrol performansı azaltmaktadır. Yang ve arkadaşları tarafından ifade edildiği üzere söz konusu eşleşmeyi yok etmek veya azaltmak, sistemin kontrol doğruluğunu ve yörünge izleme performansını iyileştirebilir ve bu nedenle eşleşmesiz kontrolör tasarım ve uygulaması kontrol performansının iyileştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Yang ve arkadaşları mekanizmanın dinamik eşleşme etkilerini azaltılarak, sistem kontrol performansının iyileştirilmesi amacıyla Şekil 3.7 de gösterilen CCPC ile eşleşmesiz kontrol yöntemini geliştirmişlerdir [108].

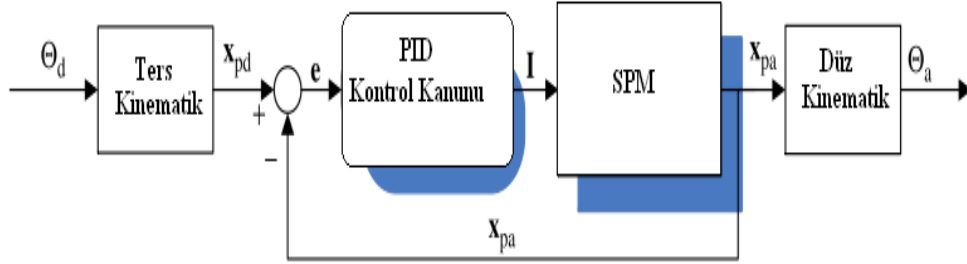


Şekil 3.7 : Eşleşmesiz kontrol yöntemi blok diyagramı [108].

Önerilen yöntemde mekanizmanın gerçek zamanlı sistem durumları, ölçülen eyleyici uzunluklarının Newton-Raphson yönteminde kullanılması ile dolaylı olarak tahmin edilirken, önerilen eşleşmesiz kontrolör için gerekli olan, istenen eyleyici konum ve hız bilgisi analitik yöntemle elde edilmektedir. Mekanizmanın doğrusal olmayan ters dinamik modeli ile arzu edilen uygulama kuvveti hesaplanmaktadır. Şekil 3.8 de gösterildiği gibi istenen eyleyici hızı ve genelleştirilmiş konum bilgisi kontrolör girdileri olarak kullanılmaktadır.

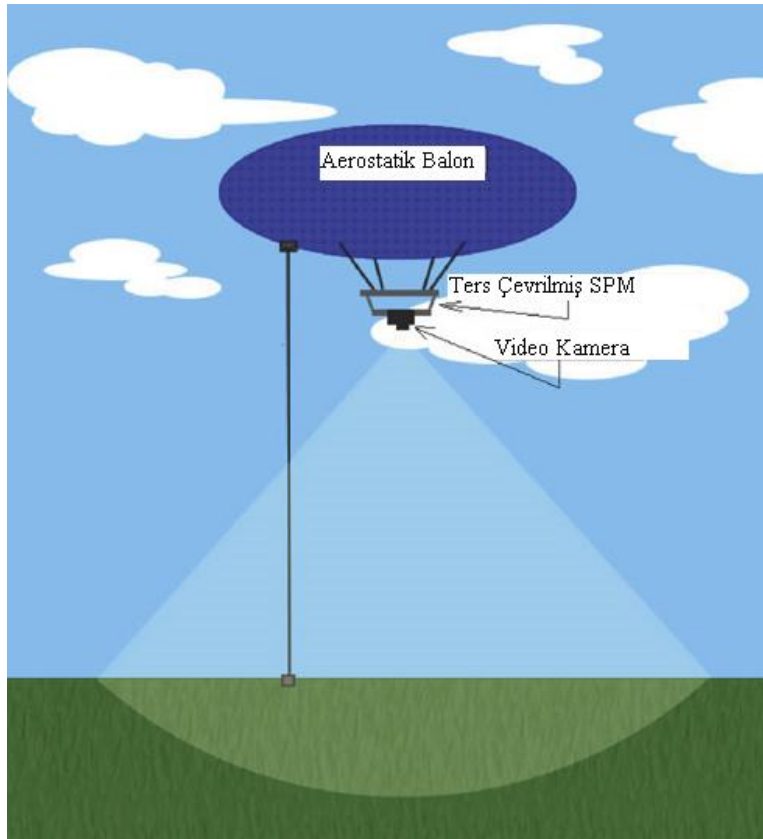


Şekil 3.8: CCPC’li kuvvet-hız kontrol yöntemi blok diyagramı [108].



Şekil 3.9: Klasik PID kontrol yöntemi blok diyagramı [108].

Yang ve arkadaşları önerdikleri yöntemi, endüstride yaygın olarak kullanılan ve paralel mekanizmalarda her zaman yüksek performans veremeyen Şekil 3.9 da gösterilen klasik PID kontrol yöntemi ile kıyaslamışlardır. Klasik PID kontrolörün yörünge izleme performansı dinamik eşleşme etkileri tarafından sınırlandırıldığından, dinamik izleme hataları önerilen yöntemle PID kontrol yöntemine göre % 50'den daha fazla azaltılmaktadır [108].



Şekil 3.10 : SPM’lı balonla uzaktan gözetim sistemi şematik gösterimi [109].

Fraguela ve arkadaşları başlangıç koşulları ve platforma etki eden kalıcı bozanetken hakkında tam bilgi sahibi olmaksızın üç serbestlik dereceli bir Stewart platformunu istenilen bir konum etrafında dengede tutmak için bir gürbüz kontrol tasarımı üzerine çalışmışlardır [109]. Bu amaçla yaklaşık 400 m uzunluğunda bir kablo ile yere bağlanmış bir aerostatik balon kullanmışlardır. Şekil 3.10 da gösterilen SPM, ters çevrilmiş halde balona sabit tabanından bağlanmış ve yaklaşık 20 km² büyüklüğünde belirli bir alanı gözlemlemesi istenen video kamera da SPM hareketli platformuna aşağıya dönük olarak monte edilmiştir. Söz konusu sistem istihbarat, gözetleme, arama kurtarma operasyonları, trafik kontrolü gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Kullanılan SPM çalışma şartları itibari ile kalıcı olarak rüzgar yükü altındadır. Bu nedenle rüzgarın ivmelenmesi kalıcı bozanetken olarak kabul edilmektedir..Ayrıca konum bilgisine sahip olmakla birlikte, hız ile ilgili bilgi mevcut değildir. Bu durumda istenilen konumda balonu tutabilmek için harici bozunuya göre gürbüz kontrol tasarlayarak hızları belirlemek gerekmektedir. Fraguela ve arkadaşları tarafından ifade edildiği üzere yüksek dereceli kayar kipli (HOSM) gözlemci, konum bilgilerinden yola çıkarak hızları ve harici bozunumu tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca söz konusu çalışmalarında sırasıyla ikinci ve üçüncü derecede kayar kipli gözlemci kullanmışlardır. Üçüncü derece kayma kipli gözlemcinin uygulanması ile filtremesiz harici bozuntunun teorik tam tahminini elde etmişlerdir. Yalnızca konum bilgisine sahip oldukları halde gürbüz kontrol tasarlayarak SPM’ı havada dengede tutmuşlardır [109].

Kızır ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada, 6-6 SPM’nın kinematik analizini gerçekleştirerek, Solidworks programında simüle etmişlerdir. Ayrıca Matlab-Simulink ortamında söz konusu mekanizmanın dinamik modelini geliştirmişlerdir. SPM bacaklarında Şekil 3.11 de gösterilen yüksek çözünürlüklü doğrudan sürüş DC motoru (500 nm tasarım çözünürlüğe sahip) kullanmışlardır. Her bir motora DSpace DS1103 gerçek zamanlı kontrolöre gömülü PID kontrol ile kumanda etmişlerdir [101].

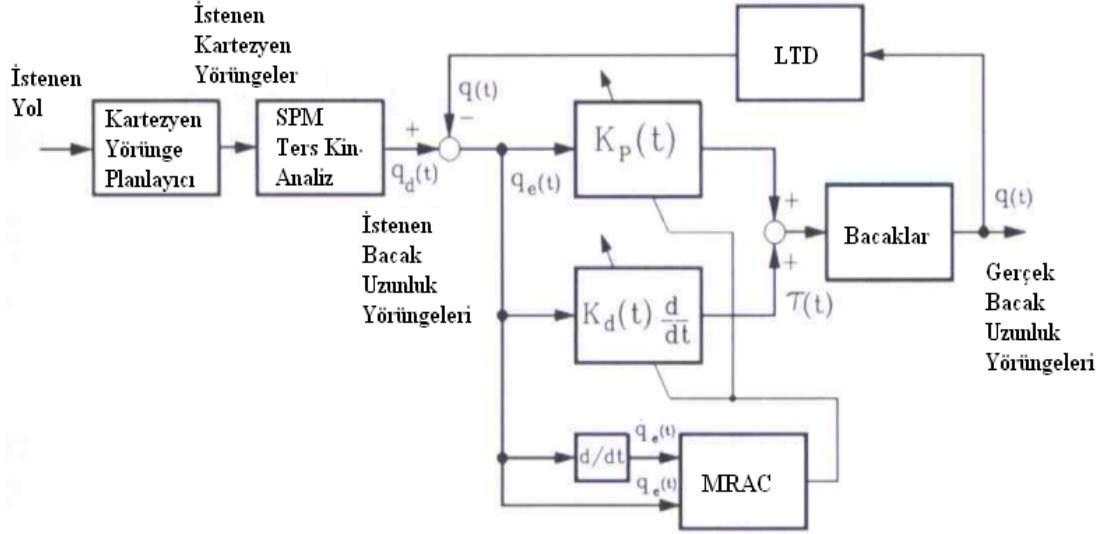


Şekil 3.11 : 500 nm çözünürlüğe sahip DC motor [101].

Başlangıçta her bir bacadaki motor ayrı ayrı kontrol edilerek, kontrol edilebilirlik doğrulanmış, daha sonra da tüm motorlar birlikte kontrol edilmiştir. Kızır ve arkadaşları 6-6 SPM'nin hassas hareket etme yeteneğini test etmek için PID kontrolörle çeşitli deneyler yapmışlardır. Çalışmalarında 500 nm hassasiyetle yörünge ve konum kontrolü elde etmişlerdir. Hareketli platform daha geniş bir çalışma uzayında konumlandırıldığında, sistemin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle PID kontrolörün performansı kötüleşmektedir. İlave olarak PID kontrolör doğrusal olmayan yükler altında kontrol yeteneğini kaybedebilmektedir. Bu nedenle Kızır ve arkadaşları, doğrusal olmayan yüklerin ve bozanetkenlerin üstesinden gelebilmek için farklı algoritmalar geliştirilmesi gerektiği tespitinde bulunarak, PID kontrolörün önemli bazı dezavantajlarını ve önerilerini çalışmalarının sonunda aşağıdaki maddeler halinde sıralamışlardır:

- Yüksek hassasiyet durumunda yuvarlatma hataları bacaklarda titreşime neden olmaktadır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için durum değişkenleri filtre edilebilir.
- PID parametreleri deneme-yanılma yoluyla elde edilmektedir. En iyi PID parametreleri geniş aralık için sistemin dinamik modeli kullanılarak belirlenebilir.
- Çalışma uzayı farklı bölgelere ayrılabilir ve her bir bölge için en iyilenmiş PID parametreleri elde edilebilir [101].

Nyugen ve arkadaşları uzay operasyonlarının simülasyonu ve bu operasyonlar için geliştirilen bir donanımda kullanılan SPM'nin adaptif kontrolü üzerine araştırma yapmışlardır. Konum algılama amacıyla bacaklar üzerinde altı adet doğrusal yer değiştirme transdüsörü (LTD) kullanmışlardır. Bu transdüsörlerin sinyalleri, gerçek hareketli platform konumuna düz kinematik algoritma ile dönüştürüldüğünde ortaya çıkan problemlerden kaçınmak için görev uzay kontrol yöntemi yerine, mafsalsal uzay kontrol yöntemi kullanmışlardır. Çünkü SPM ters kinematiğinin kapalı formda çözümü olması nedeniyle mafsalsal uzay kontrolü kolaydır. Şekil 3.12 de mafsalsal uzayı adaptif kontrol modelinin ayrıntıları gösterilmektedir.



Şekil 3.12 : SPM mafsalsı adaptif kontrol modeli blok diyagramı [110].

Mafsalsı uzayının adaptif kontrolünde ilk olarak mekanizmanın ters kinematik yöntem kullanarak kinematik analizini gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri denklemleri, Newton-Raphson metodu kullanılarak gerçekleştirilen düz kinematik analiz için iteratif çözüm geliştirmede uygulamışlardır. Daha sonra model referans adaptif kontrol (MRAC) konsepti ve Lyapunov teoremi kullanarak mafsalsı adaptif kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Bu kapsamda mekanizma hareketinin, kontrolörlerin adaptasyon oranı ile karşılaştırıldığında yavaş olduğu kabulünü yapmışlardır. Adaptif kontrolde kullanılan PD kontrolörlerin kazançları, faydalı yükteki ani değişim ve mafsallar arasındaki dinamik ve statik eşleşmeye etkin olarak reaksiyon verecek bir adaptasyon kanunu ile ayarlanmaktadır. Nyugen ve arkadaşları dikey ve dairesel hareketleri izlemede adaptif kontrol yönteminin performansını görmek için deneyler gerçekleştirmişler ve adaptif kontrolörün ihmal edilebilir izleme hataları ile arzu edilen hareketi izleyebildiğini tespit etmişlerdir [110].

3.3 Dinamik Analiz

Dinamik analiz, mekanik tasarım, sistem kontrolü ve simülasyon için önemlidir. Stewart Platform Mekanizmasının kapalı kinematik yapısı, yüksek rijitlik sunmakla birlikte, kontrolü ve dinamik analizi güçleştirmektedir. Robotikte hassas kontrol için dinamik tanımlamanın doğru yapılması gerekmektedir [127-128].

SPM dinamik modeli kullanılarak belirli görevler simüle edilebilmektedir. Hareketli platforma etkiyen kuvvetler simülasyon programlarında dinamik modelleme ile gözlemlenebilmektedir [101]. Çeşitli belirlenmiş görevleri test etmek için gerçek sisteme ihtiyaç duymaksızın robotik sistemin bilgisayar simülasyonunda dinamik model kullanılabilmektedir. Kontrol stratejilerini geliştirmek için, daha çok yapısal sistem bilgisinden faydalanılarak daha yüksek performans elde etmek mümkündür. Ancak, dinamik analiz yoluyla tüm mafsallık tepki kuvvetlerini ve momentlerini belirlemek için bacakların, yatakların ve eyleyicilerin ölçülendirilmesi gerekmektedir [129,130].

3.3.1 Dinamik model türleri

Paralel mekanizmalarda ters ve düz dinamik olmak üzere iki farklı çeşit dinamik model vardır. Ters dinamik model ileri beslemeli kontrol uygulamalarında, düz dinamik model ise simülasyonlarda kullanılmaktadır [127, 131].

3.3.1.1 Ters dinamik model

Mekanizma uç organının yörüngesi X , hızı W ve ivmesi $\dot{W}$ verildiğinde, τ hareket ettirici mafsallık kuvvetlerinin ve torklarının hesaplandığı modeldir. Ters dinamik modelin genel formülü,

$$M(X)\dot{W} + C(W, X, (\theta)) + G = \tau \quad (3.10)$$

olarak yazılır. Bu ifadede M atalet matrisi, G yerçekimi terimi ve C merkezkaç, Coriolis terimidir. Denklem (3.10) seri mekanizmlar için de geçerli bir ifadedir.

3.3.1.2 Düz dinamik model

Mafsalları hareket ettiren kuvvet ve torklar verildiğinde, uç organın yörüngesi, hızları ve ivmelerinin hesaplandığı dinamik modeldir. [127].

3.3.2 Dinamik analizde kullanılan yöntemler

Dinamik analiz konusunda, farklı mekanik prensipleri esas alan Newton-Euler yöntemi, Lagrange formülasyonu ve sanal iş prensibi gibi yöntemler geliştirilmiştir. Mekanizmanın dinamik modellenmesinde sanal iş prensibi en etkin yaklaşım olarak kabul edilmektedir [129, 132]. Mekanik sistemin dinamik analizinde, Newton-Euler yaklaşımı katı cismin serbest cisim diyagramları, Lagrange formülasyonu ise iş ve enerji konseptleri esasına dayanmaktadır [127]. Bunlar klasik mekanik prensipleridir. Lagrange formülasyonu kapalı formda ifade edilmekte olup, iyi yapılandırılmıştır. Fakat bu yöntemde kısmi türevleri bulmak için çok sayıda sembolik hesaplama gereklidir. Newton-Euler yaklaşımı bacaklar arasındaki tüm kısıt kuvvetlerinin ve momentlerinin hesaplanmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte mekanizmanın simülasyonu ve kontrolü için bu hesaplamalar gereksizdir [129, 133]. Yukarıda da bahsedildiği gibi sanal iş yöntemi SPM'nin ters dinamik analizi için gerekli dinamik denklemleri çıkarmada etkin bir yaklaşımdır. Fakat düz dinamik model için sanal iş yönteminin uygulanması basit değildir, çünkü mafsal uzayı ve görev uzayı arasındaki hız dönüşümleri karmaşıktır [133].

3.3.2.1 Newton-Euler yöntemi

Katı cisimlerin serbest cisim diyagramlarının kullanıldığı Newton-Euler yaklaşımında, bacaklar arasındaki tüm kısıt kuvvetlerinin ve momentlerinin hesaplanmasını gerektirmektedir [134].

Lee ve arkadaşları, Newton-Euler yaklaşımını esas alan çalışmalarında Şekil 3.13 de gösterilen SPM'nin dinamik denklemlerini çıkarmışlardır [119]. Söz konusu 6-3 SPM'nin hareket eden bacaklarının sabit alt kısmı tabana universal mafsallarla, üst hareketli kısmı ise hareketli platforma küresel mafsallarla bağlanmaktadır.

B_i moment merkezli i 'nci bacağın moment dengesi ise,

$$\begin{aligned} & (m_d \mathbf{r}_{di} + m_u \mathbf{r}_{ui}) \times \mathbf{g} - L_i \mathbf{s}_i \times \mathbf{f}_i - m_d \mathbf{r}_{di} \times \mathbf{a}_{di} - m_u \mathbf{r}_{ui} \times \mathbf{a}_{ui} - (\mathbf{I}_{di} + \mathbf{I}_{ui}) \boldsymbol{\alpha}_i - \dots \\ & \dots \boldsymbol{\omega}_i \times (\mathbf{I}_{di} + \mathbf{I}_{ui}) \cdot \boldsymbol{\omega}_i = 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

olarak yazılır. Denklem (3.12) de m_d bacağın sabit kısmının kütlesi, L_i bacak boyu, B_i moment merkezinden sabit ve hareketli parçaların kütle merkezlerine konum vektörleri $\mathbf{r}_{di}$ ve $\mathbf{r}_{ui}$, kendi kütle merkezleri etrafında sabit ve hareketli parçaların atalet momentleri $\mathbf{I}_{di}$ ve $\mathbf{I}_{ui}$, $\boldsymbol{\omega}_i$ ve $\boldsymbol{\alpha}_i$ sırasıyla i . bacağın açısal hız ve ivme ifadeleridir.

Hareketli platform merkezindeki hız $\mathbf{v}_p$, ivme $\mathbf{a}_p$, açısal hız $\boldsymbol{\omega}_p$ ve açısal ivme $\boldsymbol{\alpha}_p$ kinematik olarak üst platform T_j ($j = 1, 2, 3$) bağlantı noktalarındaki hız $\mathbf{v}_{Tj}$ ve ivme $\mathbf{a}_{Tj}$ ile ilgilidir. $\mathbf{b}_j$ konu m vektörü olmak üzere,

$$\mathbf{v}_{Tj} = \mathbf{v}_p + \boldsymbol{\omega}_p \times (\mathbf{R} \mathbf{b}_j) \quad (3.13)$$

$$\mathbf{a}_{Tj} = \mathbf{a}_p + \boldsymbol{\alpha}_p \times (\mathbf{R} \mathbf{b}_j) + \boldsymbol{\omega}_p \times \{ \boldsymbol{\omega}_p \times (\mathbf{R} \mathbf{b}_j) \} \quad (3.14)$$

olarak üst platform bağlantı noktalarındaki hız ve ivme ifade edilir. $\mathbf{R}$, rotasyon matrisi olmak üzere hareketli xyz eksen takımının XYZ referans eksen takımına göre yönelimini (dönmesini) tanımlamada kullanılır. Bu ifadede $\mathbf{v}_p$, $\mathbf{a}_p$, $\boldsymbol{\omega}_p$ ve $\boldsymbol{\alpha}_p$ referans eksen takımına göre $\mathbf{b}_j$ ise hareketli eksen takımına göre tanımlanır. Ayrıca $\mathbf{R} \mathbf{b}_j$ referans eksen takımı yoluyla yazılır. $\mathbf{v}_{Tj}$ ve $\mathbf{a}_{Tj}$ değişkenleri de bacağına ilişkin değişkenler yoluyla,

$$\mathbf{v}_{Tj} = \dot{L}_i \mathbf{s}_i + L_i \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{s}_i \quad (3.15)$$

$$\mathbf{a}_{Tj} = \ddot{L}_i \mathbf{s}_i + \boldsymbol{\alpha}_i \times (L_i \mathbf{s}_i) + \boldsymbol{\omega}_i \times \boldsymbol{\omega}_i \times (L_i \mathbf{s}_i) + 2 \boldsymbol{\omega}_i \times (\dot{L}_i \mathbf{s}_i) \quad (3.16)$$

($i = 1, 2$ için $j = 1$, $i = 3, 4$ için $j = 2$ ve $i = 5, 6$ için $j = 3$) olarak yazılır. $\dot{L}_i$ ve $\ddot{L}_i$ sırasıyla bacak uzanım hız ve ivmesidir. Denklem 3.13-3.16 yoluyla her bir bacağına $\boldsymbol{\omega}_i$ açısal hız ve $\boldsymbol{\alpha}_i$ açısal ivmesi platform ilişkili $\mathbf{v}_p$, $\mathbf{a}_p$, $\boldsymbol{\omega}_p$ ve $\boldsymbol{\alpha}_p$ değişkenleri kullanılarak tanımlanabilir. Bu durumda $\mathbf{Q}_{1i}$, $\mathbf{Q}_{2i}$ ve $\mathbf{Q}_{3i}$ matrisleri yoluyla tahrik kuvveti $\mathbf{f}_i$,

$$f_i = Q_{1i} \begin{Bmatrix} v_p \\ \omega_p \end{Bmatrix} + Q_{3i} F_i \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Altı hareketli bacak tarafından f_i uygulanan kuvvetleri kullanılarak, SPM'na ait aşağıdaki kuvvet ve moment eşitlikleri elde edilir:

$$m_a a_p = m_p g + \sum_{i=1}^6 f_i \quad (3.18)$$

$$I_p \alpha_p + \omega_p \times (I_p \omega_p) = \sum_{i=1}^6 [(Rb_i \times f_i)] \quad (3.19)$$

m_p hareketli platformun kütlesi olup, Denklem (3.18) ve (3.19) matris-vektör formundaki aşağıdaki denklemde bir araya getirilebilir:

$$\begin{bmatrix} m_p I_3 & 0 \\ 0 & I_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_p \\ \alpha_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m_p g + \sum f_i \\ -\omega_p \times (I_p \omega_p) + Rb_i \times f_i \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

I_p platformun atalet momenti olup, I_3 ise 3x3 birim matrisdir. Konum, hız ve ivme sırasıyla

X , $\dot{X} = v_p^T \omega_p^T$ ve $\ddot{X} = a_p^T \alpha_p^T$ vektörler olarak yazılırsa, bir Stewart platformunun görev uzayındaki dinamik denklemi,

$$M(X) \ddot{X} + h(X, \dot{X}) = J^T F \quad (3.21) \text{ olarak yazılır.}$$

Denklem 3.21 de $M(X)$ atalet matrisi, $h(X, \dot{X})$ ise Coriolis, merkezkaç ve yerçekimi kuvvetini içeren lineer olmayan bir terim olup, $F = F_1, \dots, F_6^T$ altı bacağa ait eyleyici kuvvet vektörüdür.

J , Jakobyen matris olmak üzere $\dot{L} = \dot{L}_1, \dots, \dot{L}_6^T$ bacak hız vektörü ile ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$J\dot{X} = \dot{L} \quad (3.22)$$

$$J = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \dots & s_6 \\ Rb_1 \times s_1 & Rb_2 \times s_2 & \dots & Rb_6 \times s_6 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

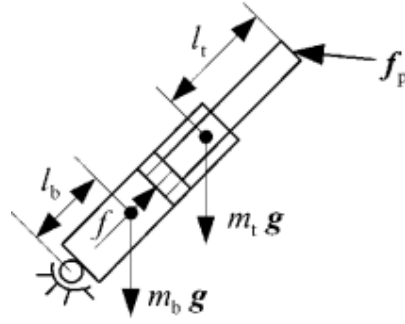
Ayrıca $J^T F$, bacak kuvveti F 'den dönüştürülen görev uzayındaki tahrik ettirici kuvveti ifade eder. SPM'nın dinamik denklemi Denklem 3.21 de $M(X)$ atalet matrisi yalnızca platformun konfigürasyonuna bağlı, $h(X, \dot{X})$ lineer olmayan terim platformun hem konumuna hem de hızına bağlıdır. Çünkü SPM çalışma uzayı nispeten küçük olduğundan X değişkeni ve onun $M(X)$ fonksiyonu da küçük bir aralıkta değişir. Atalet matrisi bu nedenle bazı hata modellemelerinde sabit kabul edilir. Diğer yandan ters dinamik hesaplamada Coriolis, merkezkaç ve yerçekimi kuvvetini içeren $h(X, \dot{X})$ doğrusal olmayan teriminin hesaplanması, hesaplama süresinin çoğunu almaktadır [119].

3.3.2.2 Lagrange formülasyonu

Lagrange formülasyonu iş ve enerji konseptleri esasına dayanmaktadır. Mekanizmanın geometri ve atalet dağılımı ile ilgili basitleştirme kabulleri yapılan, iyi şekillendirilmiş, kapalı formda ifade edilebilen formülasyonlardır. Ancak formülasyondaki kısmi türevleri bulmak için çok sayıda sembolik hesaplama yapılması gerekmektedir [134].

Guo ve Li yaptıkları çalışmada SPM dinamik modelini elde etmek için tüm sistemi, birincisi hareketli platform ve ikincisi altı bacakla birlikte sabit platform olmak üzere ikiye ayırmışlardır. Newton-Euler yöntemini kullanarak platformun tüm dinamik denklemlerini çıkartırken, bacağın en üstünde mafsaldaki f_p kısıt kuvvetini elde etmek için Lagrange formülasyonundan faydalanmışlardır [129].

1.7.12



Şekil 3.15 :: Bacaklardan birinin kuvvet analiz diyagramı [129].

q_p ve $\dot{q}_p$ sırasıyla genelleştirilmiş koordinatlar ve hızlar, $T(q_p, \dot{q}_p)$ ise kinetik enerji olmak üzere Şekil 3.15 de gösterilen parçacıklar sisteminin Lagrange denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_p} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_p} = Q \quad (3.24)$$

Bu ifadede Q , q_p genelleştirilmiş koordinatlarının değişimi boyunca yazılan genelleştirilmiş kuvvetlerdir. Kinetik enerji,

$$T = \frac{1}{2} \mathbf{v}_t^T m_t \mathbf{v}_t + \frac{1}{2} \omega_l^T (I_t + I_b) \omega_l \quad (3.25)$$

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}_t^T (M_1 + M_2) \dot{q}_p \quad (3.26)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_p} \right) = \frac{d}{dt} ((M_1 + M_2) \dot{q}_p) = \frac{d(M_1 + M_2)}{dt} \dot{q}_p + (M_1 + M_2) \ddot{q}_p \quad (3.27)$$

olarak yazılabilir. Q_f , tahrik kuvveti nedeniyle q_p genelleştirilmiş koordinatlarının

değişimi boyunca yazılan genelleştirilmiş kuvvet $Q_{m_t g}$ ve $Q_{m_b g}$ ise yerçekimi kuvvetinin etkisiyle oluşan genelleştirilmiş kuvvetlerdir. q_p genelleştirilmiş koordinatlarının değişimi boyunca yazılan genelleştirilmiş kuvvet,

$$Q = f_p + Q_f + Q_{m_t g} + Q_{m_b g} \quad (3.28)$$

şeklinde ifade edilmektedir

Guo ve Li yaptıkları çalışmada Lagrange formülasyonu ile bacakların en üstünde mafsallardaki f_p kısıt kuvvetini,

$$\begin{aligned} f_p = & (M_1 + M_2) [I R \tilde{p}^T R^T] \ddot{q} + C_a [I R \tilde{p}^T R^T] \dot{q} + \dots \\ & \dots + (M_1 + M_2) \tilde{\omega}^2 R p - (Q_f + Q_{m_t g} + Q_{m_b g}) \end{aligned} \quad (3.29)$$

olarak hesaplamışlardır [129].

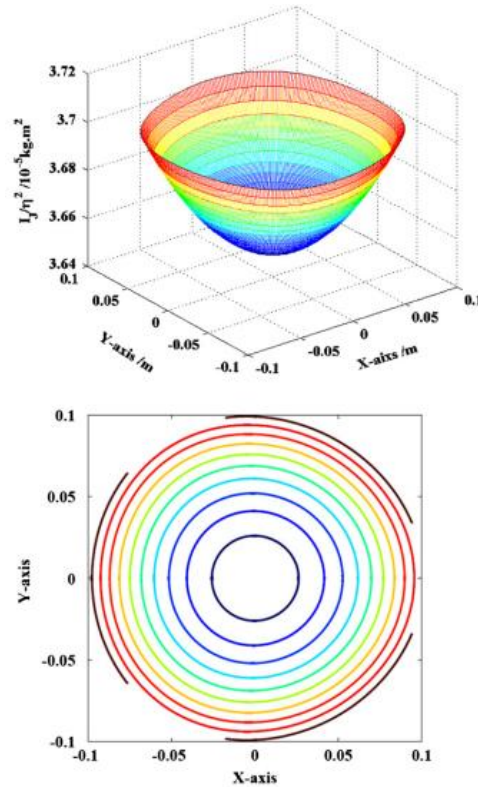
3.3.2.3 Sanal iş yöntemi

Sanal iş yöntemi SPM'nin ters dinamik analizi için gerekli dinamik denklemlerini çıkarmada etkin bir yaklaşımdır. Fakat düz dinamik model için sanal iş yönteminin uygulanması basit değildir, çünkü mafsal uzayı ve görev uzayı arasındaki hız dönüşümleri karmaşıktır [133].

1.7.13 Bu yöntemin temel prensibine göre; eğer tüm harici, dahili ve atalet kuvvetleri tarafından yapılan sanal iş, herhangi genel sanal değiştirme süresince yok olursa (mekanizma için geçerli kısıtlarla uyumlu olacak şekilde) mekanizma dinamik denge halindedir. Mafsallardaki sürtünme kuvvetleri ihmal edildikten sonra, mafsallardaki kısıt kuvvetleri tarafından yapılan sanal iş sıfıra eşittir [135].

Shao ve arkadaşları SPM'nin atalet eşitlenmesi konusunu araştırmışlardır. Bu araştırmanın ters dinamik analizinde sanal iş yöntemini kullanmışlardır [132]. Daha önce bahsedildiği üzere paralel mekanizmalar büyük yük/ağırlık oranıyla ve yüksek ivmelenmeleriyle hareket simülatörlerinden al ve yerleştir robotlarına kadar birçok

farklı alanda kullanılmaktadır. Atalet eşitlenmesi, mekanik atalet yükünün motor şaftına ve motor ataletine oranıdır. Bu oran iyi bir dinamik performans için kabul edilebilir aralıkta tutulmalıdır. Doğru servomotor ve mekanik transmisyonu seçmek ve dinamik kontrol için maksimum hız, tork ve gücün yanı sıra atalet eşitlenmesi kavramı da önemsenmelidir. Çünkü genellikle mekanizmanın her bir bacağını hareket ettiren ayrı bir servomotorun kullanıldığı uygulamalar mevcuttur. Shao ve arkadaşları bacak Jakobyen matrislerini esas alarak mekanizmanın mafsalsal-uzay atalet matrisini geliştirmişlerdir. Mafsalsal uzay atalet matrisini, mafsalsal ivmelenmeleri ve mafsalsal tahrik kuvvetleri arasındaki ilişki olarak tanımlamışlardır. Mafsalsal uzay atalet matrisinin ana köşegen elemanları karşılıklı bacakların atalet özelliklerini yansıtırken, diğer elemanlar da kuplaj kuvvetlerini yansıtır. Mafsalsal uzay atalet matrisinin ana diagonal elemanlarının ortalamasına eşit olan, mekanizmanın atalet indeksini (JRI) göz önüne almışlardır. Örnek SPM uygulaması için ele alınan tüm çalışma uzayında maksimum JRI değerini $4.5 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$ ve minimum JRI değerini $3.2 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$ olarak hesaplamışlar ve Şekil 3.16 da gösterilen maksimum yatay düzlemde JRI dağılımını belirlemişlerdir. Shao ve arkadaşları JRI değerinin, mekanizmanın atalet eşitlenmesinin tek bir bacağa kadar dönüşümünü araştırmışlar ve genel olarak mekanizmanın JRI değerinin uç organın yönelim açısının büyümesi ile arttığını belirtmişlerdir [132].



Şekil 3.16 : Maksimum yatay düzlemde JRI dağılımı [132].

3.4 Kinematik Analiz

Kinematik, harekete sebep olan kuvvetlere bakılmaksızın hareketin incelendiği bir hareket bilimidir. Kinematik biliminde, konum, hız, ivme ve konum değişkeninin zamana veya herhangi bir değişkene bağlı tüm yüksek mertebeli türevleri incelenir. Bu nedenle mekanizmanın kinematik analizinde, hareketin tüm geometrik ve zaman esaslı özellikleri ele alınmaktadır [152].

SPM kinematik analizini, ters kinematik ve düz kinematik yöntemler kullanarak gerçekleştirmek mümkündür. Seri mekanizmalarda düz kinematik analiz kolay, ters kinematik analiz karmaşık iken paralel mekanizmalarda ve dolayısıyla SPM da tam tersi bir durum söz konusudur. Ters kinematik analiz kolay, düz kinematik analiz karmaşıktır. Çünkü belirli bacak boylarına karşılık gelen birden çok konfigürasyon mevcuttur. Ayrıca SPM düz kinematik analizi genellikle yüksek mertebeli lineer olmayan denklemler içerir. Bu denklemlerin kapalı form ve özgün çözümleri yoktur [19, 153, 154]. 6-4 SPM gibi karmaşık yapılarında düz kinematik problemin kapalı formda çözüm sayısı 40 adettir [11].

Ters kinematik yöntemde hareketli platformun konum ve yönelme bilgileri verildiğinde bacak boy uzunlukları hesaplanmaktadır. Düz kinematik yöntemde ise verilen bacak boyuna karşılık gelen hareketli platformun konum ve yönelim bilgileri hesaplanmaktadır. [155, 156].

SPM kinematik analizi ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğu düz kinematik problemin çözümü üzerine yoğunlaşmaktadır [156]. Düz kinematik analiz hem SPM'nin konum kontrolü hem de hareketli platform üzerine yerleştirilen uç organın hız kontrolü açısından gereklidir. Düz kinematik yöntem gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında, görev uzay kontrolünde, kalibrasyonda ve hareket planlamada kullanılmaktadır. Eğer mekanizmanın altı bacağının uzunlukları uygun şekilde kontrol edilirse hareketli platform arzu edilen yörüngeleri izleyebilir. Ters kinematik analiz platformun mafsallı uzay kontrolünde kullanılmaktadır [102].

Mekanizmaların çalışma uzayını belirlemek için normalde düz kinematik yöntem gereklidir. Ancak paralel mekanizmaların çalışma uzayı analizleri söz konusu olduğunda (özellikle ayırıklaştırma yöntemi ile çalışma uzayı analizlerinde araştırma çalışma uzayındaki her bir düğüm noktası için ters kinematik çözüm gerektirmesi ve bunun da çok zaman alıcı olmasına rağmen) basitliği nedeniyle ters kinematik yöntem kullanılmaktadır [157].

1.7.14 3.4.1 Ters kinematik analiz

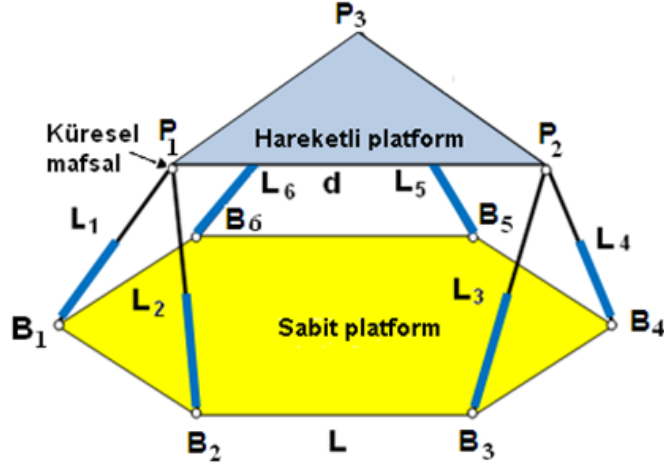
Ters kinematik analizde, hareketli platformun konum ve yönelmesi bilinmesi durumunda bu konum ve yönelmeyi sağlayan mafsallık değerleri/bacak boy uzunlukları hesaplanmaktadır. SPM'nin belirli bir konfigürasyonu için ters kinematik problemin çözümünde bacak uzunluğu çözümü tektir [19].

Ters kinematik analiz çoğunlukla çalışma uzayının belirlenmesi amacıyla kullanıldığı gibi daha karmaşık olan düz kinematik problemin çözümünde de kullanılmaktadır. Parsa ve arkadaşları yapay sinir ağları ile tekilliksiz paralel mekanizma yörüngesinin optimizasyonunu kapsayan çalışmalarında mekanizmanın çalışma uzayının bilinen bazı noktaları için ters kinematik yöntemle mafsallık açıları hesaplanmışlardır. Daha sonra bu verileri, sinir ağı öğrenme setini oluşturmak amacıyla bir dosyaya kaydederek düz kinematik problemin çözümünde bu eğitilmiş yapay sinir ağını kullanmışlardır [98].

Merlet, çalışma uzayı analizinde ters kinematik yöntemi kullanırken üç kısıtı göz önüne almaktadır [236]. Bu kısıtlar:

- Bacak boy uzunlukları
- Mafsallık açıları
- Bacakların çarpışma durumu

olup göz önüne alınan araştırma uzayındaki noktalardan söz konusu kısıtları sağlayanlar çözüm kümesine dahil edilmektedir. Konunun daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla Şekil 3.17 de gösterilmekte olan 6-3 SPM'nı ele alalım.



Şekil 3.17 : 6-3 SPM şematik gösterimi.

Söz konusu SPM'nın sabit platformu düzgün altıgen ve hareketli platformu eşkenar üçgen şeklindedir. Sabit platforma B_i ve hareketli platforma P_j noktalarından (küresel mafsallarla) altı adet boyları değişebilen bacakla platformlar birbirine bağlanmaktadır ($i=1..6$ ve $j=1..3$).

3.4.1.1 Bacak boy uzunlukları

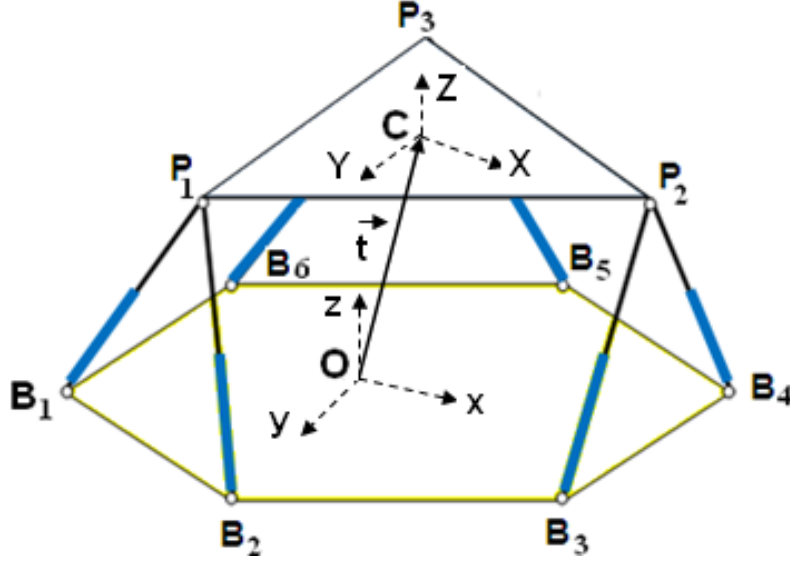
SPM sabit ve hareketli platformları çeşitli konfigürasyonda birbirine bağlayan ve boyları değişebilen altı adet bacağı sahiptir. Şekil 3.18 de bacak olarak kullanılan örnek elektromekanik doğrusal eyleyici gösterilmektedir.



Şekil 3.18 : Bacak olarak kullanılan örnek doğrusal eyleyici [261].

SPM'nın i 'inci bacağının boyu L_i olup değeri L_{imax} ile L_{imin} arasında değişmektedir.

Şekil 3.19 da gösterildiği üzere, sabit platformun koordinat sistemi $O(x,y,z)$, hareketli platformun koordinat sistemi $C(X,Y,Z)$ ve hareketli platformun sabit platforma göre konumu $\vec{t}$ öteleme vektörü ile ifade edilmektedir.



Şekil 3.19 : $\vec{t}$ öteleme vektörü ve eksen takımları.

Sabit platformun köşe noktalarının $O(x,y,z)$ koordinat sistemine göre konum vektörleri $\vec{b}_i$ ($i=1..6$) ve hareketli platformun köşe noktalarının $C(X,Y,Z)$ koordinat sistemine göre konum vektörleri $\vec{p}_j$ ($j=1..3$) olmak üzere i 'inci bacak vektörü $\vec{L}_i$:

$$\vec{L}_i = {}^B R_p \cdot \vec{p}_j + \vec{t} - \vec{b}_i \quad (3.30)_{\text{den}}$$

kleminden elde edilir. Hareketli platformun sabit platforma göre yönelmesi ${}^B R_p$ rotasyon matrisi ile ifade edilir. Katı cisimlerin yönelimlerinin tanımlanmasında Euler açıları kullanılarak rotasyon matrisi elde edilir. Hareketli platformun x ekseninde α , y ekseninde β ve z ekseninde γ açısı kadar dönmesi durumunda ${}^B R_p$ rotasyon matrisi :

$${}^B R_p = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3.31)_{\text{şekli}}$$

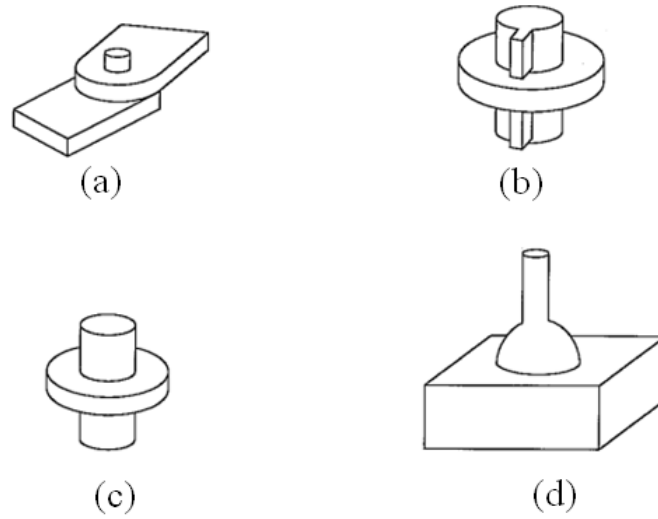
nde matematiksel olarak ifade edilir. i 'inci bacağın uzunluğu:

$$L_i = \sqrt{\bar{L}_i \cdot \bar{L}_i} \quad (3.32)_{\text{ola}}$$

rak ifade edilir. Bu işlemler altı bacak için ayrı ayrı tekrarlanarak, tüm bacak uzunlukları hesaplanır. Kısıt olarak kabul edilen en büyük ve en küçük bacak uzunluğu sınır değerleri arasında bulunan değerler çözüm kümesine dahil edilir.

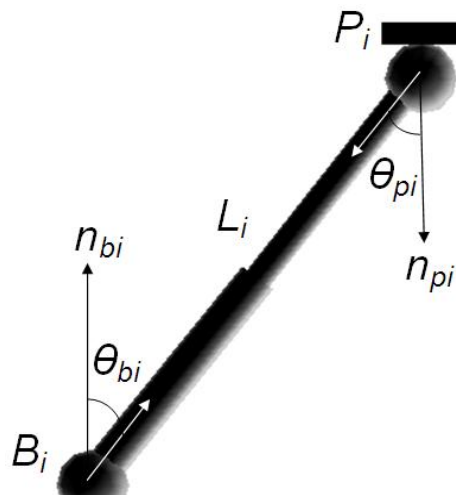
4.1.2 Mafsal açıları

Ters kinematik analizde hesaplanan bir diğer parametre de mafsal açılarıdır. Altı adet bacak sabit ve hareketli platformlara mafsallar yoluyla bağlanmaktadır. Şekil 3.20 de çeşitli mafsallar şematik olarak gösterilmektedir [151].



Şekil 3.20 : (a) Döner, (b) prizmatik, (c) silindirik, (d) küresel mafsalların şematik gösterimi [151].

Şekil 3.21 de gösterildiği üzere i 'inci bacağı, sabit platforma bağlayan mafsalın açısı θ_{bi} ve hareketli platforma bağlayan mafsalın açısı θ_{pi} dir. $\mathbf{n}_{bi}$ ve $\mathbf{n}_{pi}$ sırasıyla sabit ve hareketli platforma dik olan birim vektörler olup mafsal açısı, bacakların bu birim vektörlerle yaptıkları açılardır [219].



Şekil 3.21 : Mafsal açılarının şematik gösterimi [219].

Söz konusu açılar aşağıdaki denklemden hesaplanır :

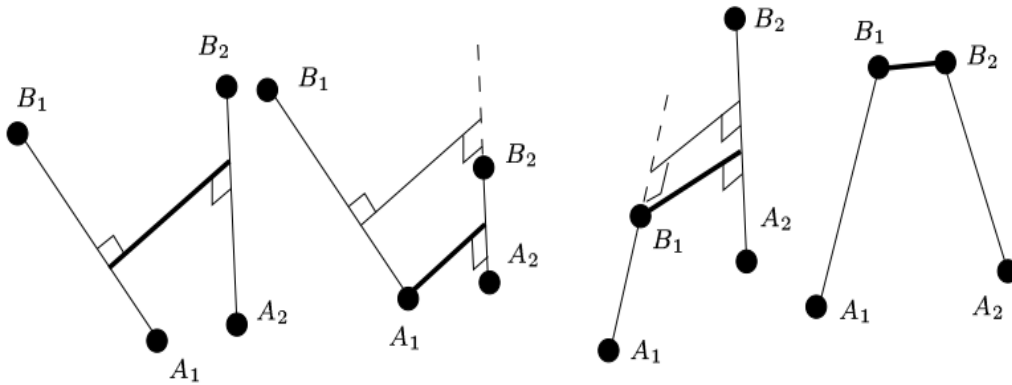
$$\theta_{bi} = \cos^{-1} \frac{\vec{L}_i \cdot \vec{n}_{bi}}{L_i} \quad (3.33)$$

$$\theta_{pi} = \cos^{-1} \frac{\vec{L}_i \cdot {}^B R_P \cdot \vec{n}_{pi}}{L_i} \quad (3.34)$$

Bu işlemler altı bacağın platformlara bağlandığı tüm mafsallar için ayrı ayrı tekrarlanarak, tüm mafsal açıları hesaplanır. Kısıt olarak kabul edilen en büyük ve en küçük mafsal açısı sınır değerleri arasında bulunan değerler çözüm kümesine dahil edilir.

3.4.1.3 Bacakların çarpışma durumu

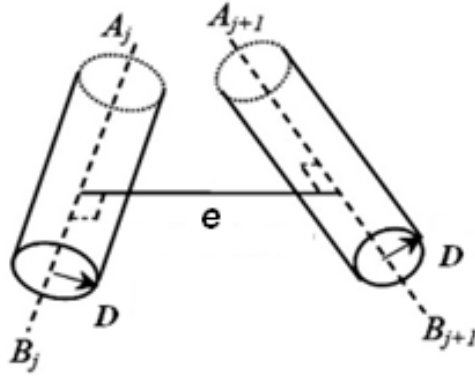
Hareketli platformun dönmesini sınırlayan önemli bir faktör bacakların çarpışma durumudur. Merlet iki bacak arası mesafeyi bacaklar üzerindeki nokta çiftleri arasındaki minimum mesafe olarak Şekil 3.22 de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır [236].



Şekil 3.22 : İki bacak arası mesafe [236].

Daha genel bir ifade ile; Şekil 3.23 de gösterilen bacakların birbirlerine çarpmamaları için ardışık iki bacak arasındaki mesafenin (e), toplam bacak çapından (D) büyük

olması gerekmektedir. Bu kısıt tasarım ve hesaplamalarda göz önüne alınmalıdır [236].



Şekil 3.23 : Bacak çapları ve bacaklar arası mesafe [236].

Hesaplanan bacak uzunluk, mafsal açısı ve bacaklar arası mesafe değerlerinin geometrik kısıtları, yani limit değerleri karşılayıp, karşılamadığı kontrol edilerek çözüm kümesi oluşturulur ve ters kinematik analiz tamamlanır.

1.7.15 3.4.2 Düz kinematik analiz

Düz kinematik problemin çözümünde, verilen bacak boyuna karşılık gelen hareketli platformun konum ve yönelim bilgileri hesaplanmaktadır. Düz kinematik problemin çözümü ters kinematik problemin çözümüne göre oldukça zordur [158]. Çünkü paralel mekanizmalarda belirli bacak boylarına karşılık gelen birden çok konfigürasyon mevcuttur. Ayrıca SPM düz kinematik analizi genellikle yüksek dereceli doğrusal olmayan denklemler içermektedir. Genellikle de bu denklemlerin kapalı form ve özgün çözümleri yoktur [19-39, 153, 159]. 6-4 SPM gibi karmaşık yapılılarda düz kinematik problemin kapalı formda çözüm sayısı 40 adettir [11]. Raghavan yaptığı çalışmada, genel SPM (6-6 SPM) düz kinematik probleminin karmaşık sayılar çözüm kümesinde 40 adet farklı çözümünün olduğunu sayısal olarak ortaya koymuştur [160]. Husty genel SPM düz kinematik probleminde uzaysal kinematik eşleşmeyi kullanarak geliştirdiği algoritma ile tek değişkenli 40'ıncı derece polinom elde etmiştir [154].

SPM kinematik analizi ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğu düz kinematik problemin çözümü üzerine yoğunlaşmaktadır [156].

Mekanizmanın çalışma uzayını belirlemek için normalde düz kinematik yöntem gereklidir. Ancak paralel mekanizmaların çalışma uzayı analizleri söz konusu olduğunda (özellikle ayırıklaştırma yöntemi ile çalışma uzayı analizlerinin araştırma çalışma uzayındaki her bir düğüm noktası için ters kinematik çözüm gerektirmesi ve bunun da çok zaman alıcı olmasına rağmen) basitliği nedeniyle ters kinematik yöntem kullanılmaktadır [157].

Düz kinematik analiz hem SPM'nin konum kontrolü hem de hareketli platform üzerine yerleştirilen uç organın hız kontrolü açısından gereklidir. Düz kinematik yöntem gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında, görev uzay kontrolünde, kalibrasyonda ve hareket planlamada kullanılmaktadır. Eğer mekanizmanın altı bacağının uzunlukları uygun şekilde kontrol edilirse hareketli platform arzu edilen yörüngeleri izleyebilir [102].

Düz kinematik yöntem mekanizma yol planlamalarında da kullanılmaktadır. Yol planlamasının asıl amacı; başlangıç noktasından son noktaya kadar bir yörünge bulmaktır. İstenen yörüngeyi gerektirdiği hareket mümkün olduğunca yumuşak olmalı, konumda, hızda, ivmelenmede keskin değişimlerden kaçınılmalıdır. Çünkü çalışma ortamında istenmeyen engeller ve tekillikler mevcut olabilmektedir. Tekillik bölgelerinden kaçınmak ve uç organ ile çalışma ortamındaki muhtemel engeller arasındaki mesafenin hesaplanması amacıyla Parsa ve arkadaşları ters kinematik verilerle eğitilmiş yapay sinir ağını düz kinematik problemi çözmek için kullanmışlardır. İstenen yörüngeyi her bir adımında mafsalları için düz kinematik problemi çözerek çarpışma olup olmayacağını, söz konusu mesafe ile engelin ve tekil noktanın konumunu karşılaştırarak teyit etmişlerdir [98].

Mekanik basitliği SPM'na birçok mühendislik uygulaması için potansiyel sağlamasına rağmen düz kinematiğinin karmaşıklığı, onun gerçek zamanlı endüstriyel uygulamalar için kullanılmasını sınırlamaktadır. Düz kinematik problemin çözümü için birçok araştırmacı tarafından analitik [161, 186] ve sayısal yöntem [1879-210] esaslı çalışmalar yapılmıştır. Analitik esaslı çalışmalar yüksek dereceli doğrusal olmayan denklemlerin çözümünü gerektirmekte iken sayısal yöntem esaslı çalışmalar da iyi bir başlangıç değeri ile çok sayıda iterasyon

gerektiren zaman alıcı çalışmalardır. Bu durumlar da SPM'nin yüksek hızlı gerçek zamanlı mühendislik uygulamaları için kullanımını elverişsiz hale getirmektedir [211].

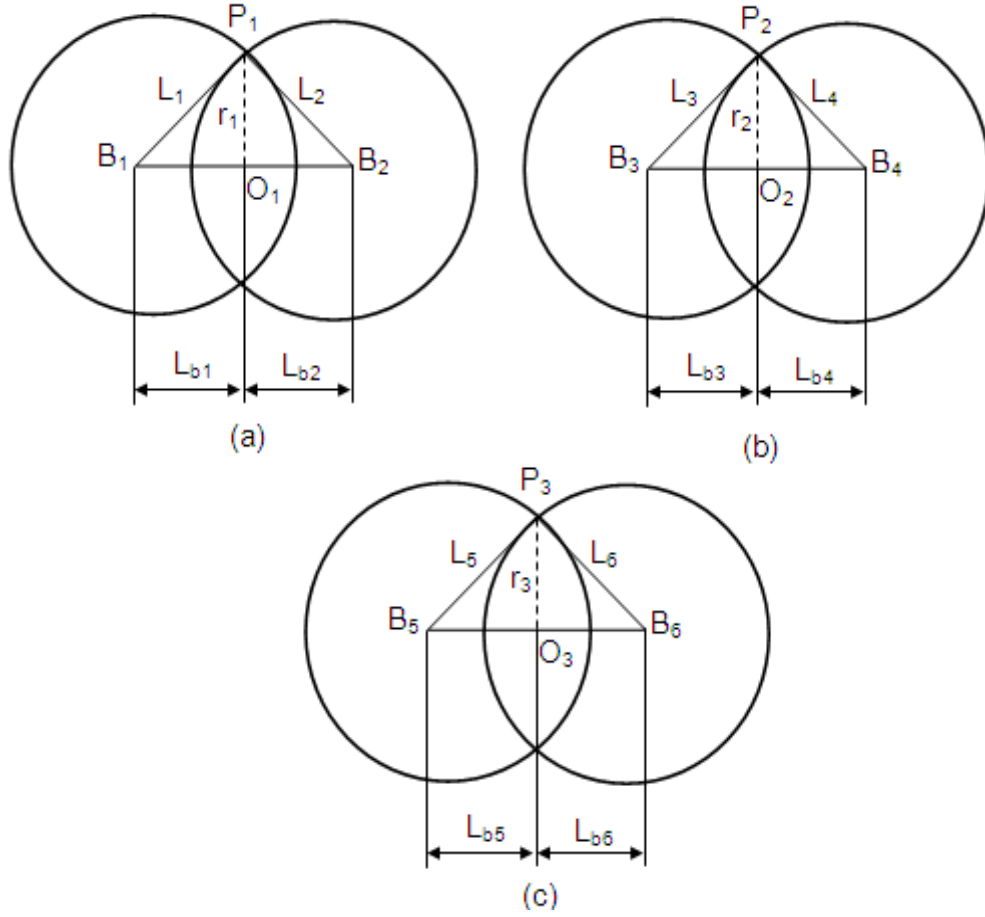
3.4.2.1 Analitik yaklaşımlar

Analitik yöntemler, kapalı form çözümler ve polinomsal denklemleri içerirler. Yalnız çok basit yapıların kapalı form çözümleri vardır [159]. Kapalı form düz kinematik çözüm, mekanizmanın geometrisi ve kinematik davranışı hakkında daha çok bilgi sağlar. Örneğin SPM'nin düz kinematik kapalı form çözümü yalnız hareketli platformun sabit tabana göre gerçek konfigürasyonlarının tam sayısını vermez, ayrıca bacak uzunluk değerlerindeki hataların hareketli platformun konumu ve yönelimi üzerindeki etkilerini miktar olarak verir [161,186]. Polinomsal denklemler de genellikle yüksek derecelilerdir ve çözümleri güçtür. Polinomsal yöntem (cebirsal eliminasyon) kullanılarak SPM kinematik kısıtları, bir dizi lineer olmayan polinomsal denklem yoluyla formüle edilir ve ardından tek bilinmeyenli bileşke polinomsal denkleme dönüştürülürler [159].

Griffis ve Duffy eliminasyon yöntemi kullanarak yaptıkları çalışmada 3-3 SPM'nin belirli bir bacak uzunlukları seti için 16 gerçek SPM konfigürasyonuna karşılık gelen sekizinci derece bir polinom elde etmişlerdir. Söz konusu 16 konfigürasyondan sekiz adedinin tabana göre yansıma olduğunu ve gerçekte hareketli platformun sabit taban üzerinde bulunduğu sekiz adet konfigürasyonun, düz kinematik analizin çözümü olduğunu belirlemişlerdir. Daha sonra çalışma kapsamına 6-3 SPM'nı da dahil etmişlerdir. Griffis ve Duffy çalışmalarında 6-3 SPM'nin belirli bir bacak uzunlukları seti için tek değişkenli onaltıncı dereceden bir polinom elde etmişlerdir [186].

Husty genel SPM düz kinematik probleminde uzaysal kinematik eşleşmeyi kullanarak geliştirdiği algoritma ile tek değişkenli 40 ıncı derece polinom elde etmiştir [154].

Nanua ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada düz kinematik analiz için temel geometrik parametreler ortaya konulmuştur. Bu kapsamda altı farklı noktadan tabana bağlı bacakların ardışık çiftler halinde üç noktadan hareketli platformun köşelerine bağlandığı 6-3 SPM ele alınmıştır [184]. Boy uzunlukları değişebilen bacakların her biri hareket esnasında uzayıp kısalarak üç boyutlu uzayda küreler çizerler. Şekil 3.24 de şematik olarak gösterildiği üzere $B_1P_1B_2$ üçgeninde P_1 köşesi hem B_1 merkezli L_1



Şekil.3.25 : Bacakların oluşturduğu kürelerle ilgili geometrik parametreler [184].

Düzgün altıgenin kenar uzunluğu L olmak üzere, üçgen kenar ve çember yarıçap uzunlukları aşağıdaki denklemler yoluyla hesaplanmaktadır. Hareketli platformun birinci köşe noktası ile ilgili geometrik değerler:

$$L_{b1} = \frac{L^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L} \quad (3.35)$$

$$L_{b2} = L - L_{b1} \quad (3.36)$$

$$r_1 = \sqrt{L_1^2 - L_{b1}^2} \quad (3.37)$$

Hareketli platformun ikinci köşe noktası ile ilgili geometrik değerler:

$$L_{b3} = \frac{L^2 + L_3^2 - L_4^2}{2L} \quad (3.38)$$

$$L_{b4} = L - L_{b3} \quad (3.39)$$

$$r_2 = \sqrt{L_3^2 - L_{b3}^2} \quad (3.40)$$

Hareketli platformun üçüncü köşe noktası ile ilgili geometrik değerler:

$$L_{b5} = \frac{L^2 + L_5^2 - L_6^2}{2L} \quad (3.41)$$

$$L_{b6} = L - L_{b5} \quad (3.42)$$

$$r_3 = \sqrt{L_5^2 - L_{b5}^2} \quad (3.43)$$

denklemlerinden hesaplanırlar [184].

Φ_1 , Φ_2 ve Φ_3 açıları sırasıyla $B_1P_1B_2$, $B_3P_2B_4$ ve $B_5P_3B_6$ üçgenlerinin oluşturduğu düzlemlerin sabit platformunda içinde bulunduğu xy düzlemi ile yaptıkları açılardır. Düz kinematik problemin çözümü için hareketli platformun P_1 , P_2 ve P_3 köşe noktalarının koordinatları ile Φ_1 , Φ_2 ve Φ_3 açılarının hesaplanması gerekir. Nanua ve arkadaşları çözüm için Bezout yöntemini kullanmışlar ve 16'ncı dereceden tek değişkenli bir polinom elde etmişlerdir. Bu belirli bir set bacak boyu için 16 farklı SPM konfigürasyonu anlamına gelmektedir. Polinom çözülmesi ile elde edilen 16 kökten altı adedi sabit platformun üstünde, altı adedi sabit platformun altında olup, dört kök gerçek değildir [184].

3.4.2.2 Sayısal yaklaşımlar

Düz kinematik probleme yönelik denklemleri çözmek için esas olarak, iteratif kök bulma yöntemleri, optimizasyon teknikleri, süreklilik yöntemleri, yapay sinir ağları, genetik algoritma, aralık analizi gibi sayısal iterasyonları içeren yöntemler kullanılmaktadır. Sayısal yöntemlerin modellenmesi kolaydır, fakat yakınsama problemi ortaya çıkabilmektedir. Bu yaklaşımlarda yüksek doğruluğa erişildiği ifade edilmekle birlikte, uygulamada iterasyon sayısını ve sona erdirmeye koşullarını tespit etmek güçtür. Ayrıca bu yöntemlerden bazılarının hesaplama süreleri gerçek zamanlı operasyonlar için uygun değildir [159]. Sayısal yöntemler, SPM düz kinematik probleminin çözülebilmesi için uygun olmasına rağmen iyi bir başlangıç değeri gerektirmesi nedeniyle de kullanışlı değildirler. Ayrıca doğru çözümün garanti olmaması da gerçek zamanlı uygulamaları güçleştirmektedir. SPM düz kinematiğinin matematiksel karmaşıklığı birçok yüksek hızlı, gerçek zamanlı ve çevrim içi mühendislik uygulamasında kullanımını kısıtlamaktadır [166].

Wang ve arkadaşları SPM düz kinematik problemini çözmek amacıyla bağımsız bileşen analizi (ICA) yaklaşımını kullanmışlardır. ICA istatistiksel bir teknik olup, genellikle bir dizi rassal değişkenlere veya sinyallere neden olan gizlenmiş faktörlerin açığa çıkarılması için, sinyal işlemede ve yol tanımlamada kullanılmaktadır. Gizli değişkenler bağımsız bileşenler olarak da adlandırılmakta ve ICA yöntemi kullanılarak bulunabilmektedirler. Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; ilk olarak ICA yöntemini kullanarak bacak uzunluklarını bağımsız bileşen olarak adlandırılan altı değişkenli başka bir forma dönüştürmüşlerdir. Daha sonra iteratif algoritma ile bağımsız bileşenler ve konumsal değişkenler arasındaki ilişkileri ve bağımsız bileşenlerin değerini kullanarak, konumsal değişkenlerin değerini hesaplamışlardır. Bu konumsal değişkenler, SPM'nın konum ve yönelimini simgeleyen bir dizi bağımsız değişken setine karşılık gelmektedir. Simülasyon çalışmasında rassal fonksiyonlar kullanarak altı konumsal değişkenli 5000 örnek veriyi içeren bir veri seti oluşturmuşlardır. Wang ve arkadaşları daha sonra bu veri setlerini kullanarak, karşılıkları bacak uzunluk değerleri doğrudan hesaplamışlardır. Söz konusu bacak uzunluk değerlerini giriş verisi olarak alarak, önerdikleri algoritma ile konumsal değişkenlerin değerlerini elde etmişlerdir. SPM düz kinematik probleminin çözümünde göz önüne alınması gereken kritik unsurların, bileşke çözümü ve gerçek zamanlı işlemede doğruluk olduğunu ifade etmişlerdir. Wang ve arkadaşları gerçekleştirdikleri simülasyonda tekiliksiz ve özgün çözümü bulunan belirli bir konum aralığı için yüksek doğruluk elde ettiklerini, fakat konum aralığını genişletilirse düz kinematik analizin çoklu çözüm sorunu ile karşılaşabileceğini belirtmişlerdir [159].

Raghavan yaptığı çalışmada genel SPM (6-6 SPM) düz kinematik probleminin karmaşık sayılar çözüm kümesinde 40 adet farklı çözümünün olduğunu sayısal olarak ortaya koymuştur [160].

Düz kinematik problemin çözümü için kullanılan sayısal yöntemlerden biri de Newton-Raphson yöntemidir. Yöntem bağımsız değişkenin eksenle kesim noktasının yani kökün tahmini için fonksiyonun türevini (eğimi) kullanmaya dayanır [211]. Bu tahmin Denklem 3.44 de ifade edilen birinci derece Taylor serisi açılımına dayanmaktadır.

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + (x_{i+1} - x_i) f'(x_i) \quad (3.44)$$

Burada x_i kökün ilk tahmini x_{i+1} ise eğimin x eksenini kestiği noktadır. Kesme noktasında $f(x_{i+1})$ değeri tanım gereği sıfırdır. Denklem 3.44 yeniden düzenlenirse,

$$x_{i+1} = x_i + \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (3.45)$$

elde edilir. Bu eşitlik Newton-Raphson yönteminin tek denklem için yazılmış halidir. Birden fazla denklem için yazılmış ifadesi ise benzer şekilde çıkarılır. Ancak kökün belirlenmesine birden fazla değişken katkıda bulunduğu için Taylor serisinin çok değişkenli şekli kullanılmalıdır. İki değişkenli durumda her bir doğrusal olmayan denklem için birinci derece Tayor serisi yazılabilir:

$$u_{i+1} = u_i + (x_{i+1} - x_i) \frac{\partial u_i}{\partial x} + (y_{i+1} - y_i) \frac{\partial u_i}{\partial y} \quad (3.46)$$

$$v_{i+1} = v_i + (x_{i+1} - x_i) \frac{\partial v_i}{\partial x} + (y_{i+1} - y_i) \frac{\partial v_i}{\partial y} \quad (3.47)$$

Tek denklem versiyonunda olduğu gibi, kökün tahmini u_{i+1} ve v_{i+1} 'in sıfır olduğu x ve y değerlerine karşılık gelmektedir. Bu durumda Denklem 3.46 ve 3.47 yeniden düzenlenirse:

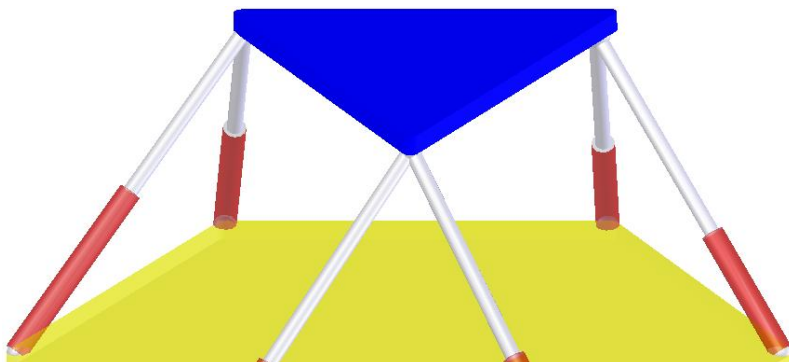
$$\frac{\partial u_i}{\partial x} \cdot x_{i+1} + \frac{\partial u_i}{\partial y} \cdot y_{i+1} = -u_{i+1} + x_i \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x} + y_i \cdot \frac{\partial u_i}{\partial y} \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial x} \cdot x_{i+1} + \frac{\partial v_i}{\partial y} \cdot y_{i+1} = -v_{i+1} + x_i \cdot \frac{\partial v_i}{\partial x} + y_i \cdot \frac{\partial v_i}{\partial y} \quad (3.49)$$

Bu denklemlerde i indisli değerler bilindiğinden, bilinmeyenler sadece x_{i+1} ve y_{i+1} 'dir.

Denklem 3.48 ve 3.49 çözülerek kökleri x_{i+1} ve y_{i+1} bulunur [211].

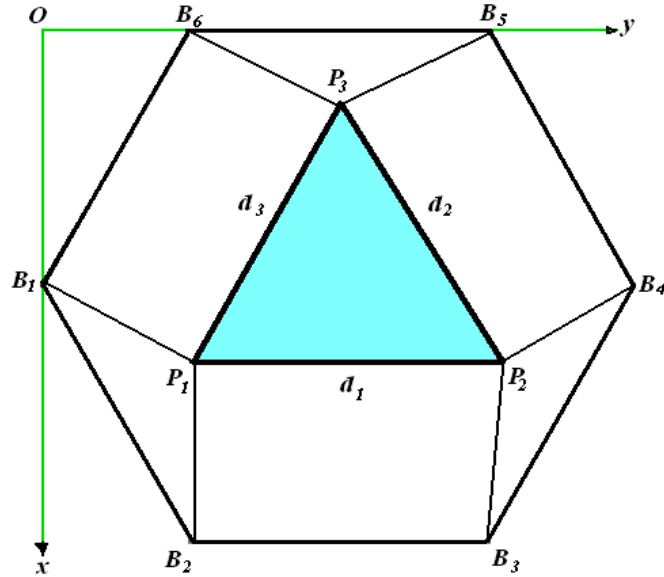
Tez çalışması kapsamında, Şekil 3.26 de gösterilen eşkenar üçgen şeklinde hareketli platform ve düzgün altıgen şeklinde sabit platformdan oluşan 6-3 SPM'nın düz kinematik probleminin çözümü Newton-Raphson yöntemi ile ele alınmıştır.



Şekil 3.26 : 6-3 SPM'nin katı modeli.

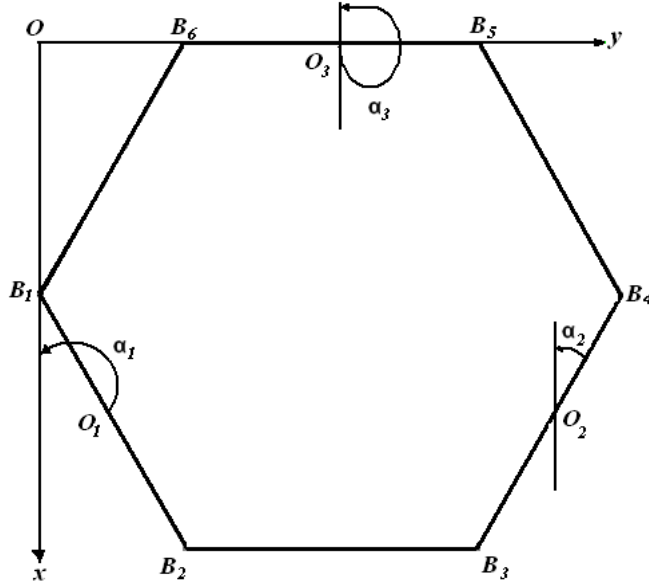
Bacaklar sabit platforma ünversal, hareketli platforma da küresel mafsallarla bağlıdır. Şekil 3.27 de gösterildiği gibi hareketli platformun kenar uzunlukları d_1 , d_2 ve d_3 olup, platform eşkenar üçgen şeklinde olduğundan tüm kenarların uzunlukları d ' dir.

Düzgün altıgenin kenar uzunluğu L ve i 'nci bacağın uzunluğu L_i ($i= 1,...,6$) dir.



Şekil 3.27 : 6-3 SPM'nin üstten şematik görünüşü.

Nanua ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada [184] ifade edilen ve Şekil 3.24 de gösterilen O_1 , O_2 ve O_3 çember merkezlerinin x eksenini ile yaptıkları Şekil 3.28 de gösterilen açılar, sırasıyla α_1, α_2 ve α_3 'dür .



Şekil 3.28 : Sabit taban üzerinde çember merkezlerinin x eksenini ile yaptığı açılar.

Düzgün altıgenin kenar uzunluğu $L=1$ birim alındığında sabit taban üzerindeki B_i bağlantı noktalarının koordinatları sırasıyla:

$$x_1 = \cos(\pi / 6) \quad (3.50)$$

$$y_1 = 0 \quad (3.51)$$

$$x_2 = 2 \cdot x_1 \quad (3.52)$$

$$y_2 = \sin(\pi / 6) \quad (3.53)$$

$$x_3 = x_2 \quad (3.54)$$

$$y_3 = y_2 + l \quad (3.55)$$

$$x_4 = x_1 \quad (3.56)$$

$$y_4 = y_3 + \sin(\pi / 6) \quad (3.57)$$

$$x_5 = 0 \quad (3.58)$$

$$y_5 = y_3 \quad (3.59)$$

$$x_6 = 0 \quad (3.60)$$

$$y_6 = y_2 \quad (3.61)$$

O_1 , O_2 ve O_3 çember merkezlerinin x - y düzlemindeki koordinatları:

$$x_{O1} = x_1 + L_{b1} \cdot \cos(\pi - \alpha_1) \quad (3.62)$$

$$y_{O1} = y_1 + L_{b1} \cdot \sin(\pi - \alpha_1) \quad (3.63)$$

$$x_{O2} = x_3 + L_{b3} \cdot \cos(\pi - \alpha_2) \quad (3.64)$$

$$y_{O2} = y_3 + L_{b3} \cdot \sin(\pi - \alpha_2) \quad (3.65)$$

$$x_{O3} = 0 \quad (3.66)$$

$$y_{O3} = y_5 - L_{b5} \quad (3.67)$$

x - y düzlemi ile $B_1P_1B_2$ düzleminin yaptığı açı Φ_1 , $B_3P_2B_4$ düzleminin yaptığı açı Φ_2 ve $B_5P_3B_6$ düzleminin yaptığı açı ise Φ_3 'dür.

Tez kapsamında Matlab programında geliştirilen kodlarla Newton-Raphson yöntemi kullanılarak Φ_1 , Φ_2 ve Φ_3 açıları için ilk tahmin değerlerinin girilmesi ile birkaç iterasyonda bu açıların değerleri bulunur. Hareketli platformun köşe noktaları $P_1(a_1, b_1, c_1)$, $P_2(a_2, b_2, c_2)$ ve $P_3(a_3, b_3, c_3)$ 'ün xyz eksen takındaki koordinatları sırasıyla:

$$a_1 = x_{O1} - r_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot \sin(\pi - \alpha_1) \quad (3.68)$$

$$b_1 = y_{O1} + r_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot \cos(\pi - \alpha_1) \quad (3.69)$$

$$c_1 = r_1 \cdot \sin(\phi_1) \quad (3.70)$$

$$a_2 = x_{O2} - r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin(\pi - \alpha_2) \quad (3.71)$$

$$b_2 = y_{O2} + r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \cos(\pi - \alpha_2) \quad (3.72)$$

$$c_2 = r_2 \cdot \sin(\phi_2) \quad (3.74)$$

$$a_3 = x_{O3} - r_3 \cdot \cos(\phi_3) \cdot \sin(\pi - \alpha_3) \quad (3.75)$$

$$b_3 = y_{O3} + r_3 \cdot \cos(\phi_3) \cdot \cos(\pi - \alpha_3) \quad (3.76)$$

$$c_3 = r_3 \cdot \sin(\phi_3) \quad (3.77)$$

Eşkenar üçgen şeklindeki hareketli platformun köşe noktaları arasındaki uzaklıklar d esas alınarak sırasıyla $u_1(\theta_1, \theta_2)$, $u_2(\theta_2, \theta_3)$ ve $u_3(\theta_1, \theta_3)$ fonksiyonları yazılırsa:

$$\begin{aligned}
u_1 &= [x_{o1} - r_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot \sin(\pi - \alpha_1) - (x_{o2} - r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin(\pi - \alpha_2))]^2 \\
&\dots + [y_{o1} + r_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot \cos(\pi - \alpha_1) - (y_{o2} + r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \cos(\pi - \alpha_2))]^2 + \dots \\
&\dots + [r_1 \cdot \sin(\phi_1) - r_2 \cdot \sin(\phi_2)]^2 - d^2
\end{aligned} \tag{3.78}$$

$$\begin{aligned}
u_2 &= [x_{o2} - r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin(\pi - \alpha_2) - (x_{o3} - r_3 \cdot \cos(\phi_3) \cdot \sin(\pi - \alpha_3))]^2 \\
&\dots + [y_{o2} + r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \cos(\pi - \alpha_2) - (y_{o3} + r_3 \cdot \cos(\phi_3) \cdot \cos(\pi - \alpha_3))]^2 + \dots \\
&\dots + [r_2 \cdot \sin(\phi_2) - r_3 \cdot \sin(\phi_3)]^2 - d^2
\end{aligned} \tag{3.79}$$

$$\begin{aligned}
u_3 &= [x_{o3} - r_3 \cdot \cos(\phi_3) \cdot \sin(\pi - \alpha_3) - (x_{o1} - r_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot \sin(\pi - \alpha_1))]^2 \\
&\dots + [y_{o3} + r_3 \cdot \cos(\phi_3) \cdot \cos(\pi - \alpha_3) - (y_{o1} + r_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot \cos(\pi - \alpha_1))]^2 + \dots \\
&\dots + [r_3 \cdot \sin(\phi_3) - r_1 \cdot \sin(\phi_1)]^2 - d^2
\end{aligned} \tag{3.80}$$

$u_1(\emptyset_1, \emptyset_2)$ fonksiyonunun $\emptyset_1$ ve $\emptyset_2$ 'ye, $u_2(\emptyset_2, \emptyset_3)$ fonksiyonunun $\emptyset_2$ ve $\emptyset_3$ 'e ve $u_3(\emptyset_1, \emptyset_3)$ fonksiyonunun $\emptyset_1$ ve $\emptyset_3$ 'e göre kısmi türevleri alınırsa:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u_1}{\partial \phi_1} &= 2 \cdot [r_1 \cdot \sin(\phi_1) \cdot \sin(\pi - \alpha_1)] \cdot [x_{o1} - r_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot \sin(\pi - \alpha_1) - (x_{o2} - r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin(\pi - \alpha_2))] \dots \\
&\dots - 2 \cdot (r_1 \cdot \sin(\phi_1) \cdot \cos(\pi - \alpha_1)) \cdot [y_{o1} + r_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot \cos(\pi - \alpha_1) - (y_{o2} + r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \cos(\pi - \alpha_2))] \dots \\
&\dots + 2 \cdot r_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot [r_1 \cdot \sin(\phi_1) - r_2 \cdot \sin(\phi_2)]
\end{aligned} \tag{3.81}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u_1}{\partial \phi_2} &= 2 \cdot [-r_2 \cdot \sin(\phi_2) \cdot \sin(\pi - \alpha_2)] \cdot [x_{o1} - r_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot \sin(\pi - \alpha_1) - (x_{o2} - r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin(\pi - \alpha_2))] \dots \\
&\dots + 2 \cdot (r_2 \cdot \sin(\phi_2) \cdot \cos(\pi - \alpha_2)) \cdot [y_{o1} + r_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot \cos(\pi - \alpha_1) - (y_{o2} + r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \cos(\pi - \alpha_2))] \dots \\
&\dots - 2 \cdot r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot [r_1 \cdot \sin(\phi_1) - r_2 \cdot \sin(\phi_2)]
\end{aligned} \tag{3.82}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u_2}{\partial \phi_2} &= 2 \cdot [r_2 \cdot \sin(\phi_2) \cdot \sin(\pi - \alpha_2)] \cdot [x_{o2} - r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin(\pi - \alpha_2) - (x_{o3} - r_3 \cdot \cos(\phi_3) \cdot \sin(\pi - \alpha_3))] \dots \\
&\dots - 2 \cdot (r_2 \cdot \sin(\phi_2) \cdot \cos(\pi - \alpha_2)) \cdot [y_{o2} + r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot \cos(\pi - \alpha_2) - (y_{o3} + r_3 \cdot \cos(\phi_3) \cdot \cos(\pi - \alpha_3))] \dots \\
&\dots + 2 \cdot r_2 \cdot \cos(\phi_2) \cdot [r_2 \cdot \sin(\phi_2) - r_3 \cdot \sin(\phi_3)]
\end{aligned} \tag{3.83}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_2}{\partial \phi_3} &= 2.[-r_3.\sin(\phi_3).\sin(\pi-\alpha_3)].[x_{O2}-r_2.\cos(\phi_2).\sin(\pi-\alpha_2)-(x_{O3}-r_3.\cos(\phi_3).\sin(\pi-\alpha_3))]\dots \\ &\dots+2.(r_3.\sin(\phi_3).\cos(\pi-\alpha_3)).[y_{O2}+r_2.\cos(\phi_2).\cos(\pi-\alpha_2)-(y_{O3}+r_3.\cos(\phi_3).\cos(\pi-\alpha_3))]\dots \\ &\dots-2.r_3.\cos(\phi_3).[r_2.\sin(\phi_2)-r_3.\sin(\phi_3)]\end{aligned}\quad (3.84)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_3}{\partial \phi_3} &= 2.[r_3.\sin(\phi_3).\sin(\pi-\alpha_3)].[x_{O3}-r_3.\cos(\phi_3).\sin(\pi-\alpha_3)-(x_{O1}-r_1.\cos(\phi_1).\sin(\pi-\alpha_1))]\dots \\ &\dots-2.(r_3.\sin(\phi_3).\cos(\pi-\alpha_3)).[y_{O3}+r_3.\cos(\phi_3).\cos(\pi-\alpha_3)-(y_{O1}+r_1.\cos(\phi_1).\cos(\pi-\alpha_1))]\dots \\ &\dots+2.r_3.\cos(\phi_3).[r_3.\sin(\phi_3)-r_1.\sin(\phi_1)]\end{aligned}\quad (3.85)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_3}{\partial \phi_1} &= 2.[-r_1.\sin(\phi_1).\sin(\pi-\alpha_1)].[x_{O3}-r_3.\cos(\phi_3).\sin(\pi-\alpha_3)-(x_{O1}-r_1.\cos(\phi_1).\sin(\pi-\alpha_1))]\dots \\ &\dots+2.(r_1.\sin(\phi_1).\cos(\pi-\alpha_1)).[y_{O3}+r_3.\cos(\phi_3).\cos(\pi-\alpha_3)-(y_{O1}+r_1.\cos(\phi_1).\cos(\pi-\alpha_1))]\dots \\ &\dots-2.r_1.\cos(\phi_1).[r_3.\sin(\phi_3)-r_1.\sin(\phi_1)]\end{aligned}\quad (3.86)$$

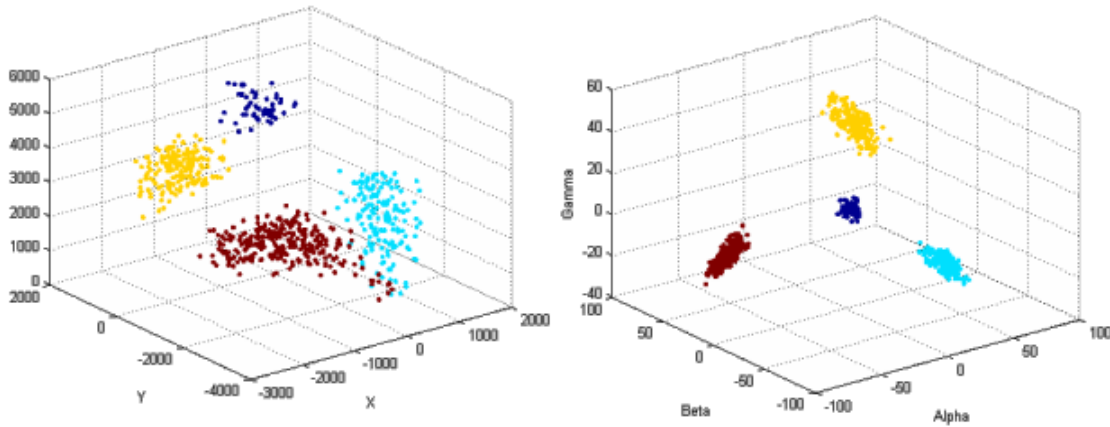
$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial \phi_1} & \frac{\partial u_1}{\partial \phi_2} & 0 \\ 0 & \frac{\partial u_2}{\partial \phi_2} & \frac{\partial u_2}{\partial \phi_3} \\ \frac{\partial u_3}{\partial \phi_1} & 0 & \frac{\partial u_3}{\partial \phi_3} \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

$$B = \begin{bmatrix} -u_1 + \phi_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial \phi_1} + \phi_2 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial \phi_2} \\ -u_2 + \phi_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial \phi_2} + \phi_3 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial \phi_3} \\ -u_3 + \phi_1 \cdot \frac{\partial u_3}{\partial \phi_1} + \phi_3 \cdot \frac{\partial u_3}{\partial \phi_3} \end{bmatrix} \quad (3.88)$$

$$X = A^{-1}B = [\phi_1; \phi_2; \phi_3] \quad (3.89)$$

Yeni ϕ_1 , ϕ_2 ve ϕ_3 değerleri Newton-Raphson yöntemi ile bulunur. İyi bir başlangıç değeri gerektirmesi, her zaman yakınsama garantisi olmaması nedeniyle söz konusu yöntem SPM'nın gerçek zamanlı uygulamaları için uygun değildir.

Tarokh yüksek hızlı gerçek zamanlı uygulamalarda SPM'nı kullanabilmek için düz kinematik problemin çözümünde yukarıda bahsedilen analitik ve sayısal yöntemlerden tamamen farklı iki aşamalı bir yöntem geliştirmiştir [212]. Birinci aşama çevrim dışı hazırlık aşamasıdır. Bu aşamada; altı boyutlu bacak uzayı üç boyutlu pozisyon ve yine üç boyutlu yönelim için ayrı ayrı olmak üzere iki alt uzaya ayrılmaktadır. Bu alt uzaylar düzgün hücrelere bölünmekte olup, mekanik kısıtlar göz önüne alınarak ters kinematik kullanımı ile bacak-konum verileri elde edilmektedir.



Şekil 3.29 : Pozisyon ve yönelim alt uzaylarını içeren çözüm kümeleri [212].

Şekil 3.29 dan da görüleceği üzere bu veriler elde edilirken kısıtlara uygun olmayan veriler ve karşılıkları konumlar çıkarıldığından bacak uzayını oluşturan hücreler düzgün ve aynı hacimli olmasına rağmen karşılıkları olan konum uzayı aynı şekle ve hacme sahip değildir. Şekil 3.29 da gösterilen farklı renkteki her bir küme bir düz kinematik çözümü göstermektedir. Bir bölgedeki düz kinematiğin modellenmesi yapılmadan önce bu çözümler/veriler modifiye edilmiş “K-ortalama” kümeleme tekniği ile sınıflandırılmaktadır. Elde edilen bu veriler kullanılarak basit denklemlerle her bir hücreye ait düz kinematik bilgiler hassas olarak saptanmaktadır. İkinci aşama çevrimiçi aşama olup, bu aşamada bir önceki çevrimdışı aşamada elde edilmiş ve depolanmış olan bilgiler çevrimiçi olarak, verilen bir bacak boyuna karşılık gelen konum bilgisini elde etmede kullanılmaktadır. Çevrimiçi bu işlemler oldukça hızlı gerçekleştirildiği için de gerçek zamanlı uygulamalar mümkün olmaktadır [212].

4. ÇALIŞMA UZAYI

Çalışma uzayı, paralel mekanizma hareketli platformunun geometrik merkezinin/uç organın ulaşabildiği tüm koordinatlardan, noktalardan oluşan bölgedir [213,214].

Paralel mekanizmaların kapalı çevrim yapısı, çalışma uzaylarını sınırlar ve çalışma uzayı içinde karmaşık kinematik tekillikler oluşturur. Mekanizmanın geometrisi nedeniyle çalışma uzayı içinde boşluklar da meydana gelebilir. Bu nedenlerle çalışma uzayı içinde yörünge planlama çok güçleşir [215]. Paralel mekanizmalar ve dolayısı ile SPM için problem, çalışma uzayı içindeki engellerden kaçınma değil, verilen yörüngeyi tümüyle mekanizmanın çalışma uzayı içinde olup olmadığının tespiti veya iki konum arasındaki yörüngeyi çalışma uzayında bulunması ve tekilliksiz olmasıdır. Etkin yol planlama için çalışma uzayının ayrıntılı analizi gereklidir [216]. Çünkü tüm robotlar belirlenmiş görevleri yerine getirme amacıyla kullanılırlar ve verilen görevin başarılabilmesi için de ulaşılması gerekli olan tüm konum ve yönelimlerin de çalışma uzayı içinde bulunması gereklidir. Robotun ve ilgili ekipmanların istenen görevleri emniyetle yerine getirebilmesi ve kullanıcının zarar görmemesi açısından ihtiyaç duyulan çalışma ortam boyutlandırmasında çalışma uzayı ana tasarım kriterlerinden biridir [213].

Çalışma uzayı analizi ve optimizasyonu mekanizma tasarımında da önemlidir. Paralel mekanizmaların seri mekanizmalara göre birçok üstün özelliği olmasına rağmen, çalışma uzayının daha küçük olması nedeniyle çalışma uzayı nitelik ve niceliği en önemli performans indislerindendir ve tasarım ile mekanizma hareket planlamasında kritik öneme sahiptir. Bu nedenle bacakların, mafsalların, sabit taban ve hareketli platformun geometrik parametreleri çalışma uzayını en iyileyecek şekilde tasarlanmalıdır [217].

Çalışma uzayının şekli ve büyüklüğü ana tasarım kriterlerindendir [218]. CNC makineleme de kullanılan SPM'nin çalışma uzayını ve sınırlarını bilmek kullanım aralığını genişletmek açısından gereklidir. Ayrıca, iş parçasının konumu ve yönelimi

göz önüne alındığında işlenip işlenemeyeceğine karar verilmesi çalışma uzayı ile doğrudan ilgilidir [219]. Çünkü makineleme işlemi gibi paralel mekanizmaların endüstrideki pratik uygulamalarında ve çevrim dışı programlamada tanımlanan görevin başarısı için, önceden tanımlanan takım yolunun çalışma uzayı içinde olması gerekmektedir [13]. İş parçasının şeklindeki, hacmindeki düzensizliklerin bilinmesi, tezgahı kullanan operator/üretim mühendislerinin iş gücü ile malzeme kayıplarının en aza indirilmesi ve kesici takım ile iş parçası arasında çarpışma olmaması açılarından önemlidir [220].

4.1 Çalışma Uzayı Sınıflandırması

Altı serbestlik dereceli mekanizmanın tam çalışma uzayının altı boyutlu olması ve bunun grafiksel olarak insan okunabilirliğinin mümkün olmaması nedeniyle söz konusu tam çalışma uzayı üç boyutlu alt uzaylara ayrılmaktadır. Ayrıca, özellikle mafsal limitleri ve bacakların çarpışma durumu gibi mekanik sorunlar göz önüne alındığı zaman, altı serbestlik dereceli paralel mekanizma için altı boyutlu çalışma uzay sınırının ve hacminin analitik olarak belirlenmesi mümkün değildir. Bu amaçla üç boyutlu ulaşılabilen çalışma uzayı hacmi sık olarak kullanılır [217].

Genellikle SPM çalışma uzayı ile ilgili araştırmalar, ulaşılabilen çalışma uzayı [221-230], sabit yönelim/öteleme çalışma uzayı [231-235] ve yönelim çalışma uzayı [236-245] olarak literatürde üç ana başlık altında yoğunlaşmaktadır:

4.1.1 4.1.1 Ulaşılabilen çalışma uzayı

Ulaşılabilen çalışma uzayı, hareketli platformun geometrik merkezinin/uç organın herhangi bir yönelimde, kısıtlar göz önüne alınarak ulaşabildiği tüm noktalardan oluşan bölgedir. Benzer mekanizmalar arasından en uygun mekanizmanın seçimi, bunların ulaşılabilen ve önceden tanımlanan beceri (dextrous) çalışma uzaylarının büyüklüklerini ve şeklini karşılaştırarak yapılmaktadır [226]. Beceri çalışma uzayı tüm yönelimlerde ulaşılabilen noktalardan oluşan çalışma uzayıdır ve ulaşılabilen çalışma uzayının alt kümesidir. [34,246,247].

4.1.2 4.1.2 Yönelim çalışma uzayı

Yönelim çalışma uzayı hareketli platformun geometrik merkezi bir noktada sabit tutulduğunda (öteleme hareketi yapmadığında), hareketli platformun söz konusu

nokta etrafında yönelim hareketi ile kısıtlar göz önüne alınarak ulaşabildiği tüm noktalardan oluşan bölgedir. Üç boyutlu yönelim çalışma uzayını belirlemek ve görselliğini sağlamak çok güçtür. Yönelim çalışma uzayı analizlerinde genellikle Euler açıları kullanılmaktadır. Yönelim çalışma uzayı için kartezyen, küresel ve silindirik koordinat sistemlerini kullanmak mümkün olmakla birlikte, kartezyen koordinat sisteminde gösterim güçtür [239]. Kartezyen koordinat sisteminde yönelim çalışma uzayının fiziksel anlamı kolayca tanımlanamaz ve görselleştirilemez [217]. Yönelim çalışma uzayında orijinden başlayan ışın demetleri kullanılmaktadır. Hesaplamanın hassasiyeti kullanılan ışınların yoğunluğuna, sıklığına bağlıdır. Yönelim çalışma uzayının karmaşıklığı göz önüne alındığında, SPM uç organının yalnızca muhtemel üç yöneliminin ikisi hesaplanmakta ve görselleştirilmektedir [242].

4.1.3 4.1.3 Sabit yönelim/öteleme çalışma uzayı

Sabit yönelim/öteleme/konumsal çalışma uzayı analizinde platform belirli bir yönelimde sabit tutulduğunda, öteleme hareketi ile ulaşabildiği tüm noktalardan oluşan bölgedir. Geometrik yaklaşımla sabit yönelim/öteleme çalışma uzayı belirlemede Solidworks, Catia gibi ticari CAD programları kullanılabilir [249].

4.2 Çalışma Uzayı Belirlemede Kullanılan Yöntemler

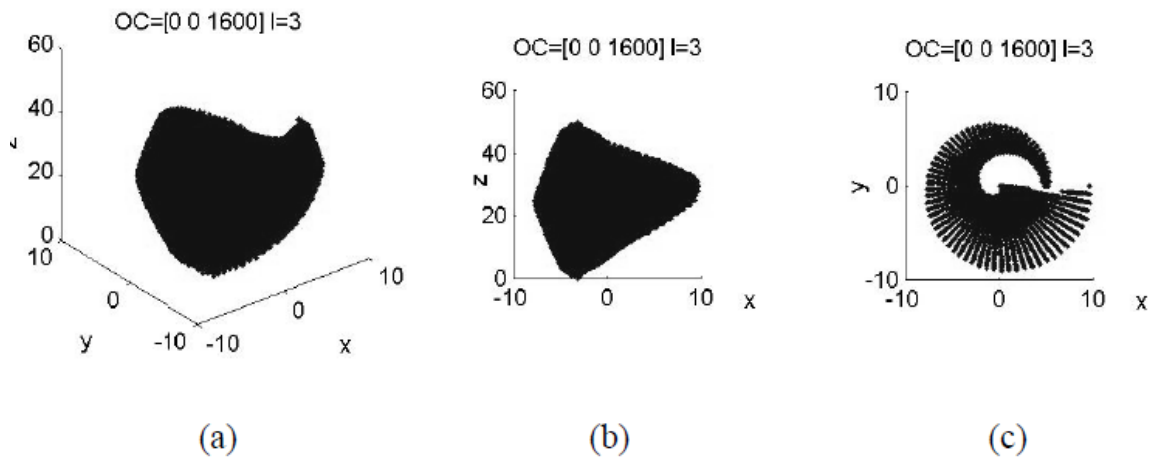
Farklı çalışma uzaylarını elde etmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır [213]. Çalışma uzayı analizinde kullanılan yöntemler genel olarak sayısal yöntemler, analitik yöntemler ve geometrik yöntemler olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır [218,249,250].

4.2.1 4.2.1 Sayısal yöntemler

Çalışma uzayını belirlemek için kullanılan sayısal yaklaşımların çoğunda ayrıklaştırma yöntemi tercih edilmektedir [248]. Ayrıklaştırma yaklaşımında araştırma uzayı kartezyen ya da kutupsal koordinatlarda düzenli olarak çözüm ağlarına ayrılmaktadır. Söz konusu ağlara ait her bir düğüm noktasının (nod) çalışma uzayına ait olup olmadığı ilgili kısıtlar göz önüne alınarak ters kinematik yöntem kullanılarak analiz edilmektedir. Kısıtları sağlayan düğüm noktaları çalışma uzayına

dahil edilmektedir. Araştırmanın hassasiyeti ağ oluşturmak için kullanılan örnekleme adım büyüklüğüne bağlıdır. Hesaplama süresi örnekleme adım büyüklüğüne bağlı olarak üssel olarak değişmektedir. Bu durum hassasiyet üzerinde önemli bir etkindir. Ayrıca çalışma uzayının boşluklar içermesi de problemlere neden olmaktadır. Bu durumda boşlukların saptanabilmesi için adım büyüklüğü küçültülmekte ve iterasyon sayısı dolayısıyla da hesaplama süresi artmaktadır. Söz konusu problemle ilgili olarak bazı araştırmacılar çalışma uzayını belirlemek amacıyla sayısal yöntemi esas alan optimizasyon teknikleri kullanmışlardır [252]. Çalışma uzayı içerisinde boşlukların oluşma nedeni bacakların ve mafsalların konumu gibi mekanizmanın geometrisidir. Sayısal yöntemde radyal araştırma yapılmaktadır. Araştırma merkezden başlayarak radyal doğrultu boyunca sınır noktaya ulaşınca kadar sürdürülmektedir. Sınır nokta belirlendikten sonra bir sonraki radyal çizgiye geçilerek aynı analiz yapılarak, çalışma uzayı sınırı saptanmaktadır. Rassal olarak araştırma uzayı büyütülmeksizin boşlukların belirlenmesi mümkün değildir. Bacak boyu ve mafsal sınırlamalarına bağlı olarak her bir bacağın çalışma uzayı küresel şekilde oluşmakta ve bacakların küre şeklindeki çalışma uzaylarının kesişimi ile de mekanizmanın çalışma uzayı sınırı belirlenmektedir [81]. Ayrıca aralık (interval) analiz yöntemi de kullanılarak sayısal yöntemle çalışma uzayı belirlenebilmektedir [253,254].

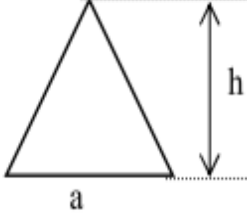
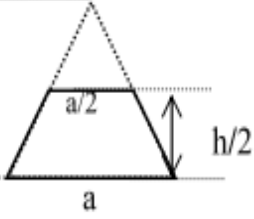
Alp ve Özkol yaptıkları çalışmada 6-3 SPM, özel yapı 6-3 SPM ve 6-4 SPM'lerinin Şekil 4.1 de örneği gösterilen yönelme çalışma uzayı analizlerini, ayrıklaştırma metodu kullanarak gerçekleştirmişlerdir [241].



Şekil 4.1 :: 6-3 özel SPM yönelme çalışma uzayı görünümüleri [241].

Şekil 4.1 deki grafiklerde boş alanların çalışma uzayı dışındaki noktalar olduğunu, bir başka deyişle bu noktaların önceden tanımlanan bacak uzunlukları ve mafsalları açılarının maksimum ve minimum değerleri dışındaki noktalar olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca Alp ve Özkol aynı çalışmada 6-3 SPM'nin hareketli platform alanının değerini değiştirirerek, diğer bir ifade ile 6-3 SPM'nin hareketli platformunun yüksekliği yarıya indirilerek, elde edilen 6-4 SPM'nin çalışma uzayının 6-3 SPM'ne göre % 49.55 kadar arttığını tespit etmişlerdir. 6-3 ve 6-4 SPM'lerinin çalışma uzayları Çizelge 4.1 de karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 4.1: 6-3 ve 6-4 SPM çalışma uzayı kıyaslaması [241] .

Üçgen	Üçgen-Yamuk
	
Erişebilir Nokta Sayısı/Toplam Nokta Sayısı $233.978/1.000.000 = 0,23397$ %23,39	Erişebilir Nokta Sayısı/Toplam Nokta Sayısı $349.822/1.000.000 = ,349822$ % 34,98

Yapay sinir ağları ile çalışma uzayı analizi ilk kez Alp ve arkadaşları tarafından başka bir çalışmada yapılmış olup, bu çalışma ile analiz işlem süresini azaltmayı başarmışlardır [251].

4.2.2 4.2.2 Analitik yöntemler

Analitik yaklaşımların çoğu önemli ölçüde robot mimarisine bağlıdır. Bu nedenle analitik yöntemlerin genelleştirilmesi güçtür ve belirli manipulator uygulamaları için kullanışlıdır [216]. Çalışma uzayı sınırı üzerindeki bir nokta için mekanizmanın hızının sınıra dik olan vektör boyunca sıfıra eşit olmak zorunluluğunu esas alan Jakobyen matris tekniği kullanılan analitik yöntemlerden biridir [236].

4.2.3 4.2.3 Geometrik yöntemler

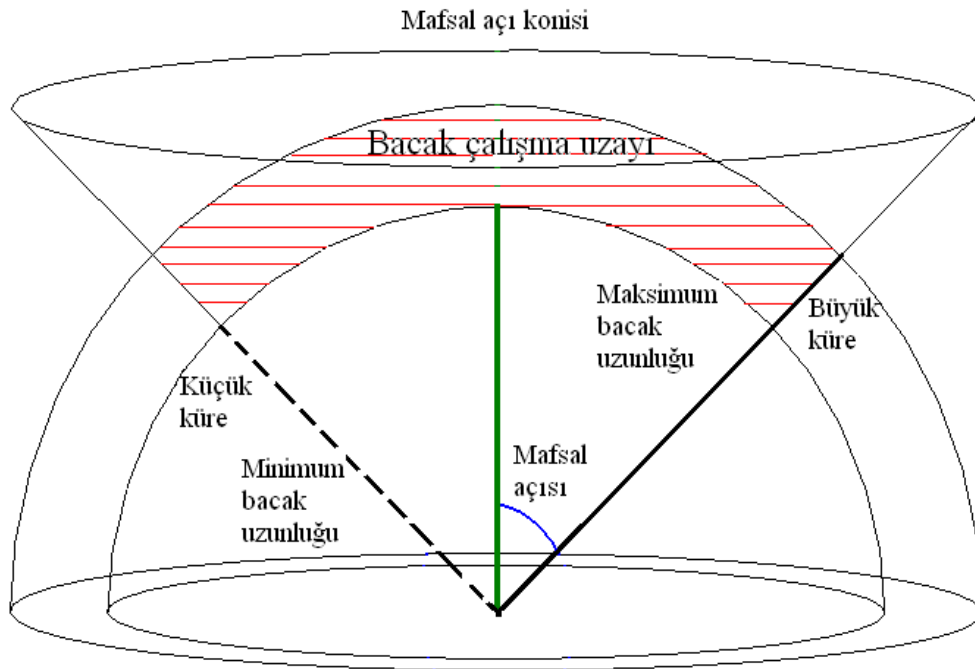
SPM'nin ulaşılabilen sabit yönelim/öteleme çalışma uzayını hesaplamada kullanılan geometrik yöntem ilk olarak Gosselin tarafından önerilmiştir. Yöntemde her bir bacak tarafından oluşturulan ulaşılabilen çalışma uzaylarının kesişimi ile çalışma uzayı sınırları elde edilmektedir. Geometrik yöntemler yaygın olarak sabit yönelim çalışma uzayının sınırlarının tespit edilmesinde kullanılmaktadırlar [253-260]. Bu yöntemlerde ilk olarak hareketli platformun geometrik merkezinin ulaşma sınırlarını tanımlayan yüzeylerin, tüm bacakların çalışma uzaylarının kesişimi ile elde edilmesi temel alınmaktadır. Geometrik yöntemlerin ana dezavantajı, hesaplamaların genellikle sabit yönelim çalışma uzayı ile sınırlı olması ve Boolean operasyonları için CAD programları gibi ilave geometrik araçlar gerektirmesidir [216]. Bu yöntem ayırıklaştırma yöntemine göre daha hızlı ve hassastır [249].

Tek bir bacağın düzlemsel çalışma uzayı maksimum, minimum bacak uzunlukları ve mafsalları açısı kısıtları göz önüne alınarak incelenirse, minimum bacak uzunluğunu yarıçap olarak esas alan bir küçük yay parçası ve maksimum bacak uzunluğunu yarıçap olarak esas alan bir büyük yay parçası arasında kalan ve mafsalları açı değerine bağlı olarak oluşan alan Şekil 4.2 de görülen çalışma alanını oluşturur.

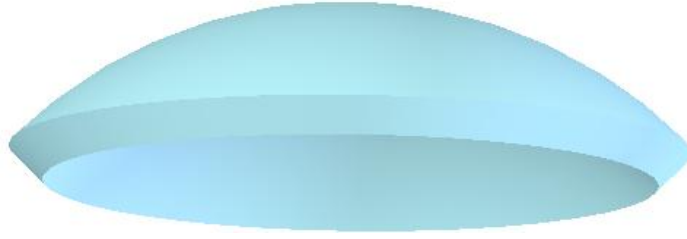


Şekil 4.2 : Kısıtlar dahilinde tek bacağın çalışma alanı.

Tek bir bacağın çalışma uzayı, maksimum, minimum bacak uzunlukları ve mafsal açısı kısıtları göz önüne alınarak incelenirse, minimum bacak uzunluğunu yarıçap olarak esas alan bir küçük küre ve maksimum bacak uzunluğunu yarıçap olarak esas alan bir büyük bir küre arasında kalan ve mafsal açısı değerine bağlı olarak oluşan koninin arasında kalan hacmidir. Şekil 4.3 de kısıtlar dahilinde tek bacağın çalışma uzayının kesit düzlemi ve şekil 4.4 de tek bacağın çalışma uzayının katı modeli gösterilmektedir.

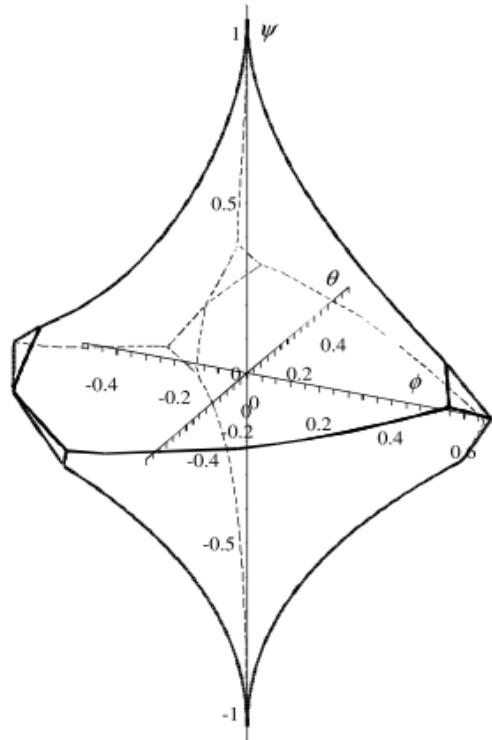


Şekil 4.3 : Kısıtlar dahilinde tek bacağın çalışma uzayının kesit düzlemi.



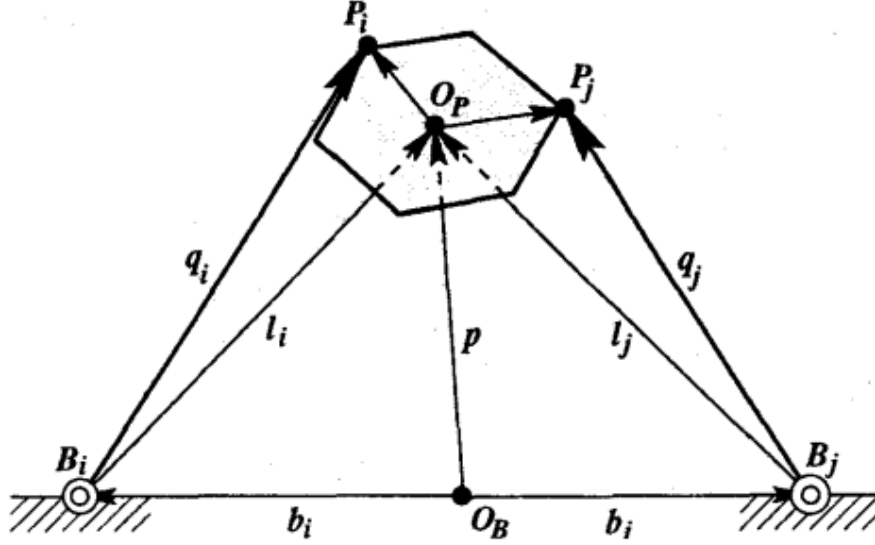
Şekil 4.4 : Tek bacağın kısıtlar dahilinde çalışma uzayının katı modeli.

Jiang ve Gosselin yaptıkları çalışmada, roll-pitch-yaw (Φ, θ, ψ) açılarını kullanarak önceden tanımlanmış bir konumdaki SPM'nin üç boyutlu maksimum tekilliksiz yönelim çalışma uzayını ve bu uzayı veren maksimum minimum bacak boyu aralıklarını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada altısı maksimum bacak uzunlukları ve altısı minimum bacak uzunlukları için olmak üzere toplam 12 yüzeyin var olduğunu ve bu yüzeylerin de Şekil 4.5 de gösterilen yönelim çalışma uzayı yüzeyleri olduklarını ifade etmişlerdir [242].



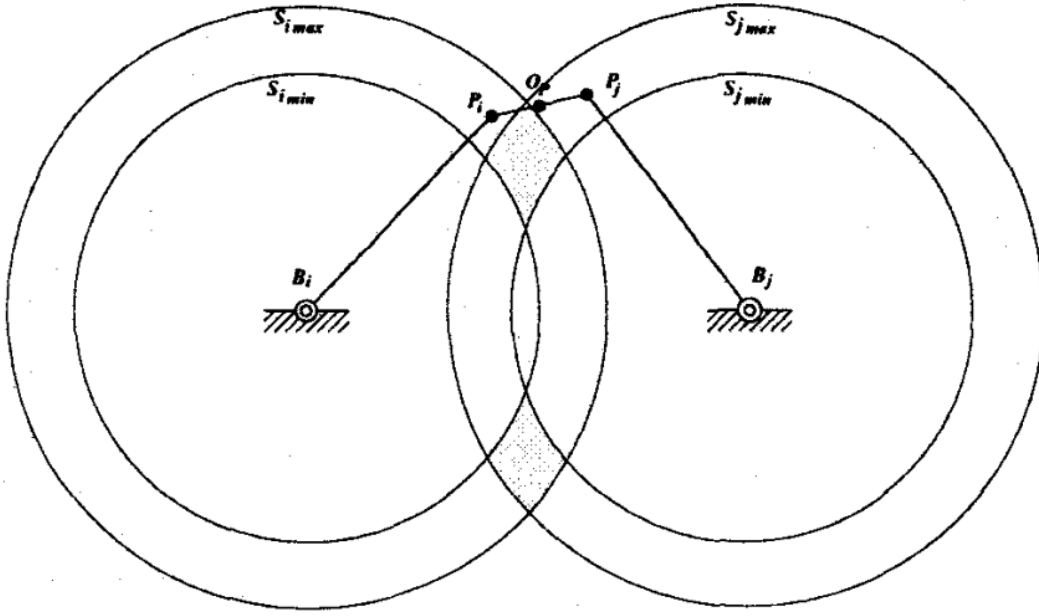
Şekil 4.5 : Yönelme çalışma uzayı [242].

Kim ve arkadaşları dört çubuklu mekanizma konseptini kullanarak tamamen geometrik bir yaklaşımla Şekil 4.6 da gösterilen mekanizmanın ulaşılabilen ve beceri (dexterous) çalışma uzayını belirlemişlerdir [256].



Şekil 4.6 : İki bacaklı geometrik yaklaşım [256].

Tamamen geometrik olarak önerdikleri yöntem kapsamında çalışma uzayını değerlendirmek için, her bir bacağı açık bir zincir olarak ve iki kinematik kısıtla (konum ve mekanizma) göz önüne almışlardır. Tamamen geometrik yöntemle platformların yarıçapları, her bir platformdaki mafsalların konumu ve bacak uzunlukları gibi paralel mekanizmanın geometrisini kastetmektedirler. Ulaşılabilen ve beceri çalışma uzaylarını ilk olarak, mafsal limiti ve bacak çarpışması gibi kinematik kısıtları gözardı ederek belirlemişlerdir. Ulaşılabilen çalışma uzayını, O_p referans noktasının bazı yönelimlerde ulaşabildiği bölge ve beceri çalışma uzayını, O_p referans noktasının tüm yönelimlerde ulaşabildiği bölge olarak tanımlamışlardır. Bacak vektörü q_i 'nin en büyük ve en küçük bacak uzunlukları gözönüne alınarak belirlenen bölge çalışma uzayı olup, söz konusu bölge her bir bacak için Şekil 4.7 de gösterilen S_{min} ve S_{max} küreleri tarafından belirlenirler. Şekil 4.7 de gölgelendirilmiş olarak gösterilen alan iki bacağın ortak ulaşabildiği bölgedir. Fakat gölgelendirilmiş alan çalışma uzayı değildir. O_p referans noktasının ulaşılabilirdiği bölge, ulaşılabilen çalışma uzayı durumunda söz konusu gölgelendirilmiş alandan daha büyük ve beceri çalışma uzayı durumunda daha küçük olacaktır. Yönelim bilgisine sahip olmaksızın çalışma uzayını belirlemek için q_i bacak vektörleri, l_i vektörüne dönüştürülmektedir.

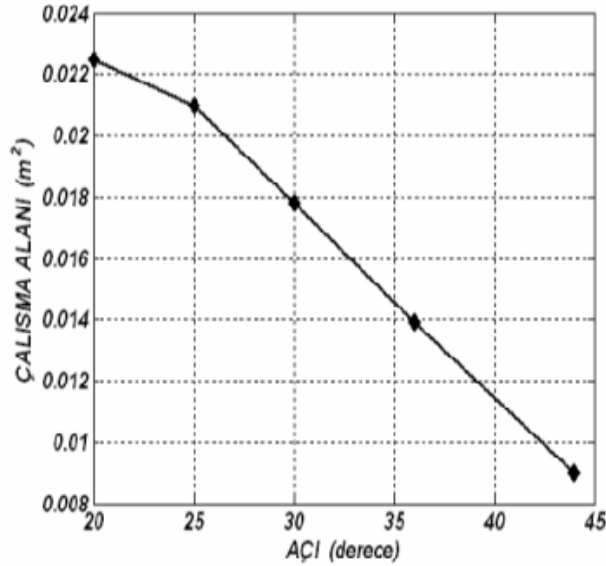


Şekil 4.7 : Düzlemde bacakların ulaşabildiği bölge [256].

Kim ve arkadaşları çalışmalarında ilk olarak, gözönüne alınan iki kısıttan konum kısıtı l_i vektörünün en büyük ve en küçük sınırlarını hesaplamışlardır. Söz konusu limit uzunlukları, mekanizmanın hasar görebileceği duruma göre modifiye etmişlerdir. İkinci olarak, konum kısıtından elde edilen bacak uzunluklarını modifiye eden mekanizma kısıtını göz önüne almış ve bacak ile sabit taban arasındaki açılar başta olmak üzere ilgili açıları hesaplamışlardır. Kim ve arkadaşları örneklerini düzlemde ele alarak, 6 DOF mekanizmanın ulaşılabilen ve beceri çalışma uzaylarını elde etmişlerdir [256].

5. TERS KİNEMATİK YÖNTEMLE SABİT YÖNELİMLİ ÇALIŞMA UZAYI ANALİZİ

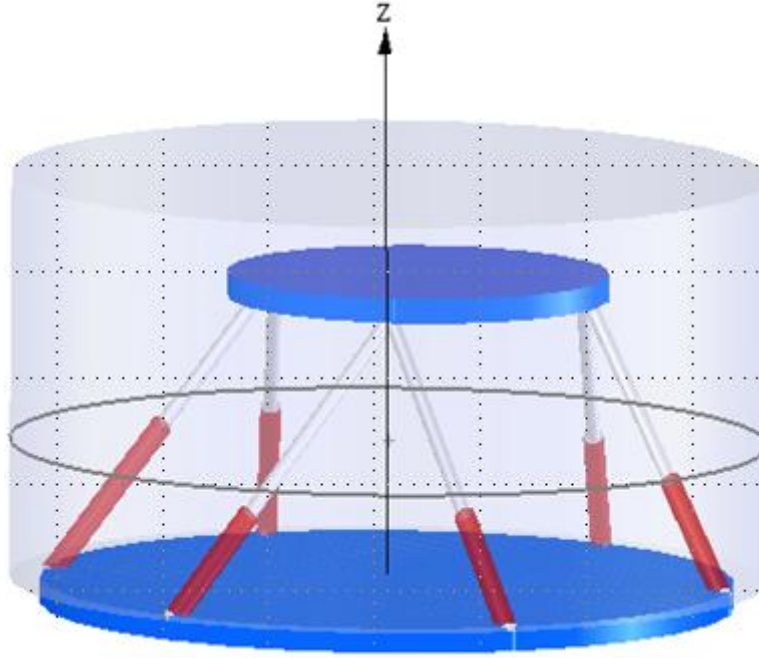
Ters kinematik analizde verilen bir konum ve yönelim için bacak boyu ve ilgili mafsal açıları hesaplanmakta olup, yöntem Bölüm 2.1.1 de ayrıntılı olarak konu ele alınmaktadır. Güneri ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, 6-6 SPM'nin mafsal konum açılarının çalışma uzayına etkisini incelemişlerdir [233]. Söz konusu çalışmada; sabit platformun mafsal konum açısı 15° de sabit tutularak, hareketli platformun mafsal konum açıları sırasıyla 20° , 25° , 30° , 36° ve 44° olarak alınarak mekanizmanın çalışma alanlarını hesaplamışlardır.



Şekil 5.1 : Farklı mafsal açıları için çalışma alanları [233].

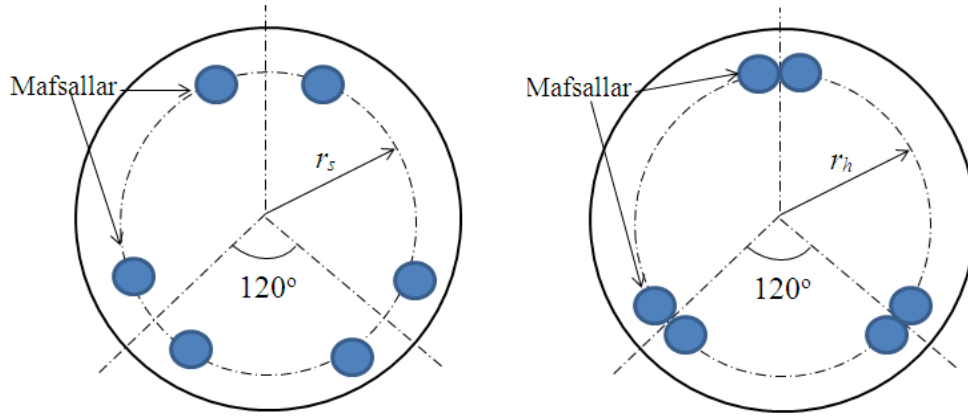
Bu kapsamda Güneri ve arkadaşları analiz sonuçlarını sundukları Şekil 5.1'deki grafik ile ilgili olarak; çalışma alanının, açılar birbirine yaklaştıkça sahip olduğu artışın, açılar arasındaki fark azaldıkça azaldığını ve en büyük çalışma alanına sahip tasarımda kuvvetlerin de en büyük olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuç olarak diğer değişkenler sabit tutulduğunda hareketli platformun mafsal konum açısının 25° değerinden daha küçük olmasının uygun olmadığı tesbitinde bulunmuşlardır [233].

Bu bölümde Güneri ve arkadaşlarının çalışması esas alınmakla birlikte, farklı olarak Şekil 5.2 de gösterilen 6-3 SPM'nin mafsallı konum çaplarının öteleme/sabit yönelim çalışma uzayına etkisi, ayırıklaştırma yöntemi ve ters kinematik teknik kullanılarak incelenmektedir. Ayırıklaştırma yönteminde ele alınmak üzere ilk olarak platformun hareketini gerçekleştireceği Şekil 5.2 de gösterilen silindirik bir görev uzayı tanımlanmaktadır.



Şekil 5.2 : 6-3 SPM ve araştırma uzayı.

Hareketli platformun söz konusu araştırma uzayı içinde sabit bir yönelimle ötelendiği durum ele alınmaktadır. Silindirik uzay dairesel dilimlere ayrılmakta ve bu dairesel dilimlerde kendi orijinlerine göre belirli mesafe ve açı değerlerine sahip noktaları içermektedir. Nokta sayısının çok fazla olması analiz süresini arttırmaktadır. Her bir nokta için ayrı ayrı bacak uzunlukları, mafsallı açıları hesaplanmakta ve sınırlar dahilinde olan noktalar çözüm kümesine ilave edilmekte ve Green teoremi kullanarak ilgili çalışma alanı hesaplanmaktadır. Bir dairesel dilim için bu işlemlerin tamamlanmasına müteakip, z eksenine boyunca, bir başka ifade ile silindirin yüksekliği boyunca z_{min} ve z_{max} arasında, belirli adımlarla bu işlemler tekrarlanmaktadır. Her bir dilimde elde edilen çalışma düzlemlerinin bir araya getirilmesi ile de SPM sabit yönelim/öteleme çalışma uzayı elde edilmektedir. Sabit ve hareketli platformların mafsallı yerleşimleri ve konum yarıçapları Şekil 5.3 de gösterilmektedir.



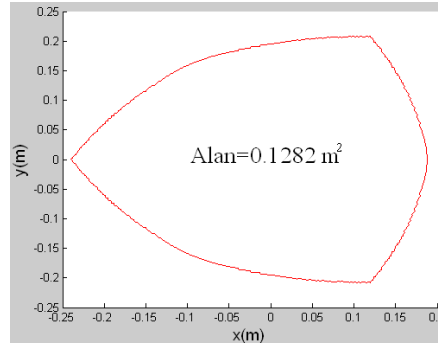
Şekil 5.3 : Sabit ve hareketli platformların mafsallı yerleşimi.

Konu ile ilgili uygulamada platformların birbirine paralel olduğu, herhangi bir yönelmenin olmadığı, sadece öteleme hareketinin olduğu durum ele alınmaktadır. Bacaklar hareketli platforma üç noktadan 35° sınır açı değerine sahip küresel mafsallarla, sabit platforma da altı noktadan 45° sınır açı değerine sahip universal mafsallarla bağlanmaktadır. Bacak uzunlukları minimum 0.219 m ve maksimum 0.270 m olan 6-3 SPM'nin sabit ve hareketli platformlara ait mafsallı konum yarıçapları sırasıyla r_s ve r_h olmak üzere, çalışma düzlem alanları Çizelge 5.1 de, hesaplamalara ilişkin grafiklerde Şekil 5.4-...- 5.9 da sunulmaktadır.

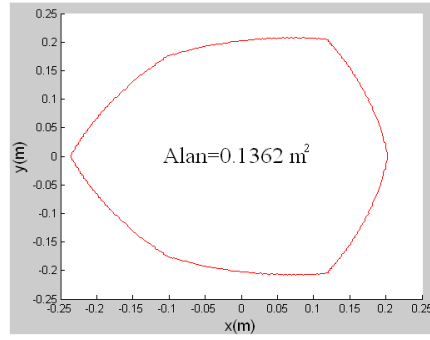
Çizelge 5.1: Mafsallı konum yarıçapları ve çalışma alan büyüklükleri.

S/N	r_s (m)	r_h (m)	Çalışma düzlem alanı (m ²)
1	0.149	0.10	0.1282
2	0.149	0.11	0.1362
3	0.149	0.12	0.1410
4	0.10	0.149	0.1184
5	0.11	0.149	0.1374
6	0.12	0.149	0.1550

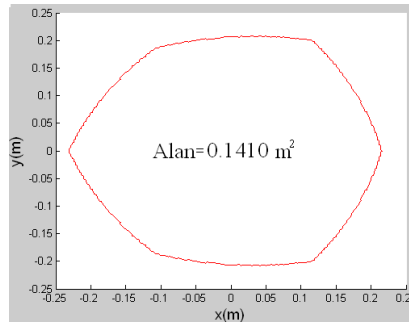
Çizelge 5.1 incelendiğinde, mafsal konum yarıçaplarındaki değişikliklerin mekanizmanın çalışma alan büyüklüğünü doğrudan etkilediği görülmektedir. Her iki platformun yarıçap değerleri birbirine yaklaştıkça çalışma alanı büyümektedir. Fakat mimari tekiliğin oluşmaması açısından yarıçaplar eşit alınmamalıdır. Hareketli platformun mafsal konum yarıçapındaki artış, sabit platformdaki yarıçaptaki artışa göre daha büyük çalışma alanlarına neden olmaktadır. Ayrıca hareketli platformun mafsal konum yarıçapının daha büyük seçilmesi, x eksenini doğrultusunda çalışma alanının yön değiştirmesine neden olmaktadır.



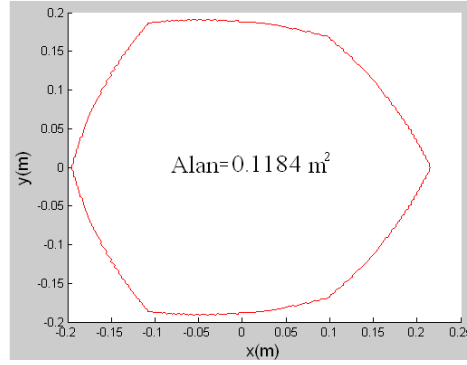
Şekil 5.4 : $r_s = 0.149$ m ve $r_h = 0.1$ m olduğu durumda çalışma alanı.



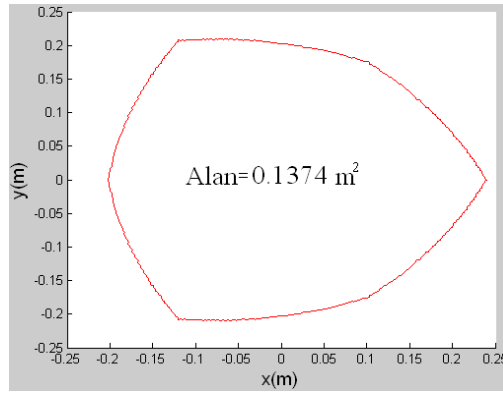
Şekil 5.5 : $r_s = 0.149$ m ve $r_h = 0.11$ m olduğu durumda çalışma alanı.



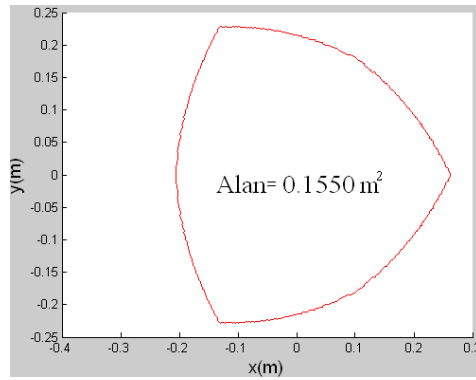
Şekil 5.6 : $r_s = 0.149$ m ve $r_h = 0.12$ m olduğu durumda çalışma alanı.



Şekil 5.7 : $r_s = 0.1$ m ve $r_h = 149$ m olduğu durumda çalışma alanı.

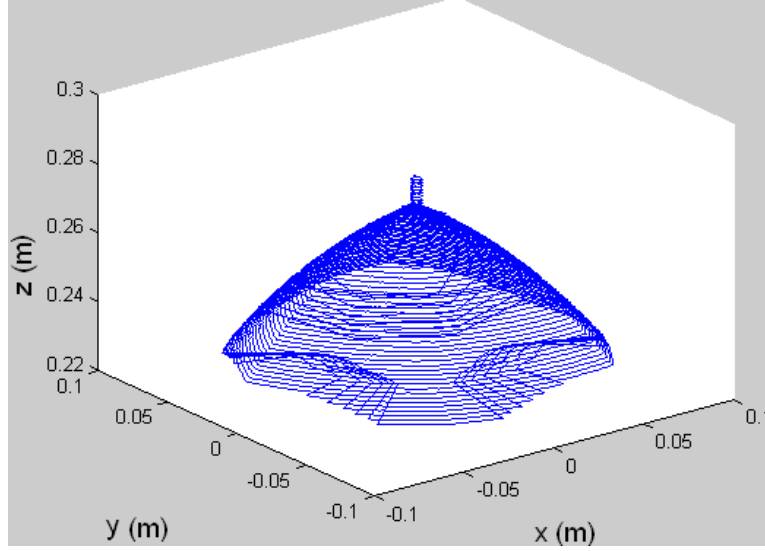


Şekil 5.8 : $r_s = 0.11$ m ve $r_h = 149$ m olduğu durumda çalışma alanı.



Şekil 5.9 : $r_s = 0.12$ m ve $r_h = 149$ m olduğu durumda çalışma alanı.

6-3 SPM na ait çalışma düzlemlerinin bir araya getirilmesi ile Şekil 5.10 da gösterilen üç boyutlu öteleme/sabit yönelim çalışma uzayı elde edilmiştir. Hareketli platform $z= 0.2121 \text{ m}-0.2641 \text{ m}$ değerleri arasında bir yüksekliğe ve $r =0.1 \text{ m}$ yarıçapa sahip silindir şeklinde bir araştırma uzayında hareket ettirilerek, mekanizmanın çalışma uzayı tespit edilmiştir.



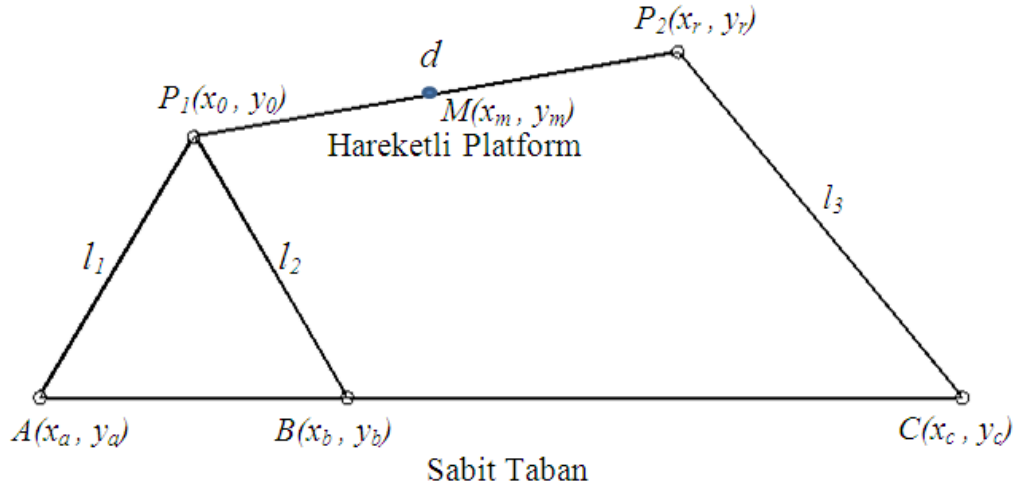
Şekil 5.10 : $z=0.2121 \text{ m}-0.2641 \text{ m}$ değerleri arasında çalışma uzayı.

6. GELİŞTİRİLEN GEOMETRİK YÖNTEM VE UYGULAMASI

Geliştirilen geometrik yöntemle uzaysal 6-3 SPM çalışma uzayının belirlenmesine geçilmeden önce, konunun daha iyi anlaşılabilmesi için düzlemsel SPM çalışma alanının belirlenmesinde önerilen yöntemin işlem basamaklarının açıklanması ve uygulanmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

6.1 Geliştirilen Geometrik Yöntemle Düzlemsel SPM Çalışma Alanının Belirlenmesi

Hareketli platformun sabit tabana üç bacak ve mafsallarla bağlandığı düzlemsel SPM şematik olarak Şekil 6.1 de gösterilmektedir.

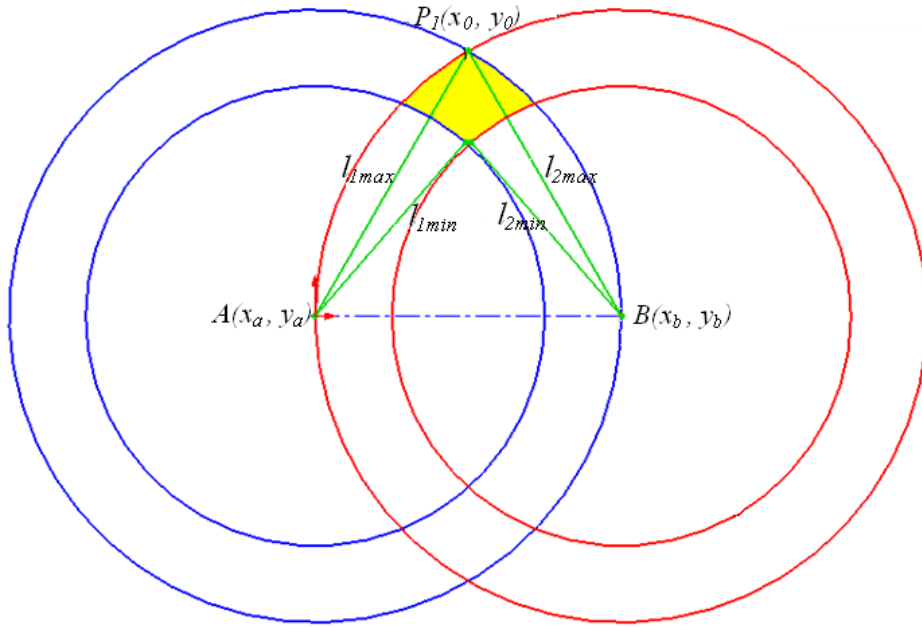


Şekil 6.1 : Düzlemsel SPM'nin şematik gösterimi.

Önerilen geometrik yöntem kapsamında Fortran dilinde geliştirilen kodla ilk olarak hareketli platformun P_1 köşesinin koordinatları daha sonra da buradan elde edilen bilgi kullanılarak P_2 köşesinin koordinatları belirlenmektedir. Her iki köşeye ait koordinatlar belirlendikten sonra hareketli platformun merkezinin ulaşabileceği noktalar kolayca tespit edilmektedir.

6.1.1 P_1 köşesinin konumunun belirlenmesi

Hareketli platformun P_1 köşesi sabit tabana A ve B noktalarından l_1 ve l_2 bacakları ile mafsallar yoluyla bağlanmaktadır. P_1 köşesinin tüm muhtemel konumları, l_1 ve l_2 bacak boylarının en küçük ve en büyük sınır değerleri arasında alabilecekleri tüm değerleri göz önüne alınarak tespit edilmekte olup, bu konumların bulunduğu alan şematik olarak Şekil 6.2 de gösterilmektedir.



Şekil 6.2 : P_1 köşesinin tüm muhtemel konumlarının şematik gösterimi.

6.1.2 P_2 köşesinin konumunun belirlenmesi

Hareketli platformun P_1 ve P_2 köşe noktalarını birleştiren doğrunun kenar uzunluğu d ve merkezi de $M(x_m, y_m)$ noktasıdır. Ayrıca P_2 köşe noktası sabit tabana l_3 bacağı ile bağlanmaktadır. P_1 köşesinin muhtemel tüm konumları bulunduktan sonra bu konumları merkez kabul eden d yarıçaplı çemberler çizilir. Söz konusu çemberin matematiksel ifadesi,

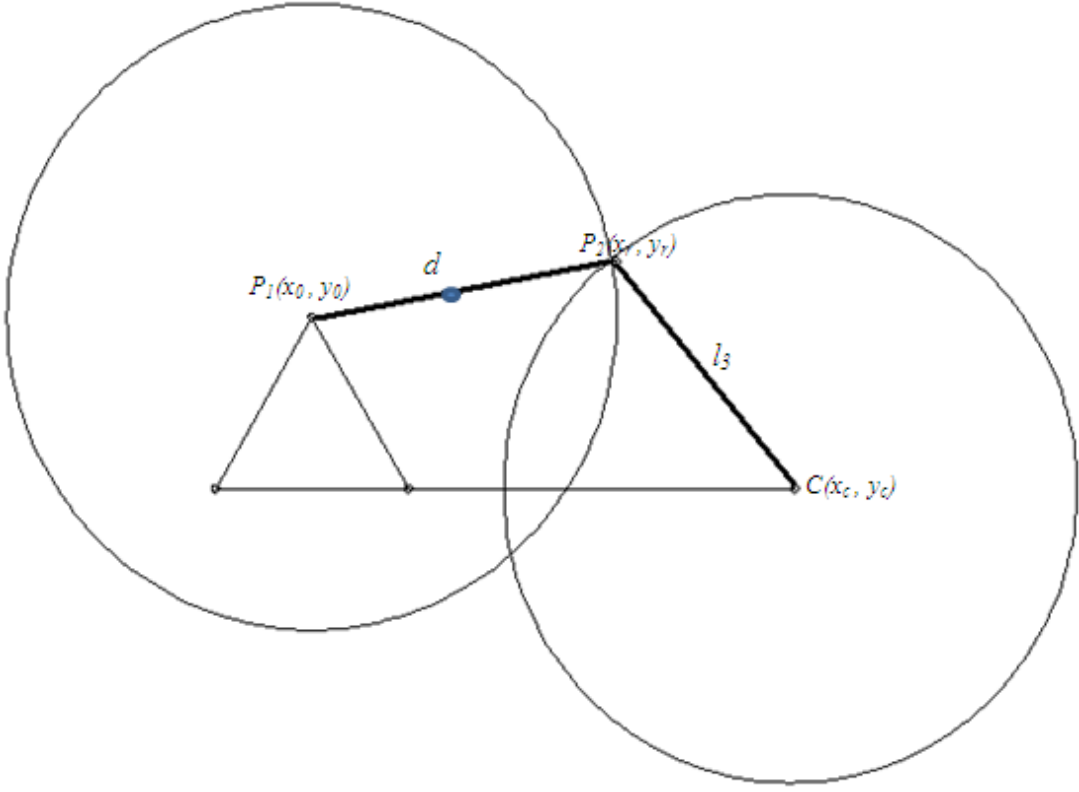
$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = d^2 \quad (6.1)$$

olup, $C(x_c, y_c)$ noktasını merkez kabul eden l_3 yarıçaplı çemberin matematiksel ifadesi,

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = l_3^2 \quad (6.2)$$

olarak yazılır. l_3 bacak uzunluğunun en küçük ve en büyük değerleri arasında değiştirilmesi ile oluşan ve Denklem 6.2 ile matematiksel olarak ifade edilen

çemberin Denklem 6.1 ile ifade edilen P_1 merkezli çembele Şekil 6.3 de gösterildiği gibi kesişiminin çözüm kümesi P_2 köşe noktasının koordinatlarını verir. Sabit platformun altında kalan koordinatlar çözüm kümesine dahil edilmemektedir.



Şekil 6.3 : Çemberlerin kesişim noktası olan P_2 köşesi.

Denklem 6.1 ve denklem 6.2 sırasıyla açık olarak yazılırsa,

$$x^2 - 2.x.x_0 + x_0^2 + y^2 - 2.y.y_0 + y_0^2 - d^2 = 0 \quad (6.3)$$

$$x^2 - 2.x.x_c + x_c^2 + y^2 - 2.y.y_c + y_c^2 - l_3^2 = 0 \quad (6.4)$$

Denklem 6.3 den Denklem 6.4 çıkarılırsa,

$$2.x.(x_c - x_0) + x_0^2 - x_c^2 + 2.y.(y_c - y_0) + y_0^2 - y_c^2 = d^2 - l_3^2 \quad (6.5)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemden,

$$x = \frac{1}{2.(x_c - x_0)} \cdot [d^2 - l_3^2 - x_0^2 + x_c^2 - y_0^2 + y_c^2 - 2.y.(y_c - y_0)] \quad (6.6)$$

$C_1 = 2.(x_c - x_0)$, $C_2 = d^2 - l_3^2 + x_c^2 - x_0^2 + y_c^2 - y_0^2$ ve $C_3 = 2.(y_0 - y_c)$ olarak yazılacak olursa Denklem 6.6,

$$x = \frac{1}{C_1} \cdot [C_2 + y.C_3] \quad (6.7)$$

olarak yazılabilir. $C_4 = \frac{C_2}{C_1}$ ve $C_5 = \frac{C_3}{C_1}$ olarak alınıp Denklem 6.7 tekrar

düzenlenirse,

$$x = C_4 + y.C_5 \quad (6.8)$$

elde edilir. Bu ifade Denklem 6.3 de yerine yazılırsa,

$$(C_4 + y.C_5)^2 - 2.(C_4 + y.C_5).x_0 + x_0^2 + y^2 - 2.y.y_0 + y_0^2 - d^2 = 0 \quad (6.9)$$

elde edilir. Denklem 6.9 tekrar düzenlendiğinde,

$$\underbrace{(C_5 + 1).y^2}_a + \underbrace{(2.C_4.C_5 - 2.y_0 - 2.C_5.x_0).y}_b + \dots \dots \underbrace{(C_4^2 - 2.x_0.C_4 + x_0^2 + y_0^2 - d^2)}_c = 0 \quad (6.10)$$

olarak yazılabilir.

Denklem 6.10 ikinci derece bir denklemdir. Köklerinin tespiti için $\Delta = b^2 - 4ac$ ifadesi hesaplanır. Bilindiği üzere $\Delta < 0$ olması durumunda reel kök yoktur. $\Delta = 0$ olması durumunda tek bir reel kök vardır. $\Delta > 0$ olması durumunda ise iki adet reel

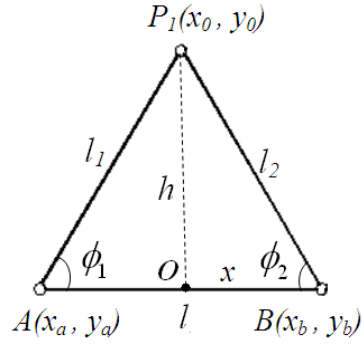
kök vardır. Son durumda kökler $y_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ formülü ile hesaplanır.

Hesaplanan $y_{1,2}$ değerleri Denklem 6.6 da yerine yazılarak $x_{1,2}$ değerleri tespit edilmektedir. $x_{1,2}$ ve $y_{1,2}$ değerlerinin hesaplanması ile P_2 köşesinin (x_r, y_r) koordinatları tespit edilmektedir. Hareketli platformun M orta noktasının (x_m, y_m) koordinatları ise,

$$x_m = \frac{x_0 + x_r}{2} \quad (6.11)$$

$$y_m = \frac{y_0 + y_r}{2} \quad (6.12)$$

P_1 ve P_2 köşe noktalarının koordinatlarından faydalanılarak hesaplanmaktadır. Ayrıca Şekil 6.4 de gösterilmekte olan l_1 ve l_2 bacaklarının sabit platformla yaptıkları açılar sırasıyla ϕ_1 ve ϕ_2 dir. A ile B noktaları arasındaki mesafe l ve O ile B noktaları arasındaki mesafe x olmak üzere,



Şekil 6.4 : Bacakların sabit platformla yaptıkları açılar ϕ_1 ve ϕ_2 .

$$l_1^2 = h^2 + (l - x)^2 \quad (6.13)$$

$$l_2^2 = h^2 + x^2 \quad (6.14)$$

x mesafesi Denklem 6.13 ve 6.14 den,

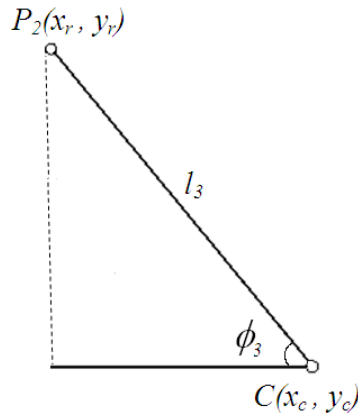
$$x = \frac{-l_1^2 + l_2^2 + l^2}{2.l} \quad (6.15)$$

olarak hesaplanmaktadır. ϕ_1 ve ϕ_2 açıları ise sırasıyla,

$$\phi_1 = a \tan\left(\frac{h}{l - x}\right) \quad (6.16)$$

$$\phi_2 = a \tan\left(\frac{h}{x}\right) \quad (6.17)$$

olarak hesaplanmaktadır. Şekil 6.5 de gösterilen l_3 bacağının sabit platformla yaptığı ϕ_3 açısı ise,



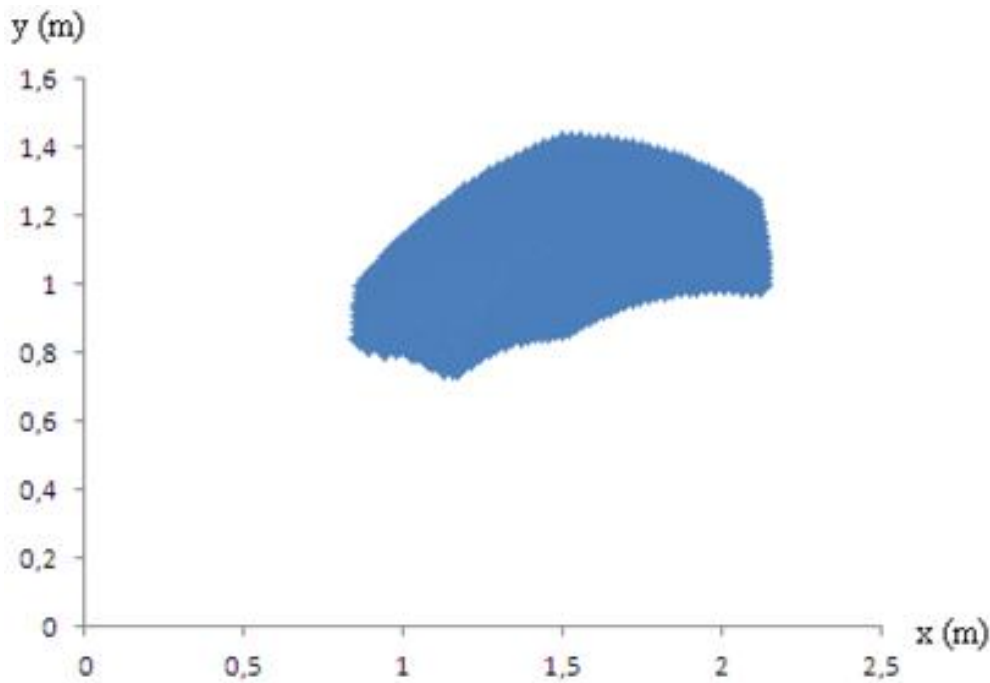
Şekil 6.5 : l_3 bacağının sabit platformla yaptığı ϕ_3 açısı.

$$\phi_3 = a \tan \left(\frac{y_r}{|x_c - x_r|} \right) \quad (6.18)$$

ifadesinden hesaplanmaktadır.

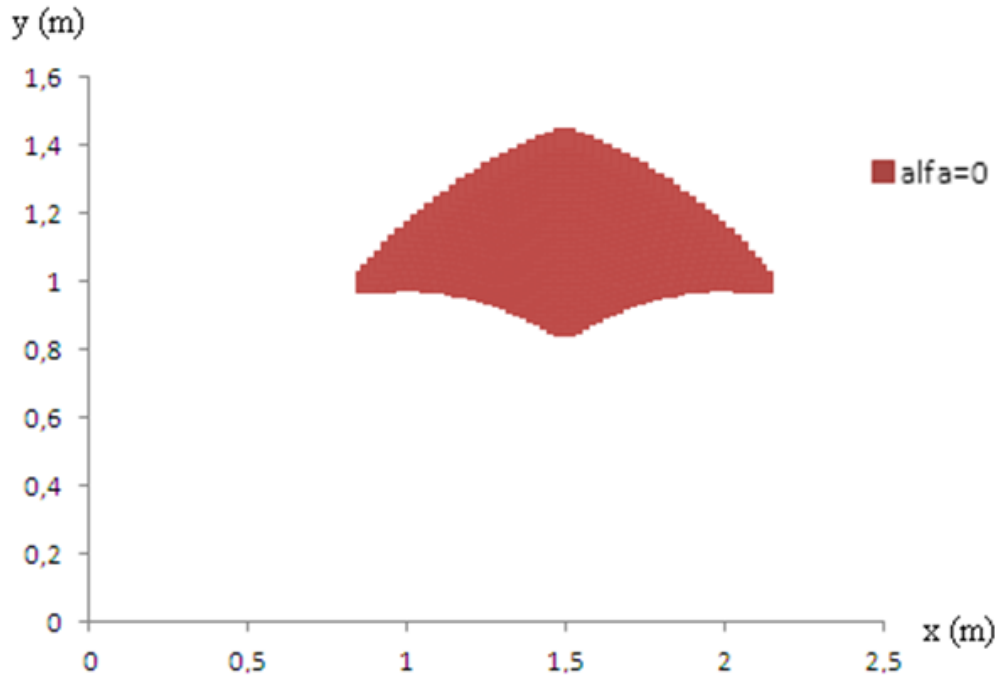
6.1.3 Geliştirilen geometrik yöntemin uygulaması ve mevcut yöntemle kıyaslanması

P_1 köşe noktasının muhtemel tüm koordinatlarından başlayarak, önceki kısımda bahsedilen hesaplamalar tekrarlanır. Bacak mafsalsal açı sınırı kriterini de sağlayan, hareketli platformun M geometrik merkezinin ulaştığı tüm noktalar ulaşılabilen çalışma alanına dahil edilir. Şekil 6.6 da gösterilen düzlemsel SPM çalışma alanı, tez kapsamında önerilen yeni yöntem ve bu doğrultuda geliştirilen EK A'da sunulan Fortran programı kullanılarak elde edilmiştir.



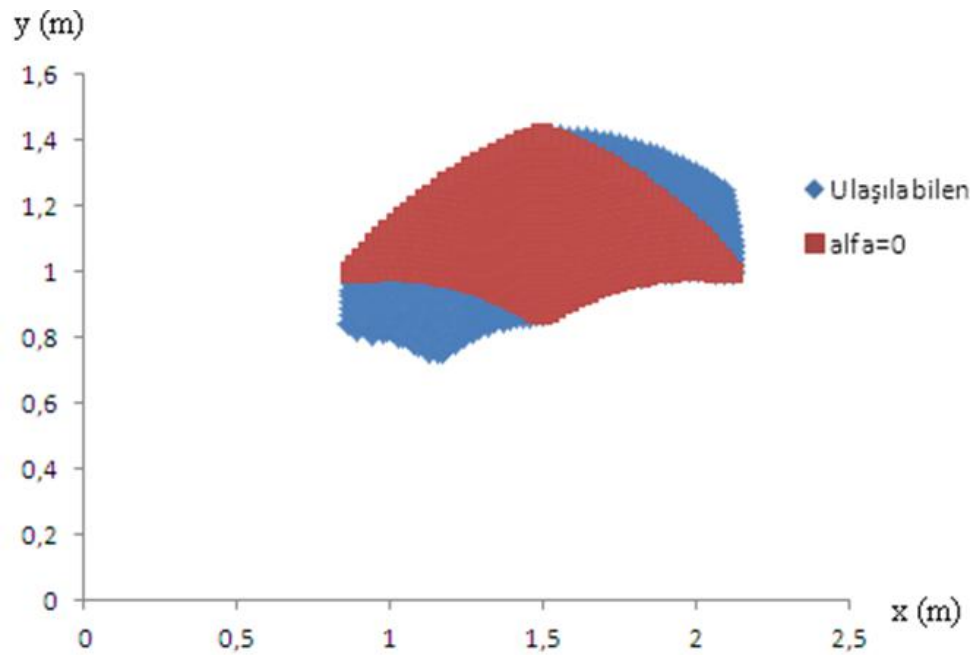
Şekil 6.6 : Geliştirilen geometrik yöntemle elde edilen çalışma alanı.

Aynı düzlemsel SPM'nin, mevcut ayırıklaştırma yöntemi ile elde edilen sabit yönelim/öteleme (hareketli platformun sabit platforma paralel durumda) çalışma alanı ise EK B' deki Fortran kodu kullanılarak elde edilmiş olup Şekil 6.7 de sunulmaktadır.



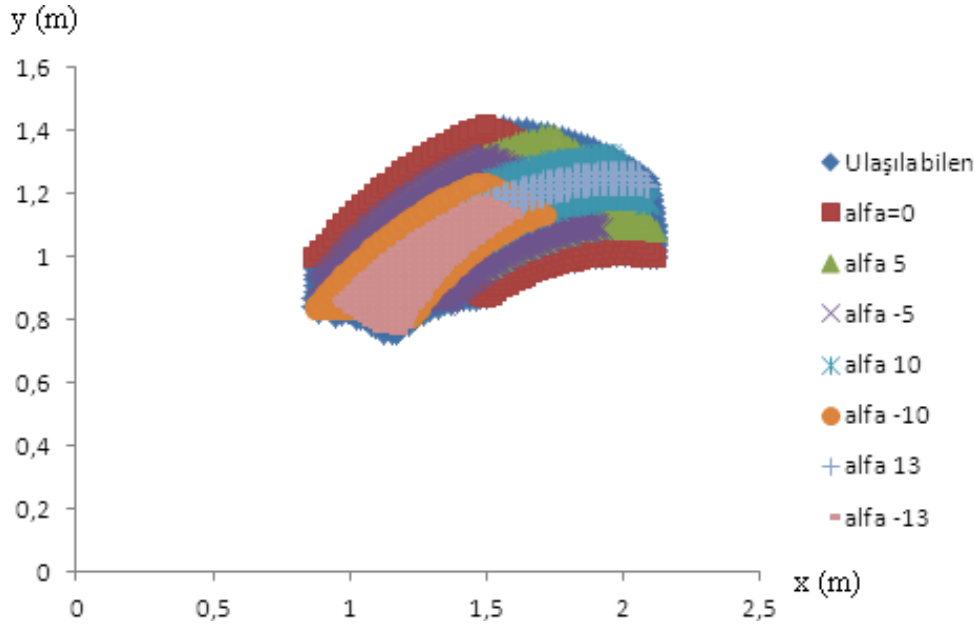
Şekil 6.7 : Ayrıklaştırma yöntemi ile elde edilen sabit yönelim çalışma alanı.

Geliştirilen geometrik yöntemle elde edilen çalışma alanı ve ayrıklaştırma yöntemi ile elde edilen sabit yönelim (paralel durumdaki) çalışma alanlarının karşılaştırması Şekil 6.8 de sunulmaktadır.



Şekil 6.8 : Düzlemsel SPM çalışma alanlarının kıyaslanması.

Şekil 6.9 da ise farklı yönelim değerlerindeki sabit yönelim çalışma alanlarının, geliştirilen geometrik yöntemle elde edilen çalışma alanı ile karşılaştırması sunulmaktadır.

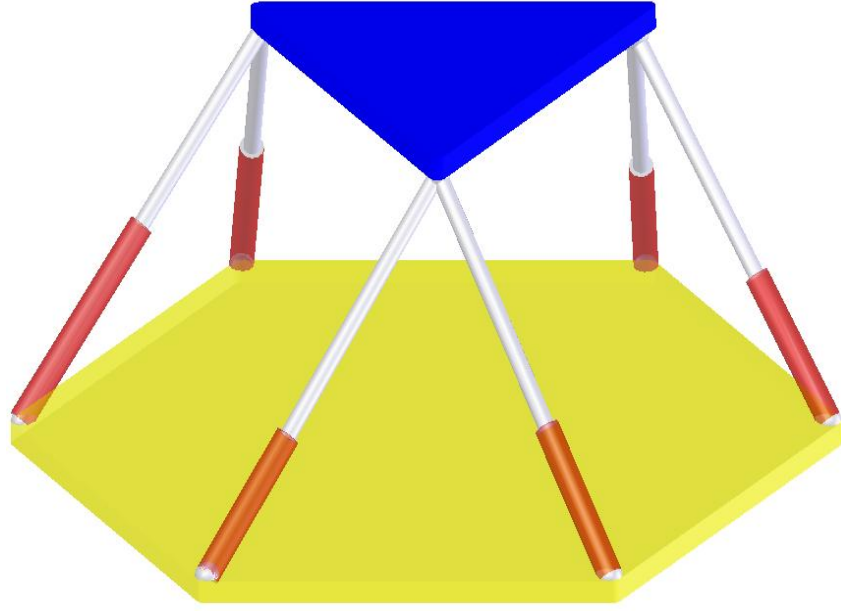


Şekil 6.9: Düzlemsel SPM çalışma alanlarının karşılaştırması.

Şekil 6.8 den de görüleceği üzere önerilen yöntemle elde edilen ulaşılabilen çalışma alanı düzlemsel SPM'nin ulaşabileceği tüm noktaları kapsamakta ve ayırıklaştırma yöntemi ile ters kinematik teknik kullanılarak elde edilen farklı sabit yönelim/öteleme çalışma alanlarını da kapsamaktadır.

6.2 Geliştirilen Geometrik Yöntemle 6-3 SPM Çalışma Uzayının Belirlenmesi

Alp ve Özkol tarafından ifade edildiği üzere 6-3 SPM, çalışma uzayı sınırlarına yakın noktalarda çalışabilme özelliği ile hassas işlem gerektiren alanlarda örneğin uçak simülatörü, tıbbi operasyonlar, yüksek hassasiyet gerektiren talaşlı imalat, frezeleme ve delme gibi uygulamalarda 6-4 SPM'na göre tercih edilmektedir [241]. Bu nedenle geliştirilen yöntemde 6-3 SPM ele alınmaktadır. Stewart Platform Mekanizmaları 6-3 SPM'nin Solidworks programı kullanılarak hazırlanan katı modeli Şekil 6.10 da gösterilmekte olup, hareketli platform rijit eş kenar üçgen ve sabit taban rijit düzgün altıgen şeklindedir.



Şekil 6.10 : 6-3 Stewart Platform Mekanizmasının katı modeli.

Geliştirilen yöntem üç ana aşamadan oluşmaktadır. Bu kapsamda MATLAB programında yazılan kodlar, ekte sunulmuştur. Aşamaların herbirinde hareketli platformun köşe noktalarından birinin konumu belirlenmektedir.

Özet olarak birinci aşamada; ilk iki bacağın uzunlukları sırasıyla , en küçük ve en büyük bacak uzunluk değerleri göz önüne alınarak, değiştirilmekte ve hareketli platformun ilk köşe noktasının koordinatları elde edilmektedir.

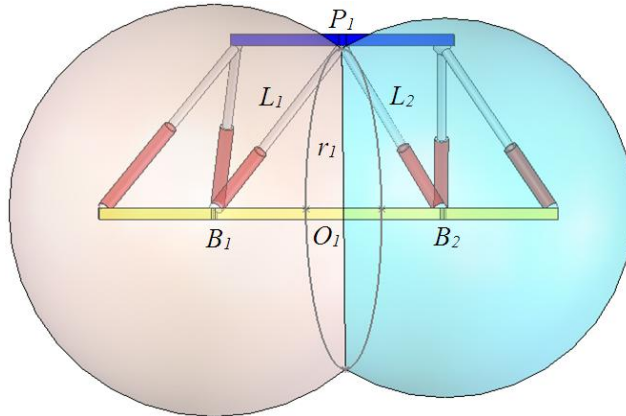
İkinci aşamada; ilk iki köşe noktası arasındaki geometrik ilişkiden faydalanılmaktadır. Bu aşama alt kısımlardan oluşmaktadır. Hareketli platformun ikinci köşe noktası, üçüncü ve dördüncü bacakların hareketli platformda birleştiği nokta olup, ilk köşe noktasını merkez ve hareketli platformun kenar uzunluğunu yarıçap kabul eden küre üzerindedir. Söz konusu köşe, ilgili bacakları sabit tabanda birleştiren kenar üzerinde merkezi bulunan ve bu merkezden geçen, sabit taban düzlemine dik olarak özel tanımlanan düzlemdeki çember üzerinde de bulunmaktadır. İkinci köşe noktasının koordinatlarını belirlemek için küre ile çemberin kesişim noktaları araştırılır. Bu amaçla sabit düzlem üzerindeki kürenin izdüşümü olan çember ve çemberin izdüşümü olan doğrunun kesişme durumu incelenir. Ayrıca kürenin özel tanımlanan düzlem üzerindeki izdüşümü çemberi ile

bu düzlem üzerinde bulunan diğer çemberin kesişim durumu da incelenir. Her iki kesişimin de mevcut olması halinde çözüm kümesinden ikinci köşe noktasının koordinatları elde edilir. İlk iki köşe noktasının koordinatlarının tespiti kısmen düz kinematik yöntem kullanılarak yapılmaktadır.

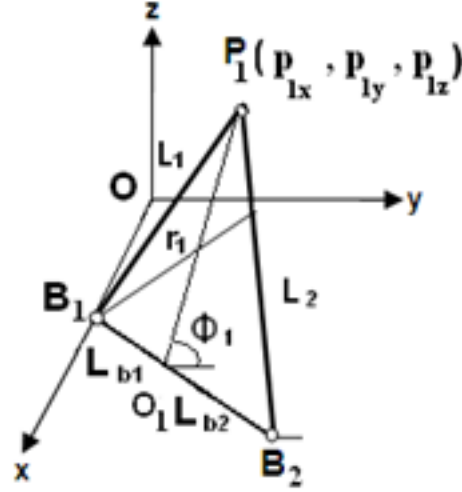
Üçüncü aşamada, üçüncü köşe noktasının tespitinde ters kinematik yöntemden faydalanılmaktadır. İlk iki köşe noktası sabitlenmiş kabul edilirse ve üçüncü köşe noktasının ilgili bacaklarının uzunlukları sırasıyla, en küçük ve en büyük bacak uzunluk değerleri göz önüne alınarak değiştirilirse, söz konusu köşe bir çember üzerinde olacaktır. Çember üzerinde belirli aralıklarla noktalar alınır ve bu noktalarla ters kinematik analiz gerçekleştirilir. Bacak boyu ve mafsal açısı kısıtlarını sağlayan noktalar, söz konusu köşenin koordinatlarının çözüm kümesine dahil edilir. Üç köşe noktasının koordinatları belirlendikten sonra dönüşüm matrisinden de yararlanılarak, hareketli platformun geometrik merkezi tespit edilir. Üç köşe noktasının muhtemel tüm konumları için ilgili işlemler tekrarlanılarak, 6-3 SPM'nin kısıtlar dahilindeki tüm konfigürasyonları için ulaşılan çalışma uzayı belirlenir ve çizdirilir. Geliştirilen geometrik yöntemin ayrıntılar aşağıdaki kısımlarda sunulmaktadır:

6.2.1 P_1 köşesinin konumunun belirlenmesi

$B_1P_1B_2$ üçgeninde P_1 köşesi çalışma kapsamında ele alınan uzaysal harekette hem B_1 merkezli L_1 yarıçaplı küre üzerinde hem de B_2 merkezli L_2 yarıçaplı küre üzerindedir. P_1 köşesi, iki kürenin kesişim ara kesiti olan bir çember üzerindedir. Şekil 6.11 ve 6.12 de gösterilen söz konusu çemberin yarıçap uzunluğu r_1 ve merkezi O_1 noktasındadır.



Şekil 6.11 : Kürelerin kesişimi ile oluşan r_1 yarıçaplı çember.



Şekil 6.12 : P_1 köşesinin konumu.

Şekil 6.12 de gösterilen P_1 köşesinin (p_{1x}, p_{1y}, p_{1z}) koordinatları ilgili kısıtlar göz önüne alınarak L_1, L_2 bacak boyu ve Φ_1 mafsal açısı değiştirilerek belirlenir. L_b ve r_j sırasıyla, B_i ve O_j ile P_j ve O_j noktaları arasındaki mesafelerdir.

P_1 köşesinin koordinatlarının belirlenmesi için L_{b1}, L_{b2} ve r_1 uzunluklarının bilinmesi gerekir. Bu uzunluklar aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır:

$$L_{b1} = \frac{L^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L} \quad (6.19)$$

$$L_{b2} = L - L_{b1} \quad (6.20)$$

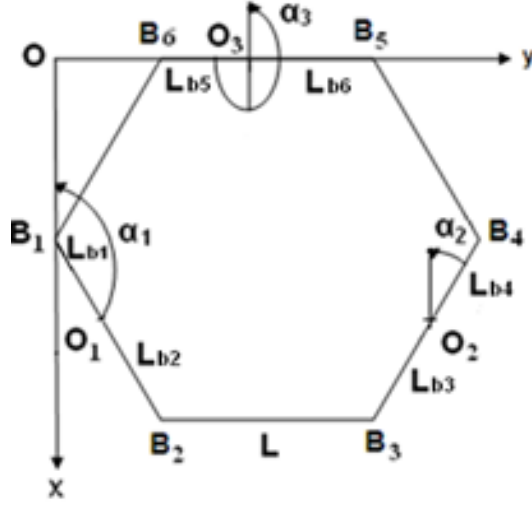
$$r_1 = \sqrt{L_1^2 - L_{b1}^2} \quad (6.21)$$

O_1 'in (x_{01}, y_{01}) koordinatları aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır:

$$x_{01} = x_{b1} + L_{b1} \cos(\pi - \alpha_1) \quad (6.22)$$

$$y_{01} = y_{b1} + L_{b1} \sin(\pi - \alpha_1) \quad (6.23)$$

B_1 'in (x_{b1}, y_{b1}) koordinatları ve x eksenine ile O_1 arasındaki α_1 açısı Şekil 6.13 de gösterilmektedir.



Şekil 6.13 : Sabit tabanın üstten şematik görünümü.

P_1 köşesinin (p_{1x}, p_{1y}, p_{1z}) koordinatları aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır:

$$p_{1x} = x_{o1} - r_1 \cos \phi_1 \sin(\pi - \alpha_1) \quad (6.24)$$

$$p_{1y} = y_{o1} + r_1 \cos \phi_1 \cos(\pi - \alpha_1) \quad (6.25)$$

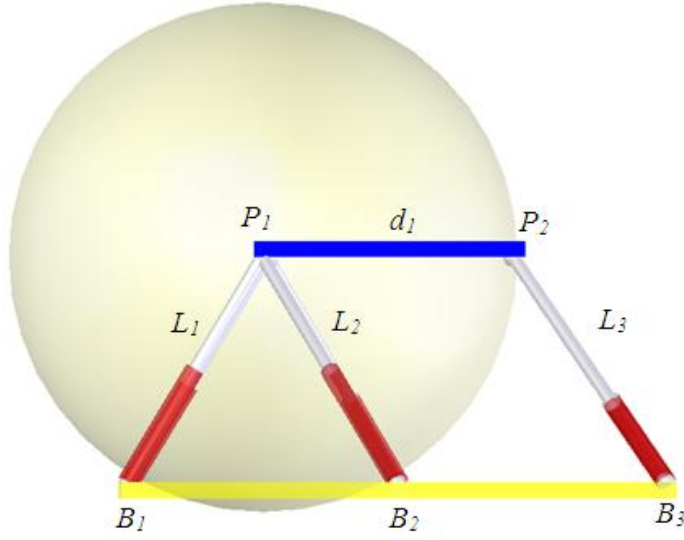
$$p_{1z} = r_1 \sin \phi_1 \quad (6.26)$$

Φ_1 açısı $B_1P_1B_2$ üçgen düzlemi ile x-y düzlemi arasındaki açı olup, hesaplamalarda mafsalları limitleri göz önüne alınmaktadır.

L_1 , L_2 ve Φ_1 uzunluk ve açı değerleri ilgili kısıtlara göre ayrı ayrı değiştirilerek P_1 köşesinin tüm ulaşılabilen konumları bulunur.

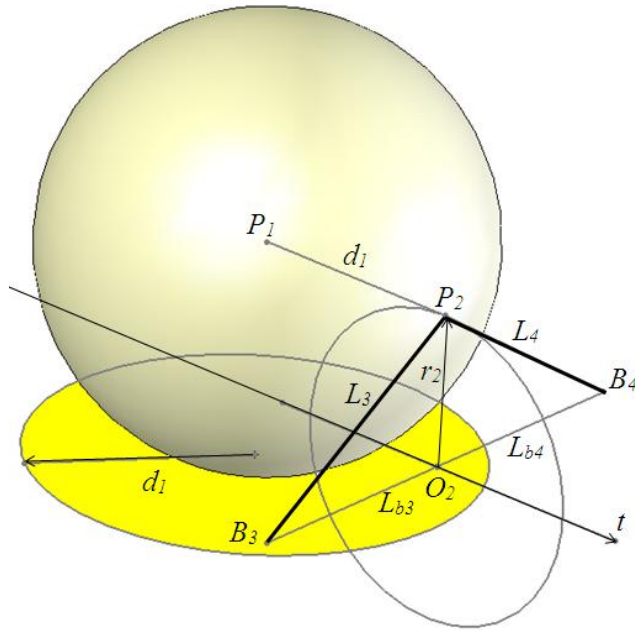
6.2.2 P_2 köşesinin konumunun belirlenmesi

Bu aşamada L_3 ve L_4 bacak uzunlukları, ilgili kısıtlara göre ayrı ayrı değiştirilmektedir. P_2 köşesinin koordinatları (p_{2x}, p_{2y}, p_{2z}) , L_3 ve L_4 bacak uzunlukları ile ilk aşamada bulunan P_1 köşesinin (p_{1x}, p_{1y}, p_{1z}) koordinatları kullanılarak hesaplanır. Bu hesaplamada P_1 and P_2 köşeleri arasındaki geometrik ilişkiden faydalanılır. P_2 köşesi Şekil 6.14 de gösterilmekte olan P_1 merkezli d_1 yarıçaplı küre bulunmaktadır.



Şekil 6.14 : P_1 merkezli d_1 yarıçaplı küre.

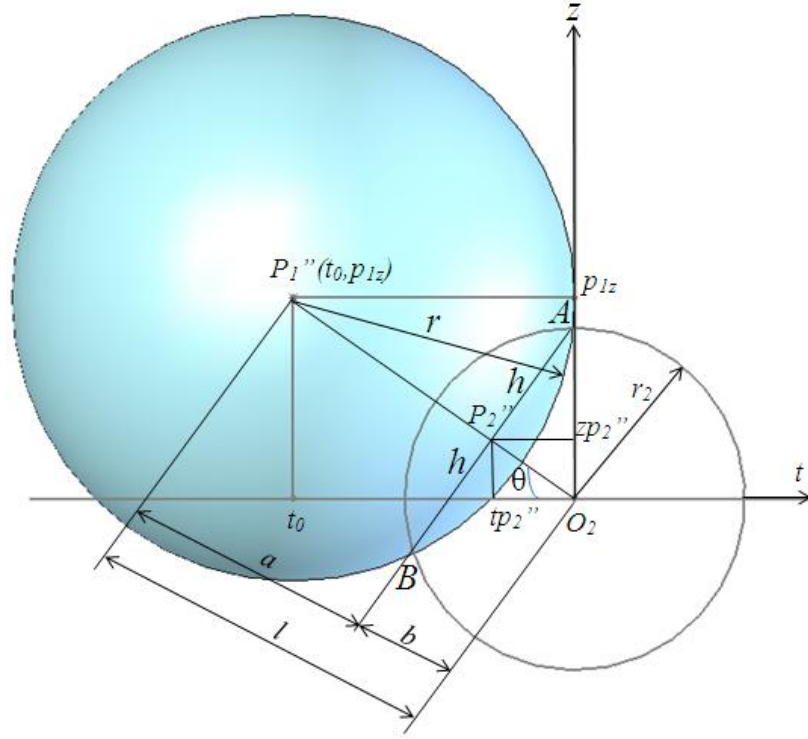
Şekil 6.15 de gösterildiği üzere x - y düzlemi üzerinde B_3B_4 kenarına dik ve O_2 merkezinden geçen bir t eksen tanımlayalım. P_1 köşesini sabit tutup L_3 ve L_4 bacak uzunluklarını sırasıyla değiştirelim. Bu işlemler sırasında P_2 köşesi t - z düzleminde bulunan r_2 yarıçaplı ve O_2 merkezli çember üzerinde hareket eder. P_2 köşesinin (p_{2x}, p_{2y}, p_{2z}) koordinatlarının belirlenmesi için P_1 merkezli küre ile O_2 çemberin kesişip kesişmediğinin tespiti gereklidir.



Şekil 6.15 : O_2 merkezli r_2 yarıçaplı çember.

P_2 'i belirlemek için ilave olarak Şekil 6.17 de gösterilen t - z düzlemi üzerindeki r ve r_2 yarıçaplı çemberlerin kesişiminin de gerçekleşmesi gereklidir. Bu kesişim aşağıdaki matematiksel ifadenin sağlanması durumunda gerçekleşir:

$$|r - r_2| \leq l \leq r + r_2 \quad (6.30)$$



Şekil 6.17 : t - z düzlemindeki izdüşümler.

O_2 merkezli çemberin r_2 yarıçap değeri:

$$r_2 = \sqrt{L_3^2 - L_{b3}^2} \quad (6.31)$$

Şekil 6.12 den de görüleceği üzere L_{b3} kenar uzunluğu B_3 ve O_2 noktaları arasında tanımlanmak üzere:

$$L_{b3} = \frac{L^2 + L_3^2 - L_4^2}{2L} \quad (6.32)$$

θ açısı $P_1''O_2$ kenarı ve t eksenini arasında tanımlanmakta olup, t_0 uzunluğu:

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (6.33)$$

olmak üzere θ açısının değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$\theta = a \tan \left(\left| \frac{p_{1z}}{t_0} \right| \right) \quad (6.34)$$

Şekil 6.17 de gösterilen l, a, b ve h mesafeleri aşağıdaki eşitlerden hesaplanır:

$$l = \sqrt{t_0^2 + P_{1z}^2} \quad (6.35)$$

$$a = \frac{r^2 + l^2 - r_2^2}{2l} \quad (6.36)$$

$$b = l - a \quad (6.37)$$

$$h = \sqrt{r^2 - a^2} \quad (6.38)$$

$P_2 (p_{2x}, p_{2y}, p_{2z})$ köşe noktasının t - z düzlemindeki izdüşümü olan nokta $P_2''(tp_2'', zp_2'')$ olup, tp_2'' ve zp_2'' koordinatları veren eşitlikler:

$$tp_2'' = b \cos(\theta) \quad (6.39)$$

$$zp_2'' = b \sin(\theta) \quad (6.40)$$

t - z düzleminde tanımlanan A ve B noktalarının koordinatları:

$$t_A = tp_2'' + h \cdot \sin(\theta) \quad (6.41)$$

$$z_A = tp_2'' + h \cdot \cos(\theta) \quad (6.42)$$

$$t_B = tp_2'' - h \cdot \sin(\theta) \quad (6.43)$$

$$z_B = tp_2'' - h \cdot \cos(\theta) \quad (6.44)$$

B_3 noktasının koordinatları (x_{b3}, y_{b3}) olmak üzere, O_2 merkezinin (x_{02}, y_{02}) koordinatları:

$$x_{02} = x_{b3} + L_{b3} \cos(\pi - \alpha_2) \quad (6.45)$$

$$y_{02} = y_{b3} + L_{b3} \sin(\pi - \alpha_2) \quad (6.46)$$

P_3 köşesinin üzerinde hareket ettiği söz konusu çember üzerindeki her bir noktaya ait veriler ters kinematik yöntemde kullanılarak, L_5 ve L_6 bacak uzunlukları ve mafsal açılıları hesaplanır. İlgili bacak uzunluk ve mafsal açısı kısıtlarını sağlayan noktalar çözüm kümesine dahil edilir. Bu işlemleri yapabilmek için önce $O'(x' y' z')$ eksen takımı tanımlanır. Söz konusu eksen takımının orijini r_0 yarıçaplı O' çemberin merkezinde olup, ayrıca y' eksenini P_1P_2 kenarı boyunca ve x' eksenini x - y düzlemine paralel olarak tanımlanmaktadır.

P_3 köşesi, φ (radyan) açısına karşılık gelen söz konusu çemberin yay segmentleri boyunca hareket ettirilir. Her bir yay parçası için eş kenar üçgenin yüksekliği r_0 , hareketli platformun d_1 kenar uzunluğu kullanılarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$r_0 = d_1 \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (6.51)$$

P_3 köşe noktası Şekil 6.18 de gösterilen y' eksenini etrafında döndürülür ve $O'(x' y' z')$ eksen takımına göre r_0 yarıçaplı çember denklemi aşağıdaki şekilde yazılır:

$$(x')^2 + (z')^2 = r_0^2 \quad (6.52)$$

$$x' = r_0 \cos \varphi \quad (6.53)$$

$$z' = r_0 \sin \varphi \quad (6.54)$$

$O'(x' y' z')$ eksen takımının orijinin koordinatları takibeden denklemlerden hesaplanır:

$$x'_0 = \frac{(p_{1x} + p_{2x})}{2} \quad (6.55)$$

$$y'_0 = \frac{(p_{1y} + p_{2y})}{2} \quad (6.56)$$

$$z'_0 = \frac{(p_{1z} + p_{2z})}{2} \quad (6.57)$$

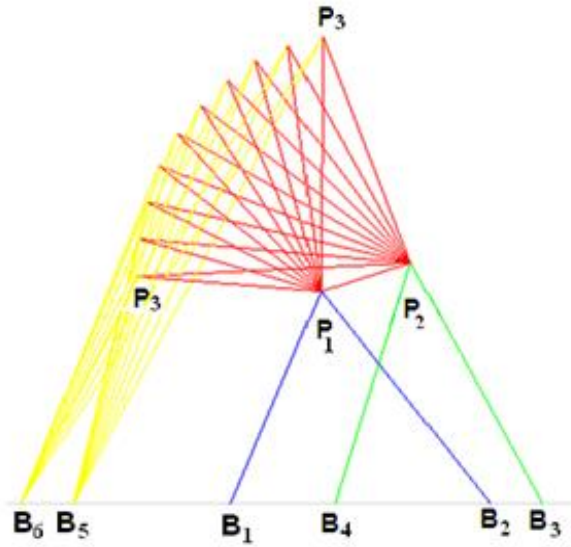
Hareketli platformun geometrik merkezinin $C(a_0, b_0, c_0)$ koordinatları ise, önceki hesaplamalarda elde edilen değerler kullanılarak aşağıdaki eşitliklerden tespit edilir:

$$x_0 = \frac{2x'_0 + p_{3x}}{3} \quad (6.58)$$

$$y_0 = \frac{2y'_0 + p_{3y}}{3} \quad (6.59)$$

$$z_0 = \frac{2z'_0 + p_{3z}}{3} \quad (6.60)$$

Şekil 6.19 da gösterilen sabit tabanının B_5 ve B_6 köşe noktaları sırasıyla L_5 ve L_6 bacaklarının bağlantı noktalarıdır. Bu noktaların koordinatları rotasyon matrisi kullanılarak $O'(x' y' z')$ eksen takımına dönüştürülür.



Şekil 6.19 : P_3 köşesinin çember üzerinde ulaştığı noktalar.

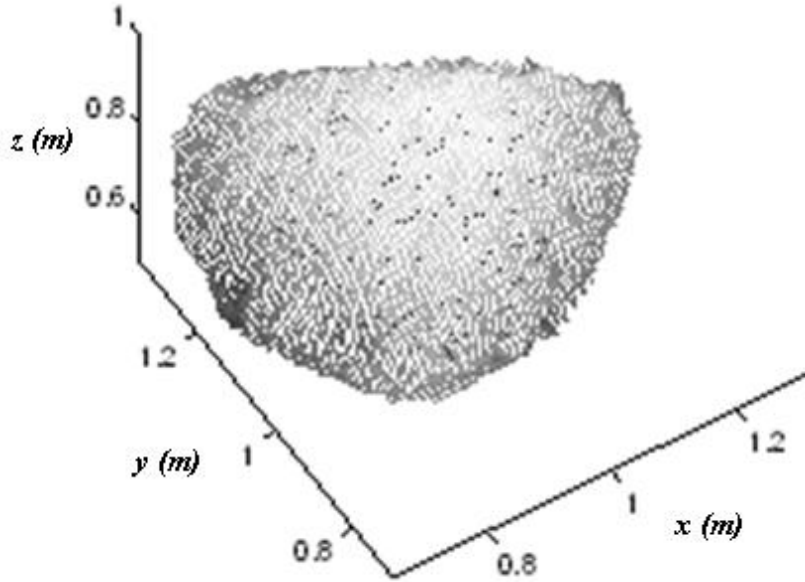
Ters kinematik yöntemle $\Delta\theta$ aralıklıklara ayrılmış olan çember üzerindeki P_3 köşe noktalarından ilgili kısıtları sağlayanlar $P_3(a_3, b_3, c_3)$ koordinatı olarak çözüm kümesine dahil edilirler.

Üç köşe noktasının koordinatları da belirlendikten sonra hareketli platformun geometrik merkezinin bulunduğu nokta hesaplanmaktadır. P_1 köşe noktasının ulaşabildiği tüm noktalar sırasıyla ele alınarak tüm söz konusu işlemler tekrarlanmaktadır. Yeni P_2, P_3 köşe noktaları ve hareketli platformun geometrik

merkezinin ulaşabileceği noktalar ve dolayısıyla uzaysal 6-3 SPM ulaşılabilen çalışma uzayı elde edilmektedir.

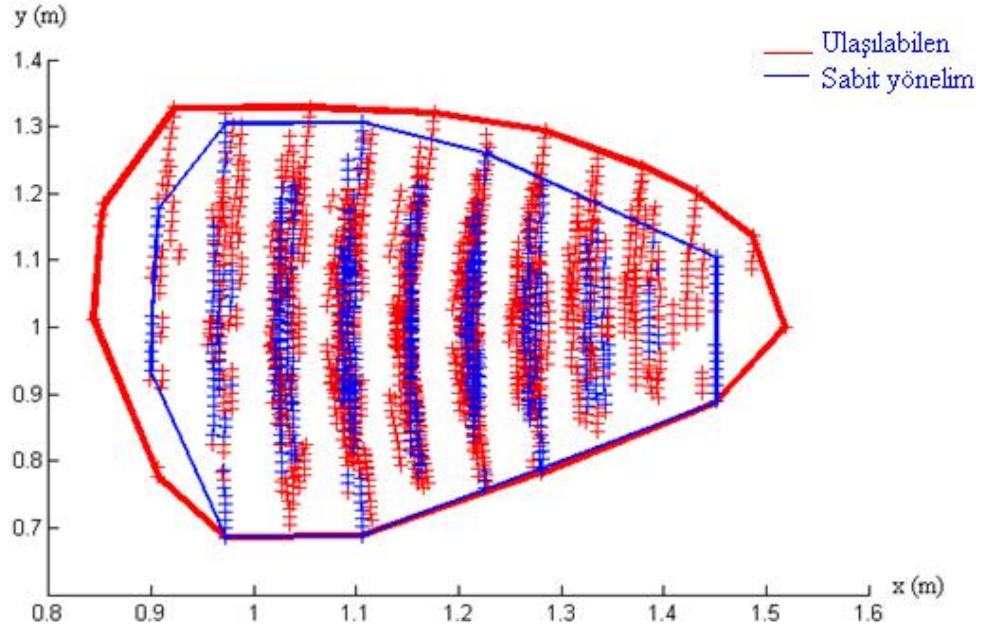
6.2.4 Geliştirilen geometrik yöntemin uygulaması ve mevcut yöntemle kıyaslanması

Ele alınan SPM' na ait geometrik parametreler: $L=1$ m, $d_i=1$ m, $L_{min}=0.8$ m, $L_{max}=1.2$ m dir. Bacaklar sabit platforma universal mafsallarla, hareketli platforma da küresel mafsallarla bağlanmakta olup, mafsal açı sınır değerleri ise -45° ve 45° olarak ele alınmaktadır. Hareketli platform eşkenar üçgen, sabit taban düzgün altıgen şeklinde olup, değişik yükler ve sıcaklıklar altında mekanizmanın söz konusu elemanlarının boyutlarının sabit kaldığı ve rijit oldukları kabul edilmektedir. Geliştirilen algoritma için MATLAB programında EK C' de sunulan kod yazılmıştır. Uygulanma sonucunda tüm bacak konfigürasyonları için elde edilen, ulaşılabilen çalışma uzayının perspektif görünümü Şekil 6.20 de sunulmaktadır.

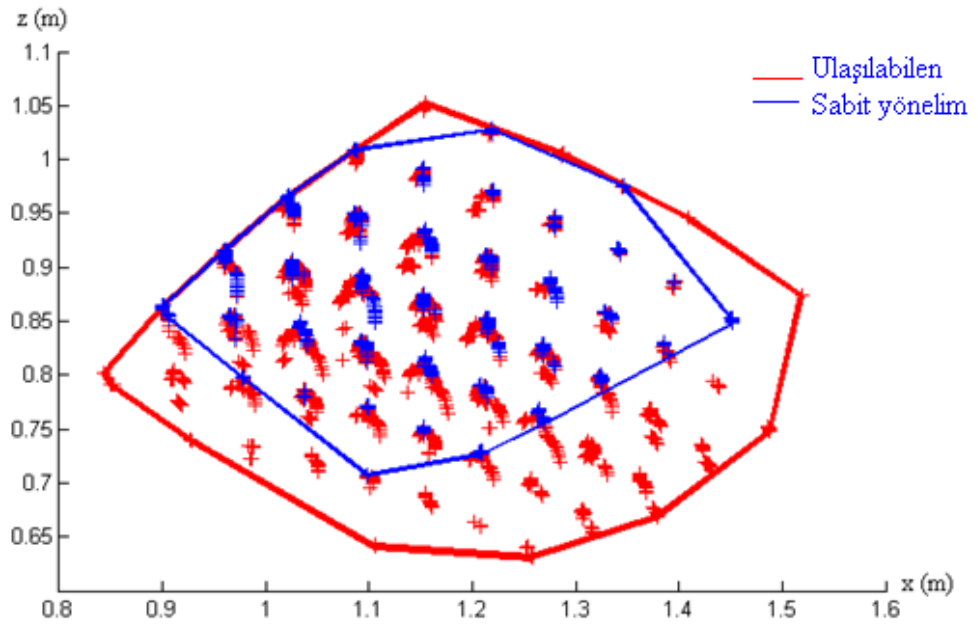


Şekil 6.20 : 6-3 SPM'nin ulaşılabilen çalışma uzayının perspektif görünümü.

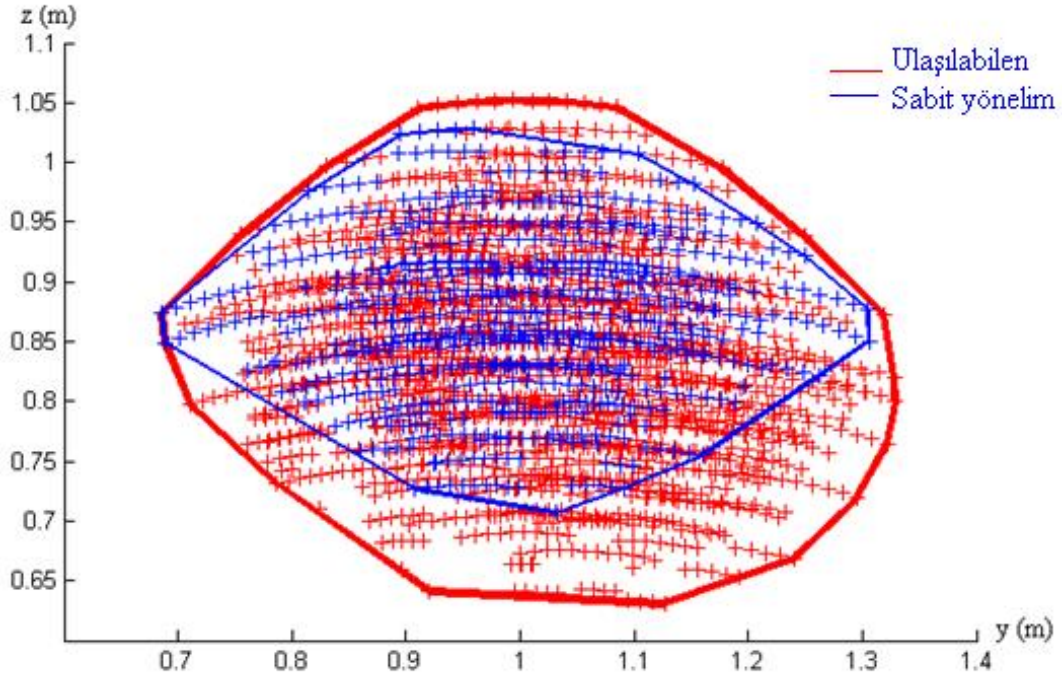
6-3 SPM'nin geliştirilen geometrik yöntemle elde edilen ulaşılabilen çalışma uzayı ile ayırıklaştırma yöntemi ile elde edilen sabit yönelim (hareketli platform sabit tabana paralel durumda iken) çalışma uzayının karşılaştırması Şekil 6.21-23' de sunulmaktadır.



Şekil 6.21 : 6-3 SPM'nın ulaşılabilen ve sabit yönelim çalışma uzaylarının x-y düzlemindeki karşılaştırması.



Şekil 6.22 : 6-3 SPM'nın ulaşılabilen ve sabit yönelim çalışma uzaylarının x- z düzlemindeki karşılaştırması.



Şekil 6.23 : 6-3 SPM'nın ulaşılabilen ve sabit yönelim çalışma uzaylarının y-z düzlemindeki karşılaştırması.

Söz konusu şekillerden de anlaşılacağı üzere düzlemsel SPM ile ilgili uygulamada olduğu gibi, geliştirilen yöntemle elde edilen çalışma uzayı, sabit yönelim çalışma uzayını kapsamaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, uçuş mürettebatı eğitiminde görsel algılama ile birlikte hareket ivmelenmelerini (doğrusal ve açısal) nispeten sağlayan, acil durum prosedürlerinin can/mal kaybı olmaksızın yerde emniyetle tatbikine imkan veren ve uçuş performansını artıran uçuş simülatörlerinin yanı sıra, CNC makinelerden, uzay teleskoplarına kadar endüstrinin birçok farklı alanında başarı ile kullanılan bir paralel mekanizma türü olan Stewart Platform Mekanizmasının ulaşılabilen çalışma uzayının yeni bir geometrik yöntemle belirlenmesi konusu ele alınmıştır. Ayrıca SPM'nin gelişimi, sınıflandırılması, tasarımı, tekilliği, dinamiği, kontrolü, ters ve düz kinematiği konularından bahsedilmiştir.

Geliştirilen yöntemle geçilmeden önce, ters kinematik teknik kullanılarak 6-3 SPM'nin ayırıklaştırma yöntemi ile sabit yönelim/öteleme çalışma uzayı incelenmiş, mafsal konum yarıçaplarının çalışma uzayına etkisi analiz edilmiştir. Literatürde mevcut çalışmalarda yaygın olarak, sabit yönelim/öteleme ve yönelim çalışma uzay analizlerinde, kartezyen veya kutupsal koordinatlarda araştırma uzayı çözüm ağlarına ayrılmakta ve bu ağlara ait düğüm noktalarının çalışma uzayına ait olup/olmadığı, mafsal ve bacak uzunluk sınır kısıtları göz önüne alınarak, ters kinematik yöntem ile araştırılmaktadır.

Ters kinematik yöntemle analizde kullanılan örnekleme adım büyüklüğü analizin doğruluk ve hassiyetini doğrudan etkilemektedir. Adım büyüklüğünün büyük seçilmesi halinde hesaplama süresi azalmakla birlikte, çalışma uzayına ait olan noktalar gözden kaçabilmekte, çalışma uzayı içinde boşluklar oluşmaktadır. Adım büyüklüğünün küçültülmesi ile daha doğru ve hassas analiz yapılması mümkündür. Fakat bu durum da hesaplama süresini üssel olarak artırmaktadır. Ayrıca araştırma

uzayının küresel, silindirik veya prizmatik şekli ve büyüklüğünün de önceden doğru tespit edilebilmesi çalışma uzayı analizinde hesaplama süresi açısından önemli bir etkindir. Bu nedenle ters kinematik tekniğin basit olmasına karşın hesaplama süresinin uzun ve dolayısıyla maliyetinin yüksek olması SPM endüstriyel uygulamalarını sınırlandırmaktadır. Bu gerçeklerden hareketle tasarım mühendislerinin ve operatörlerin işlerini kolaylaştırmak için gerekli ulaşılabilen çalışma uzayı bilgisini veren yeni bir geometrik yöntem bu tez çalışması kapsamında geliştirilmiştir.

Geliştirilen yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi için ilk uygulama düzlemsel SPM ile gerçekleştirilmiş olup, daha sonra yöntem 6-3 SPM'nin çalışma uzayı analizinde uygulanmıştır. Bu doğrultuda düzlemsel SPM'nin ayırıklaştırma yöntemi kullanılarak elde edilen farklı sabit yönelim çalışma alanları ile geliştirilen yöntemle elde edilen ulaşılabilen çalışma alanının karşılaştırılması sonucunda, geliştirilen yöntemle elde edilen çalışma alanının sabit yönelim çalışma alanlarını da kapsadığı tespit edilmiştir. Daha sonra 6-3 SPM'nin ulaşılabilen çalışma uzayı geliştirilen geometrik yöntemle elde edilmiş ve ayırıklaştırma yöntemi ile elde edilen sabit yönelim (hareketli platform sabit tabana paralel iken) çalışma uzayı ile kıyaslanmıştır. Geliştirilen yöntemle elde edilen ulaşılabilen çalışma uzayının ayırıklaştırma yöntemi ile elde edilen sabit yönelim çalışma uzayını kapsadığı tespit edilmiştir.

Geliştirilen yöntem kapsamındaki tüm matematiksel işlemlerin, karmaşık denklemler ile zaman alıcı iterasyonlardan uzak, basit geometrik ilişkilerin kullanılması ile elde edilen en yüksek ikinci mertebeden olan analitik denklemlerle yapıyor olması bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

Yöntem kapsamında araştırma uzayına ihtiyaç duyulmaksızın elde edilen ulaşılabilen çalışma uzayı bilgisi, SPM seçim ve tasarımı ile istenen görevin emniyetle gerçekleştirebilmesi açısından önemlidir.

6-3 Stewart Platform Mekanizması için geliştirilen geometrik yöntemin 3-3, 6-4 veya 6-6 bacak bağlantı düzenlemelerine sahip diğer Stewart Platform Mekanizmaları için de geliştirilmesinin faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Winter, J.C.F., Dodou, D. ve Mulder, M.** (2012). Training Effectiveness of Whole Body Flight Simulator Motion: A Comprehensive Meta-Analysis, *The International Journal of Aviation Psychology*, 22(2), 164-183.
- [2] **Omran, A., Kassem, A.** (2011). Optimal task space control design of a Stewart manipulator for aircraft stall recovery, *Aerospace Science and Technology* 15, 353–365.
- [3] **Dongsu, W. ve Hongbin, G.** (2007). Adaptive Sliding Control of Six-DOF Flight Simulator Motion Platform, *Chinese Journal of Aeronautics* 20, 425-433.
- [4] **Allerton, D.J.** (2009). *Principles of Flight Simulation*, John Willey & Sons, Ltd, 428-451,453.
- [5] **Doc 9625 AN/938** (2009). *Manual of Criteria for the Qualification of Flight Simulators*, International Civil Aviation Organization, II-App A-29.
- [6] **NPA 2012-05** (2012). *Certification Specifications for Flight Crew Data*, European Aviation Safety Agency, 18-38.
- [7] **JAR-STD 1A** (1999). *Aeroplane Flight Simulators*, Joint Aviation Authorities Committee, 1C-5.
- [8] **Stewart, D.** (1965). A platform with six degrees of freedom, *Proc.Inst.Mech.Engr.(London)* 180 (5), 371-386.
- [9] **Hunt, K.H.** (1983). Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms. *ASME J. Mech., Trans. Automat. Des.*, vol. 105, 705–712.
- [10] **Rezai, A., Akbarzadeh, A. ve Akbarzadeh, M.T.** (2012). An investigation on stiffness of a 3-PSP spatial parallel mechanism with flexible moving platform using invariant form, *Mechanism and Machine Theory* 51, 195-216.
- [11] **Dasgupta, B., Mruthyunjaya** (2000). The Stewart platform manipulator: a review, *Mechanism and Machine Theory* 35, 15-40.
- [12] **İnner, B., Küçük, S. ve Bingül, Z.** (2010). Farklı Yapıdaki Stewart Platformlarının Tek Bir Çatı Üzerinden Tasarımı ve Benzetimi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Gebze, Kocaeli, 21-23 Eylül, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, 7-9 Haziran, 400-405.
- [13] **Khoukhi, A., Baron, L., Balazinski, M.** (2009). Constrained multi-objective trajectory planning of parallel kinematic machines, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 25, 756–769.
- [14] **Siciliano, B., Khatib, O.** (2008). *Handbook of Robotics*, Springer, 964,1253.

- [15] **Merlet, J.P.** (2006). *Parallel Robots*, Springer, 6-11, 32, 72, 76, 85,278.
- [16] **Harib, K.H., Sharih Ullah, A.M.M., Hammami, A.,** (2007). A hexapod-based machine tool with hybrid structure: Kinematic analysis and trajectory planning, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, 1426-1432.
- [17] **Zeng, Q. ve Fang, Y.** (2012). Structural synthesis and analysis of serial-parallel hybrid mechanisms with spatial multi-loop kinematic chains, *Mech.Mach. Theory* 49, 195-215.
- [18-] **Garcia-Lopez, M.C., Gorrostieta-Hurtado, E., Vargas-Soto, E., Ramos-Arreguin, J.M., Sotomayor-Olmedo, A. ve Moya Morales, J.C.** (2012). Kinematic analysis for trajectory generation in one leg of a hexapod robot, *Procedia Technology* 3, 32-350.
- [19] **Zhang, D., Gao, Z.** (2012). Forward kinematics, performance analysis, and multi-objective optimization of a bio-inspired parallel manipulator, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 28, 484–492.
- [20] **Fichter, E.F. ve McDowell ,E.D.** (1980). A novel design for a robot arm. *Proceedings of the ASME International ComputerTechnology Conference*, San Francisco, 250–256.
- [21] **Von Daake, A., Vetter, C., Böhm, E., Zirn, O.** (2012). Contribution to calibration of hexapod positioning units in industrial Environment, *Precision Engineering*, 1-8.
- [22] **Portman, V.T., Chapsky, V.S., Shneor, Y.** (2012). Workspace of parallel kinematics machines with minimum stiffness limits: Collinear stiffness value based approach, *Mechanism and Machine Theory* 49, 67–86.
- [23] **Smith, W.F.III, Nguyen C.C.** (1991). On The Mechanical Design Of A Stewart Platform-Based Robotic End-Effector, *Southeastcon '91., IEEE Proceedings of IEEE*, 875-879.
- [24] **Pittens, K.H., Podhorodeski, R.P.** (1993). A Family of Stewart Platforms with Optimak Dexterity, *Journal of Robotic System* 10(4), 463-479.
- [25] **Lazard, D., Merlet, J.-P.** (1994). The (true) Stewart Platform has 12 configuration, *Robotics and Automation*, 1994. *Proceedings., 1994 IEEE International Conference on* , 2160-2165.
- [26] **Merlet, J.-P.** (1997). Designing a Parallel Manipulator for a Specific Workspace, *The International Journal of Robotics Research* 16: 545-556.
- [27] **Hunt, K.H., McAre, P.R.** (1998). The Octahedral Manipulator: Geometry and Mobility, *The International Journal of Robotics Research* 17: 868-885
- [28] **Lee, J., Duffy, J., Hunt, K.H.** (1998). A Practical Quality Index Based on the Octahedral Manipulator, *The International Journal of Robotics Research* 17: 1081-1090
- [29] **Dietmaier, P.** (1998). The Stewart-Gough Platform of General Geometry Can Have 40 Real Postures, *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control*, Kluwer Academic Publishers, 7–16.

- [30] **Su, Y.X., Duan, B.Y., Peng, B., Nan, R.D.** (2001). A Real-Coded Genetic Optimal Kinematic Design of a Stewart Fine Tuning Platform for a Large Radio Telescope, *Journal of Robotic Systems* 18 (9) , 507-516.
- [31] **Su, Y.X., Duan, B.Y., Zheng, C.H.** (2001). Genetic design of kinematically optimal fine tuning Stewart platform for large spherical radio telescope, *Mechatronics*, 821-835.
- [32] **Xi, F.** (2001). A comparison study on hexapods with fixed-length legs, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41, 1735-1748.
- [33] **Fattah, A., Ghasemi, A.M.H.** (2002). Isotropic Design of Spatial Parallel Manipulators, *The International Journal of Robotics Research* 21: 811-824.
- [34] **Hopkins, B.R., Williams II, R.L.** (2002). Kinematics, design and control of the 6-PSU platform, *Industrial Robot: An International Journal* Volume 29 (5), 443-451.
- [35] **Downing, D.M., Samuel, A.E., Hunt, K.H.** (2002). Identification of the Special Configurations of the Octahedral Manipulator using the Pure Condition, *The International Journal of Robotics Research* 21, 14-159.
- [36] **Advani, S., Giovannetti, D., Blum, M.** (2002). Design of a Hexapod Motion Cueing System for the NASA Ames Vertical Motion Simulator, *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 1-10.
- [37] **Kosinska, A., Galicki, M., Kedzior, K** (2003). Design of parameters of parallel manipulators for a specified workspace, *Robotica* volume 21, 575-579.
- [38] **Merlet, J-P.** (2003). Determination of the optimal geometry of modular parallel robots, *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 1197-1202.
- [39] **Hulme, K.F., Pancotti, A.** (2004). Development of a Virtual D.O.F. Motion Platform for Simulation and Rapid Synthesis, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1-11.
- [40] **Pusey, J., Fattah, A., Agrawal, S., Messina, E.** (2004). Design and workspace analysis of a 6-6 cable-suspended parallel robot, *Mechanism and Machine Theory* 39, 761-778.
- [41] **Terrier, M., Dugas, A., Hascoet, J.-Y.** (2004). Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44, 865-877.
- [42] **Hao, F., Merlet, J.-P.** (2005). Multi-criteria optimal design of parallel manipulators based on interval analysis, *Mechanism and Machine Theory* 40, 157-171.
- [43] **Shen, H., Yang, T., Ma, L.-Z.** (2005). Synthesis and structure analysis of kinematic structures of 6-dof parallel robotic mechanisms, *Mechanism and Machine Theory* 40, 1164-1180.

- [44] **Doherty, K.M., Ghasemi-Nejhad, M.N.** (2005). Performance of a Active Composite Strut for an Intelligent Composite Modified Stewart Platform for Thrust Vector Control, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 16, 335-354.
- [45] **Huang, T., Chetwynd, D.G., Whitehouse, D.J., Wang, J.** (2005). A general and novel approach for parameter identification of 6-DOF parallel kinematic machines , *Mechanism and Machine Theory* 40, 219-239.
- [46] **Wolf, A., Shoham, M.** (2006). Screw theory tools for the synthesis of the geometry of a parallel robot for a given instantaneous task, *Mechanism and Machine Theory* 41, 656-670.
- [47] **Hua, C., Weishan, C., Junkao, L.** (2007). Optimal Design of Stewart Platform Safety Mechanism, *Chinese Journal of Aeronautics* 20, 370-377.
- [48] **Liu, X.-J., Wang, J.** (2007). A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms, *Mechanism and Machine Theory* 42, 1210-1224.
- [49] **Lou, Y., Liu, G., Li, Z..** (2007). Randomized Optimal Design of Parallel Manipulators, *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, Volume:5, Issue:2, 223 – 233.
- [50] **Bandyopadhyay, S., Ghosal, A.** (2008). An algebraic formulation of kinematic isotropy 6-6 Stewart platform manipulators , *Mechanism and Machine Theory* 43, 591-616.
- [51] **Stan, S.-D., Matieș, V., Balan, R.** (2008). Kinematics Analysis, Design and Optimization of a Six Degrees-of-Freedom Parallel Robot, *ENOC2008, Saint Petersburg, Russia*, 1-6.
- [52] **Chen, W.S., Chen, H., Liu, J.-K.** (2008). Extreme configuration bifurcation analysis and link safety length of Stewart platform, *Mechanism and Machine Theory* 43, 617-626.
- [53] **Duan, B.Y., Qiu, Y.Y., Zhang, F.S., Zi, B.** (2009). On design and experiment of the feed cable-suspended structure for super antenna, *Mechatronics* 19, 503-509.
- [54] **Indrawanto, A.S.** (2009). Design and Control of the Stewart Platform Robot, *2009 Third Asia International Conference on Modelling & Simulation, Mechatronics* 19, 475-480.
- [55] **Jiang, Q., Gosselin, C.M.** (2009). Geometric Optimization of the MSSM Gough–Stewart Platform, *Journal of Mechanisms and Robotics* Vol.1, *Mechatronics* 19, 1-8.
- [56] **Ren, X.-D., Feng, Z.-R., Su, C.-P.** (2009). A new calibration method for parallel kinematics machine tools using orientation constraint, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49, 708-721.
- [57] **Kumar, S.G., Nagarajan, T., Srinivasa, Y.G.** (2009). Characterization of reconfigurable Stewart platform for contour generation, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 25, 721-731.
- [58] **Son, S., Kim, T., Sarma, S.E., Slocum, A.** (2009). A hybrid 5-axis CNC milling machine, *Precision Engineering* 33, 430-446.

- [59] **Kim, Y. S., Lee, J.H., Yoo, H.S., Lee, J.B., Jung, U.S.** (2009). A performance evaluation of a Stewart platform based Hume concrete pipe manipulator, *Automation in Construction* 18, 665-676.
- [60] **Hou, Y., Zeng, D., Yao, J., Kang, K., Lu, L., Zhao, Y.** (2009). Optimal design of a hyperstatic Stewart platform-based force/torque sensor with genetic algorithms, *Mechatronics* 19, 199–204.
- [61] **Jiang, H.-Z., He, J.-F., Tong, Z.-Z.** (2010). Characteristics analysis of joint space inverse mass matrix for the optimal design of a 6-DOF parallel manipulator, *Mechanism and Machine Theory* 45 , 722–739.
- [62] **Ibrahim, O., Khalil, W.** (2010). Inverse and direct dynamic models of hybrid robots, *Mechanism and Machine Theory* 45, 627-640.
- [63] **Gao, Z., Zhang, D., Ge, Y.** (2010). Design optimization of a spatial six degree-of-freedom parallel manipulator based on artificial intelligence approaches, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 26 (2010) 180–189.
- [64] **Axinte, D.A., Allen, J.M., Anderson, R., Dane, I., Uriarte, L., Olara, A.** (2010). Free-leg Hexapod: A novel approach of using parallel kinematic platforms for developing miniature machine tools for special purpose operations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60, 395–398.
- [65] **Chen, H., Li, X.** (2011). Assembly configuration simulation analysis of symmetrical Stewart platform, *Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011 International Conference on*, 4813–4816.
- [66] **Jiang, H.-Z., Tong, Z.-Z., He, J.-F.,** (2011). Dynamic isotropic design of a class of Gough–Stewart parallel manipulators lying on a circular hyperboloid of one sheet, *Mechanism and Machine Theory* 46, 358-374.
- [67] **Yao, J., Hou, Y., Wang, H., Zhou, T., Zhao, Y.** (2011). Spatially isotropic configuration of Stewart platform-based force sensor, *Mechanism and Machine Theory* 46, 142–155.
- [68] **Tong, Z., He, J., Jiang, H., Duan, G.** (2011). Optimal design of a class of generalized symmetric Gough–Stewart parallel manipulators with dynamic isotropy and singularity-free workspace, *Robotica*, 1-10.
- [69] **Halder, B., Saha, R., Sanyal, D.** (2011). Control-Integrated Design by Theoretical Simulation for a Torque-Actuated 6-SBU Stewart Platform, *Proc. of Int. Conf. on Advances in Mechanical Engineering*, 43-51.
- [70] **Chen, C.-T.** (2012). Reconfiguration of a parallel kinematic manipulator for the maximum dynamic load-carrying capacity, *Mechanism and Machine Theory* 54, 62–75.
- [71] **Pendar, H., Mahnama, M., Zohoor, H.** (2011). Singularity analysis of parallel manipulators using constraint plane method, *Mechanism and Machine Theory* 46, 33–43.

- [72] **Cao, Y., Zhou, H., Shen, L., Li, B.** (2011). Singularity kinematics principle and position-singularity analyses of the 6-3 Stewart-Gough parallel manipulators, *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 (2), 513-522.
- [73] **Chin, J.H., Sun, Y.H. ve Cheng, Y.M.** (2008). Force computation and continuous path tracking for electro-hydraulic parallel manipulators. *Control Engineering Practice* 16, 697-709.
- [74] **ShiLi, C., Tao, W.H., Qun, W.C., Yu, Y., Ying, Z.J.** (2011). A novel method for singularity analysis of the 6-SPS parallel mechanisms, *Science China Technological Series* Vol.54 No.5, 1220-1227.
- [75] **Merlet, J.-P.** (1989). Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann Geometry, *The International Journal of Robotics Research* vol. 8 no. 5, 45-56.
- [76] **McAree, P.R., Daniel, R.W.** (1999). An explanation of never-special assembly changing motions for 3-3 parallel manipulators, *The International Journal of Robotics Research* 18 (6), 556-574.
- [77] **St-Onge, B.M., Gosselin, C.M.** (2000). Singularity Analysis and Representation of the General Gough-Stewart Platform, *The International Journal of Robotics Research* 19, 271-288.
- [78] **Hunt, K.H.** (1978). *Kinematic Geometry of Mechanisms*, Oxford University Press.
- [79] **Fitcher, E.F.** (1986). A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction, *The International Journal of Robotics Research* 5, 157-182.
- [80] **Gosselin, C., Angeles, J.** (1990). Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chains, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 6, no.3., 281-290.
- [81] **Ma, O., Angeles, J.** (1991). Architecture singularities of platform manipulators. In *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, California, 1542– 1547.
- [82] **Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S.** (1998). Singularity-Free Path Planning For The Stewart Platform Manipulator, *Mech. Mach. Theory* Vol. 33, No. 6, 711-725.
- [83] **Li, H., Gosselin, C.M., Richard, M.J., St-Onge, B.M.** (2006). Analytic Form of the Six-Dimensional Singularity Locus of the General Gough-Stewart Platform, *Journal of Mechanical Design* Vol.128, 279-287.
- [84] **Li, H., Gosselin, C.M., Richard, M.J.** (2007). Determination of the maximal singularity-free zones in the six-dimensional workspace of the general Gough–Stewart platform, *Mechanism and Machine Theory* 42, 497–511.
- [85] **Merlet, J.-P.** (1992). On the infinitesimal motion of a parallel manipulator in singular configurations, *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 8 no. 5, 45-56.

- [86] **Wolf, A., Shoham, M.** (2003). Investigation of Parallel Manipulators Using Linear Complex Approximation, Transactions of the ASME vol. 125, 564-572.
- [86] **Huang, Z., Chen, L.H., Li, Y.W.** (2003). The Singularity Principle and Property of Stewart Parallel Manipulator, Journal of Robotic Systems 20(4), 163–176.
- [88] **Su, Y.X., Duan, B.Y., Peng, B., Nan, R.D.** (2003). Singularity analysis of fine-tuning Stewart platform for large radio telescope using genetic algorithm, Mechatronics 13, 413–425.
- [89] **Huang, Z., Cao, Y.** (2005). Property Identification of the Singularity Loci of a Class of Gough-Stewart Manipulators, The International Journal of Robotics Research 24, 675-685.
- [90] **Liu, C.H., Chiu, J.** (2005). Direct Kinematic Singularities of 3-3 Stewart-Gough Platforms, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics 219, 311-324.
- [91] **Merlet, J.-P.** (2007). A Formal-Numerical Approach for Robust In-Workspace Singularity Detection, IEEE Transactions on Robotics, vol. 23 no. 3, 393–402.
- [92] **Chen, W.-S., Chen, H., Liu, J.K.** (2008). Extreme configuration bifurcation analysis and link safety length of Stewart platform, Mechanism and Machine Theory 43, 617–626.
- [93] **Wang, Y.-X., Li, Y.T., Guo, R.Q.** (2008). Study on the method for 6-SPS Gough–Stewart platforms to pass through type-II singular points with its original configuration, Proc. IMechE Vol. 222 Part C: J. Mechanical Engineering Science, 723–736.
- [94] **Charters, T., Enguiça, R., Freitas, P.** (2009). Detecting Singularities of Stewart Platforms, Mathematics-in-Industry Case Studies Journal, Volume 1, 66-80.
- [95] **Ben-Horin, P.** (2009). Application of Grassmann--Cayley Algebra to Geometrical Interpretation of Parallel Robot Singularities, The International Journal of Robotics Research January 1, 2009 28: 127-141.
- [96] **Li, B., Cao, Y., Zhang, Q., Zhou, H.** (2009). Singularity Elimination Of Stewart Platform Using Redundant Actuation, 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010) vol 10, 156-159.
- [97] **Nawratil, G.** (2010). Stewart Gough platforms with non-cubic singularity surface, Mechanism and Machine Theory 45, 1851–1863.
- [98] **Parsa, S.S., Daniali, H.M., Ghaderi, R.** (2010). Optimization of parallel manipulator trajectory for obstacle and singularity avoidances based on neural network, Int J Adv Manuf Technol 51, 811–816.
- [99] **Mishra, A.** (2011). Singularity Analysis and Comparative Study of Six Degree of Freedom Stewart Platform as a Robotic Arm by Heuristic Algorithms and Simulated Annealing, International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST) Vol. 3 No. 1, 644-659.

- [100] **Lin, J., Chen, C.W.** (2009). Computer-aided-symbolic dynamic modeling for Stewart-platform manipulator, *Robotica* vol.27, 331–341.
- [101] **Kızır, S., Bingül, Z., Oysu, C., Küçük, S.** (2011). Development and Control of a High Precision Stewart Platform, *SDU International Journal of Technologic Sciences* Vol. 3, No 1/Special Issue, 51-59.
- [102] **Pi, Y., Wang, X.** (2011). Trajectory tracking control of a 6-DOF hydraulic parallel robot manipulator with uncertain load disturbances, *Control Engineering Practice* 19, 185–193.
- [103] **Zubizarreta, A., Marcos, M., Cabanes, I., Pinto, C.** (2011). A procedure to evaluate Extended Computed Torque Control configurations in the Stewart–Gough platform, *Robotics and Autonomous Systems* 59, 770–781.
- [104] **Guo, H.B., Liu, Y.G., Liu, G.R., Li, H.R.** (2008). Cascade control of a hydraulically driven 6-DOF parallel robot manipulator based on a sliding mode, *Control Engineering Practice* 16, 1055–1068.
- [105] **Omran, A., Kassem, A., El-Bayoumi, G., Bayoumi, M.** (2009). Mission-based optimal control of Stewart manipulator, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal* 81/3, 226–233.
- [106] **Shiferaw, D., Jain, A.** (2011). Comparision of Joint Space and Task Space Integral Sliding Mode Controller Implementations for a 6 DOF Parallel Robot, *Proceedings of the 11th WSEAS international conference on robotics, control and manufacturing technology*, 163-169.
- [107] **Yang, C., Huang, Q., Jiang, H., Peter, O.O., Han, J.** (2010). PD control with gravity compensation for hydraulic 6-DOF parallel manipulator, *Mechanism and Machine Theory* 45, 666–677.
- [108] **Yang, C., Huang, Q., Han, J.** (2012). Decoupling control for spatial six-degree-of-freedom electro-hydraulic parallel robot, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 28, 14–23.
- [109] **Fraguala, L., Fridman, L., Alexandrov** (2012). Position stabilization of a Stewart platform: High-order sliding mode observers based approach, *Journal of the Franklin Institute* 349, 441–455.
- [110] **Nguyen, C.C., Antrazi, S.S., Zhou, Z.-L., Campbell, C.E.Jr.** (1993). Adaptive Control of a Stewart Platform-Based Manipulator, *Journal of Robotic Systems* 10 (5), 657-687.
- [111] **Ghobakhloo, A., Eghtesad, M., Azadi, M.** (2006). Adaptive-Robust Control of the Stewart-Gough platform As a Six dof Parallel Robot, *World Automation Congress (WAC) 2006*, July 24-26, Budapest, Hungary, 1-6.
- [112] **Yurt, S.N., Özkol, İ., Kaya, M.O., Hacıyev, C.** (2001). Optimization of the PD coefficient in a flight simulator control via genetic algorithms, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* Volume 74 · Number 2, 147–153.

- [113] **Huang, C.-I., Chang, C.-F., Yu, M.Y., Fu, L.-C.** (2004). Sliding-Mode Tracking Control of the Stewart Platform, Control Conference, 2004. 5th Asian, Vol.1, 562 - 569.
- [114] **Qiang, W., Juan, C., Zhiyong, T.** (2008). Study of Sliding Mode Control for Stewart Platform Based on Simplified Dynamic Model, Industrial Informatics, 6th IEEE International Conference on, 889 - 892.
- [115] **Chung, I.-F., Chang, H.-H., Lin, C.-T.** (1999). Fuzzy Control of a Six-degree Motion Platform with Stability Analysis, Systems, Man, and Cybernetics, SMC '99 Conference Proceedings, IEEE International Conference on, Vol. 6, 1079 – 1092.
- [116] **Zi, B., Duan, B.Y., Du, J.L., Bao, H.** (2008). Dynamic modeling and active control of a cable-suspended parallel robot, Mechatronics 18, 1–12.
- [117] **Ting, Y., Chen, Y.-S., Wang, S.-M.** (1999). Task-Space Control Algorithm for Stewart Platform, Proceedings of the 38' Conference on Decision & Control Phoenix, 3857-3862.
- [118] **Lee, S.-H., Song, J.-B., Choi, W.C., Hong, D.** (2001). Controller Design for a Stewart Platform Using Small Workspace Characteristics, Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Maui, Hawaii, USA, 2184-2189.
- [119] **Lee, S.-H., Song, J.-B., Cho, W.-C., Hong, D.** (2003). Position control of a Stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics, Mechatronics 13, 605–619.
- [120] **Gexue, R., Qiuhai, L., Ning, H., Rendong, N., Bo, P.** (2004). On vibration control with Stewart parallel mechanism, Mechatronics 14, 1–13.
- [121] **Ting, Y., Chen, Y.S., Jar, H.C.** (2004). Modeling and Control for a Gough–Stewart Platform CNC Machine, Journal of Robotic Systems 21(11), 609–623.
- [122] **Lopes, A.M., Almeida, F.G.** (2007). Acceleration-based force-impedance control of a six-dof parallel manipulator, Industrial Robot: An International Journal 34/5, 386–399.
- [123] **Davliakos, I., Papadopoulos, E.** (2007). A Model-Based Impedance Control of a 6-dof Electrohydraulic Stewart Platform, Proceedings of the European Control Conference, Kos, Greece, 3507-3514.
- [124] **Lara-Molina, F.A., Rosario, J.M., Dumur, D.** (2010). Architecture of Predictive Control for a Stewart Platform Manipulator, Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, China, 6584-6589.
- [125] **Jafarinasab, M., Keshmiri, M., Azizan, H., Danesh, M.** (2011). Sliding mode control of a novel 6-DOF parallel manipulator with rotary actuators, Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 16th International Conference on, 218-223.
- [126] **Vargas, M.B., Belo, E.M.** (2012). Application of H_∞ Theory to a 6 DOF Flight Simulator Motion Base, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering vol.34 no.2, 193-204.

- [127] **Lopes, A.M.**, (2009). Dynamic modeling of a Stewart platform using the generalized momentum approach, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat* 14, 3389-3401.
- [128] **Wang, J., Wu, J., Wang, L., Li, T.** (2007). Simplified strategy of the control, *Mechanism and Machine Theory* 42, 1119–1140.
- [129] **Guo, H.B., Li, H.R.** (2006). Dynamic analysis and simulation of a six degree of freedom Stewart platform manipulator, *Proc. IMechE Vol. 220 Part C: J. Mechanical Engineering Science*, 4, 61-72.
- [130] **Harib, K., Srinivasan, K..** (2003). Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool structures, *Robotica* volume 21, 541–554.
- [131] **Khalil, W., Guegan, S.** (2004). Inverse and Direct Dynamic Modeling of Gough-Stewart Robots, *IEEE Transaction on Robotics and Automation* 20, 4, 754-762.
- [132] **Shao, Z-F., Tang, X., Chen, X. ve Wang,L.-P.** (2012). Research on the inertia matching of the Stewart parallel manipulator, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 28, 649-659.
- [133] **Liu, M.-J., Li, C.-X., Li, C.N.** (2000). Dynamics Analysis of the Gough–Stewart Platform Manipulator, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 1, 94-98.
- [134] **Staicu, Ș.** (2009). Dynamic Analysis of The 3-3 Stewart Platform, *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, Vol. 71, No. 2, 1-16.
- [135] **Staicu, S.** (2011). Dynamics of the 6-6 Stewart parallel manipulator, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 27, 212–220.
- [136] **Du, J., Bao, H.,Cui, C., Yang, D.** (2012). Dynamic analysis of cable-driven parallel manipulators with time-varying cable lengths, *Finite Elements in Analysis and Design* 48, 1392–1399.
- [137] **Lebre, G., Liu, K., Lewis, F.L.** (1993). Dynamic Analysis and Control Stewart Platform Manipulator, *Journal of Robotic Systems* 10 (5),629-655.
- [138] **Kosuge,K., Takeo, K., Fukuda, T., Kai, K., Mizuno, T., Tomimatsu, H.** (1993). Computation of Parallel Link Manipulator Dynamics, *Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, 1993. Proceedings of the IECON '93., International Conference on, vol 3, 1672-1677.
- [139] **Pang, H., Shahinpoor, M.** (1994). Inverse Dynamics of a Parallel Manipulator, *Analysis and Control Stewart Platform Manipulator*, *Journal of Robotic Systems* 11(8),693-702.
- [140] **Wiens, G.J., Shamblin, S.A., Oh, Y.H.** (2002). Characterization of PKM dynamics in terms of system identification, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics* 216, 59-72.
- [141] **Wang, S.-C., Hikita, H., Kubo, H., Zhao, Y.-S., Huang, Z., Ifukube, T.** (2003). Kinematics and dynamics of a 6 degree-of-freedom fully

parallel manipulator with elastic joints, *Mechanism and Machine Theory* 38, 439–461.

- [142] **Filho, S.C.T., Cabral, E.L.L.** (2006). Dynamics and Jacobian Analysis of A Parallel Architecture Robot: The Hexa, *ABCM Symposium Series in Mechatronics - Vol. 2*, 166-173.
- [143] **Oen, K.-T., Wang, L.-C.T.** (2007). Optimal dynamic trajectory planning for linearly actuated platform type parallel manipulators having task space redundant degree of freedom, *Mechanism and Machine Theory* 42, 727–750.
- [144] **Yıldız, İ., Ömürlü, V.E., Sağırılı, A.** (2008). Dynamic Modeling of a Generalized Stewart Platform by Bond Graph Method Utilizing a Novel Spatial Vizulation Technique, *International Review of Mechanical Engineering* Vol.2, N.5, 702-716.
- [145] **Abdellatif, H., Heimann, B.** (2009). Computational efficient inverse dynamics of 6-DOF fully parallel manipulators by using the Lagrangian formalism, *Mechanism and Machine Theory* 44, 192–207.
- [146] **Carricato, M., Gosselin, C.** (2009). On the Modeling of Leg Constraints in the Dynamic Analysis of Gough/Stewart-Type Platforms, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* Vol.4, *Mechanism and Machine Theory* 44, 1-8.
- [147] **Mahmoodi, A., Menhaj, M.B., Sabzehparvar, M.** (2009). An efficient method for solution of inverse dynamics of Stewart platform, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal* 81/5, 398–406.
- [148] **Hajimirzaalian, H., Moosavi, H., Massah M.** (2010). Dynamics Analysis and Simulation of Parallel Robot Stewart Platform, *Computer and Automation Engineering (ICCAE), The 2nd International Conference on* , vol.5, 472-477.
- [149] **Hajimirzaalian, H., Moosavi, H., Massah M.** (2010). Analyzing and Simulating the Inverse and the Direct Dynamics of Parallel Robot Stewart Platform,, *Computer and Network Technology (ICCNT), 2010 Second International Conference on* , 136 - 141.
- [150] **Mahmoodi, A., Aminzadeh, M., Menhaj, M.B., Sabzehparvar, M.** (2010). A Generalized Method for Determining Load Workspace of Spatial Parallel Mechanisms, *8th IEEE International Conference on Control and Automation* , 1360-1365.
- [151] **Craig, J.J.** (2005). *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, Pearson Education International, Third Edition, 62,63.
- [152] **Khalil, W., Murareci, D.** (1996). Kinematic analysis and singular configurations of a class of parallel robots, *Mathematics and Computers in Simulation* 41, 377-390.
- [153] **Gonzales, H., Dutra, M.S., Lengerke, O.** (2011). Direct and inverse kinematics of Stewart platform applied to offshore cargo transfer simulation, *13th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Guanajuato, México, 1-7.

- [154] **Husty, M.L.** (1996). An Algorithm for Solving The Direct Kinematics of General Stewart-Gough Platforms, *Mech. Mach. Theory* Vol. 31, No. 4, 365-380.
- [155] **Agheli, M.M., Nategh, M.J.** (2009). Identifying the Kinematic Parameters of Hexapod Machine Tool, *International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering* 1:3, 149-154.
- [156] **Zhang, G.-F.** (2012). Classification of direct kinematics to planar generalized Stewart platforms, *Computational Geometry* 45, 458-473.
- [157] **Majid, M.Z.A., Huang, Z., Yao, Y.L.** (2000) . Workspace analysis of a six-degrees of freedom, three-prismatic–prismatic–spheric-revolute parallel manipulator, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 16 (6), 441–449.
- [158] **Tari, H., Su, H.J., Hausenstein, J.D.** (2012). Classification and complete solution of the kinetostatics of a compliant Stewart–Gough platform, *Mechanism and Machine Theory* 49, 177–186.
- [159] **Wang, Z., He, J., Gu, H.** (2011). Forward Kinematics Analysis of a Six-Degree-of-Freedom Stewart Platform Based on Independent Component Analysis and Nelder–Mead Algorithm, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part a: Systems and Humans*, vol. 41, no. 3, 589-597.
- [160] **Raghavan, M.** (1993). The Stewart platform of general geometry has 40 configurations, *ASME J. Mech. Des.* 115, 277–282.
- [161] **Huang, X., Hang, Z., He, G., Tan, X.** (2010). An Efficient Algebraic Method for Direct Kinematics of the 5-6 Stewart Platform, *2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 63-66.
- [162] **Huang, X., Liao, Q., Wei, S.** (2010). Closed-form forward kinematics for a symmetrical 6-6 Stewart platform using algebraic elimination, *Mechanism and Machine Theory* 45, 327–334.
- [163] **Cheng, S., Wu, H., Wang, C., Yao, Y., Zhu, J.** (2010). The Forward Kinematics Analysis of 6-3 Stewart Parallel Mechanisms, *ICIRA 2010, Part I, LNAI 6424*, 409–417.
- [164] **Huang, X., He, G.** (2009). Closed-form Direct Position Analysis of the General Stewart-Gough manipulator Robot, *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 1327-1331.
- [165] **Gan, D., Liao, Q., Dai, J.S., Wei, S., Seneviratne, L.D.** (2009). Forward displacement analysis of the general 6–6 Stewart mechanism using Gröbner bases, *Mechanism and Machine Theory* 44, 1640–1647.
- [166] **Huang, X., Liao, Q., Wei, S., Qiang, X.** (2007). Forward Kinematics of the 6-6 Stewart Platform with Planar Base and Platform Using Algebraic Elimination, *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 2655-2659.
- [167] **Lee, T.Y., Shim, J.-K.** (2003). Improved dialytic elimination algorithm for the forward kinematics of the general Stewart–Gough platform, *Mechanism and Machine Theory* 38 (2003) 563–577.

- [168] **Lei, D., Gao, X.-S., Liao, Q., Zhang, G.-F.** (2003). Generalized Stewart Platforms and their Direct Kinematics, MM Research Preprints, MMRC, AMSS, Academia, No. 22, 64–85.
- [169] **Song, S.-K., Kwon, D.-S.** (2002). A Tetrahedron Approach for a Unique Closed-Form Solution of the Forward Kinematics of Six-dof Parallel Mechanisms with Multiconnected Joints, *Journal of Robotic Systems* 19(6), 269–281.
- [170] **Song, S.-K., Kwon, D.-S.** (2002). Efficient formulation approach for the forward kinematics of 3-6 parallel mechanisms, *Advanced Robotics*, Vol. 16, No. 2, 191–215.
- [171] **Song, S.-K., Kwon, D.-S.** (2001). Efficient Formulation Approach for the Forward Kinematics of the 3-6 Stewart-Gough Platform, proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1688-1693.
- [172] **Song, S.-K., Kwon, D.-S.** (2001). New Methodology for the Forward Kinematics of 6-dof Parallel Manipulators Using Tetrahedron Configurations, *Robotics and Automation*, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on, vol.2, 1307 - 1312.
- [173] **Lee, T.Y., Shim, J.-K.** (2001). Forward Kinematics of the General 6-6 Stewart Platform Using Algebraic Elimination, *Mechanism and Machine Theory* 36, 1073-1085.
- [174] **Kong, X., Gosselin, C.M.** (2001). Generation and Forward Displacement Analysis of Two New Classes of Analytic 6-SPS Parallel Manipulators, *Journal of Robotic Systems* 18(6), 295–304.
- [175] **Ji, P., Wu, H.** (2001). A Closed-Form Forward Kinematics Solution for the 6–6 Stewart Platform, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 4, 522-526.
- [176] **Innocenti, C.** (2001). Forward Kinematics in Polynomial Form of the General Stewart Platform, *Journal of Mechanical Design* (Transactions of the ASME). Vol. 123, no. 2, 254-260.
- [177] **Selfridge, R.G., Matthew, G.K.** (2000). Forward Analysis of Some Special Stewart Platforms, *Journal of Robotic Systems* 17(10) , 517-526.
- [178] **Sreenivasan, S.V., Waldron, K.V., Nanua, P.** (1994). Closed-Form Direct Displacement Analysis of a 6-6 Stewart Platform, *Mech. Mach. Theory* Vol. ,9. No. 6, 855-864.
- [179] **Nair, R., Maddocks, J.H.** (1994). On the Forward Kinematics of Parallel Manipulators, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.13, No. 2, 171-187.
- [180] **Wen, F., Liang, C.** (1994). Displacement analysis of the 6-6 Stewart Platform Mechanisms, *Mech. Mach. Theory* Vol. 29. No. 4, 547-557.
- [181] **Lee, H.-Y., Lin, W., Duffy, J.** (1993). A Method for Forward Displacement Analysis of in Parallel Platform Mechanisms, *Mechatronics* Vol. 3, No. 5, 659-669.

- [182] **Merlet, J.-P.** (1992). Direct Kinematics and Assembly Modes of Parallel Manipulators, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 2, 150-161.
- [183] **Zhang, C.-D., Song, S.-M.** (1992). Forward Kinematics of a Class of Parallel (Stewart) Platforms with Closed-Form Solutions, *Journal of Robotic Systems* 9(1), 93-112.
- [184] **Nanua, P., Waldron, K.J.** (1990). Direct Kinematic Solution of a Stewart Platform, *Robotics and Automation, IEEE Transactions*, Vol. 6, Issue 4, 438-444.
- [185] **Innocenti, C., Castelli, V.P.** (1990). Direct Position Analysis of The Stewart Platform Mechanism, *Mech. Mach. Theory* Vol. 25, No. 6, 611-621.
- [186] **Griffis, M., Duffy, J.** (1989). A Forward Displacement Analysis of a Class of Stewart Platforms, *Journal of Robotic Systems* 6(6), 703-720.
- [187] **Wang, Z., He, Z., Shang, H., Gu, H.** (2009). Forward kinematics analysis of a six-DOF Stewart platform using PCA and NM algorithm, *Industrial Robot: An International Journal* 36/5, 448-460.
- [188] **Rolland, L., Chandra, R.** (2009). Forward Kinematics of the 6-6 general Parallel Manipulator Using Real Coded Genetic Algorithms, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1637-1642.
- [189] **Yang, C., He, J., Han, J., Liu, X.** (2009). Real-time state estimation for spatial six-degree-of-freedom linearly actuated parallel robots, *Mechatronics* 19, 1026-1033.
- [190] **Omran, A., Bayoumi, M., Kassem, A., El-Bayoumi, G.** (2009). Optimal Forward Kinematics Modeling of Stewart Manipulator Using Genetic Algorithms, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* Volume 3, Number 4, 280-292.
- [191] **Wang, X.-S., Hao, M.-L., Cheng, Y.-H.** (2008). On the use of differential evolution for forward kinematics of parallel manipulators, *Applied Mathematics and Computation* Vol. 205, 760-769.
- [192] **Yurt, S. N., Anlı, E., Özkol, İ.** (2007). Forward kinematics analysis of the 6-3 SPM by using neural, *Networks, Meccanica* 42, 187-196.
- [193] **Wang, Y.** (2006). An Incremental Method for Forward Kinematics of Parallel Manipulators, *Robotics, Automation and Mechatronics*, 2006 IEEE Conference on, 1-5.
- [194] **Liu, S., Li, W.-I., Du, Y.-C., Fang, L.** (2006). Forward kinematics of the Stewart platform using hybrid immune genetic algorithm, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2330-2335.
- [195] **Ren, L., Feng, Z., Mills, J.M.** (2006). A Self-Tuning Iterative Calculation Approach for the Forward Kinematics of a Stewart-Gough Platform, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2018-2023.

- [196] **Parikh, P.J., Lam, S.S.Y.** (2005). A Hybrid Strategy to Solve the Forward Kinematics Problem in Parallel Manipulators, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, no. 1, 18-25.
- [197] **Cruz, P., Ferreira, R., Sequeira, J.S.** (2005). Kinematic Modeling of Stewart-Gough Platforms, In *Proceedings of ICINCO- Robotics and Automation* , 93-99.
- [198] **Merlet, J.P.** (2004). Solving the Forward Kinematics of a Gough-Type Parallel Manipulator with Interval Analysis, *The International Journal of Robotics Research* Vol. 23, No. 3, 221-235.
- [199] **Ku, D.-M.** (2000). Forward kinematic analysis of a 6-3 type Stewart platform mechanism, *Proc Instn Mech Engrs* Vol 214 Part K , 233-240.
- [200] **Zhao, X., Peng, S.** (2000). A successive approximation algorithm for the direct position analysis of parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory* 35, 1095-1101.
- [201] **Sang, L.H., Han, M.-C.** (1999). The Estimation for Forward Kinematic Solution of Stewart Platform Using the Neural Network, *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 501-506.
- [202] **Ku, D.-M.** (1999). Direct Displacement Analysis of a Stewart Platform Mechanism, *Mechanism and Machine Theory* 34, 453-465.
- [203] **Sika, Z., Kocandrlle** (1998). An Investigation of Properties of The Forward Displacement Analysis of The Generalized Stewart Platform by means of General Optimization Methods, *Mech. Mach. Theory* Vol. 33, No. 3, 245-253.
- [204] **Didrit, O., Petitot, M., Walter, E.** (1998). Guaranteed Solution of Direct Kinematic Problems for General Configurations of Parallel Manipulators, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, no. 2, 259-266.
- [205] **Yee, C.S., Lim. K.** (1997). Forward kinematics solution of Stewart platform using neural networks , *Neurocomputing* 16, 333-349.
- [206] **McAree, P.R., Daniel, R.W.** (1996). A Fast, Robust Solution to the Stewart Platform Forward Kinematics, *Journal of Robotic Systems* 13(7), 407-427.
- [207] **Geng, Z., Haynes, L.** (1991). Neural Network Solution For the Forward Kinematics Problem of a Stewart Platform, *Robotics and Automation*, 1991. *Proceedings., 1991 IEEE International Conference on*, vol.3, 2650 – 2655.
- [208] **Nguyen, C.C., Zhou, Z.L., Antrazi, S.S.** (1991). Efficient Computation of Forward Kinematics and Jacobian Matrix of a Stewart Platform-Based Manipulator, *Southeastcon '91., IEEE Proceedings of*, Vol. 2, 869-874.
- [209] **Innocenti, C., Castelli, V.P.** (1991). A Novel Numerical Approach to the Closure of The 6-6 Stewart Platform Mechanism, *Advanced Robotics*,

1991. Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on, Vol 1, 851-855.
- [210] **Morell, A.** (2012). An artificial intelligence approach to forward kinematics of Stewart Platforms, Control & Automation (MED), 20th Mediterranean Conference on, 433 - 438.
- [211] **Chapra, S.C., Canale, R.P.** (2009). Numerical Methods for Engineers, 6 th Edition, McGraw-Hill Primis, 148-170.
- [212] **Tarokh, M.** (2007). Real Time Forward Kinematics Solutions for General Stewart Platforms, 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 901-906.
- [213] **Brisan, C., Csiszar, A.** (2011). Computation and analysis of the workspace of a reconfigurable parallel robotic system, Mechanism and Machine Theory 46, 1647–1668.
- [214] **Kuzeci, Z.E., Alp, H., Omurlu, V.E., Ozkol, İ.** (2012). Workspace analysis of parallel mechanisms through neural networks and genetic algorithms, The 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control , Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 1-6.
- [215] **Dash, A.K., Chen, I-M., Yeo, S.H., Yang, G.** (2005). Workspace generation and planning singularity-free path for parallel manipulators, Mechanism and Machine Theory 40, 776–805.
- [216] **Macho, E., Altuzarra, O., Amezua, E., Hernandez, A.** (2009). Obtaining configuration space and singularity maps for parallel manipulators, Mechanism and Machine Theory 44, 2110–2125.
- [217] **Jin, Y., Chen, I-M., Yang, G.** (2011). Workspace evaluation of manipulators through finite-partition of SE(3), Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 27, 850–859.
- [218] **Bonev, I.A., Gosselin, C.** (2002). Geometric Algorithms for the Computation of the Constant-Orientation Workspace and Singularity Surfaces of a Special 6-RUS Parallel Manipulator, Proceedings of DETC'02 ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Montreal, Canada, Vol.5, 505-514.
- [219] **Wang, Z., Wang, Z., Liu, W.T. ve Lei, Y.C.** (2001). A study on workspace, boundary workspace analysis and workpiece positioning for parallel machine tools, Mech.Mach. Theory 36 (5), 605-622.
- [220] **Conti, J.P., Clinton, C.M., Zhang, G., Wavering, A.J.** (1998). Workspace Variation of a Hexapod Machine Tool, NISTIR 6135, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD,USA, 1-18.
- [221] **Masory, O. ve Wang, J.** (1995) .Workspace evaluation of Stewart platform, Adv. Robot. 9 (4), 443–461.
- [222] **Luh, C.M., Adkins, F.A., Haug, E.J., Qiu C.C.** (1996). Working capability analysis of Stewart platforms, Trans. ASME J. Mech. Des. 118 (2), 220–227.

- [223] **Merlet, J.-P.** (1999). Determination of 6D Workspaces of Gough-Type Parallel Manipulator and Comparison between Different Geometries, *The International Journal of Robotics Research* vol.18, 902 – 916.
- [224] **Zhao, J.-S., Zhang, S.-L., Dong, J.X., Feng, Z.-J., Zhou, K.** (2007). Optimizing the kinematic chains for a spatial parallel manipulator via searching the desired dexterous workspace, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23, 38–46.
- [225] **Zhao, J.-S., Chu, F., Feng, Z.-J.** (2008). Solving reachable workspace of some parallel manipulators by computer-aided design variation geometry, *Proc. IMechE Vol. 222 Part C: J. Mechanical Engineering Science*, 1773-1781.
- [226] **Zhao, J.-S., Chu, F., Feng, Z.-J.** (2008). Symmetrical characteristics of the workspace for spatial parallel mechanisms with symmetric structure, *Mechanism and Machine Theory* 43, 427–444.
- [227] **Wang, Z., Ji, S., Li, Y., Wan, Y.** (2010). A unified algorithm to determine the reachable and dexterous workspace of parallel manipulators, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 26, 454–460.
- [228] **Yang, X., Wang, H., Zhang, C. ve Chen, K.** (2010). A method for mapping the boundaries of collision-free reachable workspaces, *Mechanism and Machine Theory* 45, 1024-1033.
- [229] **Ay, S., Vatandaş, O.E., Hacıoğlu, A.** (2011). A Novel Geometrical Approach to Determining the Workspace of 6-3 Stewart Platform Mechanism, *Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2011 5th International Conference* , 95-100.
- [230] **Ay S., Vatandaş, E., Hacıoğlu A.** (2012). Determination of the Reachable Workspace of 6-3 Stewart Platform Mechanism, *International Conference of Mechanical Engineering 2012, July 04-06, Imperial College London, England*, 1851-1855.
- [231] **Gosselin, C.** (1990). Determination of the Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators, *Journal of Mechanical Design* Vol. 112 , 331-336.
- [232] **Bonev, I.A., Ryu, J.** (2000). A Geometric Algorithm for the Computation of the Constant-Orientation Workspace of 6-RUS Parallel Manipulators, *Proceedings of the 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Baltimore, MD, USA, DETC00/MECH-14106.
- [233] **Güneri, B., Sarıgül, A.S., Karagülle, H.** (2007). Bir Stewart Platformunda Mafsal Konumu-Çalışma Uzayı-Aktüatör Kuvveti İlişkileri, 13. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, 395-403.
- [234] **Tanaka, Y., Yokomichi, I., Ishii, J., Makino, T.** (2009). 3-D Visualization on Workspace of Parallel Manipulators, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.3, No.1, 58-68.
- [235] **Ay, S., Vatandaş, O.E., Hacıoğlu, A.** (2009). The Effect of Radius of Joint Location on Workspace Analysis of The 6-6 Stewart Platform Mechanism, *Recent Advances in Space Technologies, RAST '09, 4th International Conference on*, 728-731.

- [236] **Merlet, J.-P.** (1995). Determination of the orientation workspace of parallel manipulators, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 13, No. 2, 143-160.
- [237] **Bonev, I.A., Ryu, J.** (1999). Orientation Workspace Analysis of 6-DOF Parallel Manipulators, *Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences* September 12-15, Las Vegas, Nevada, USA, 1-54.
- [238] **Huang, T., Wang, J., Gosselin, C.Whitehouse, D.J.** (1999). Determination of Closed Form Solution to the 2-D-Orientation Workspace of Gough–Stewart Parallel Manipulators, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* , vol.15 Issue:6, 1121-1125.
- [239] **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.
- [240] **Alp, H., Özkol, İ.** (2008). Extending the workspace of parallel working mechanisms, *Proc. IMechE Vol. 222 Part C: J. Mechanical Engineering Science*, 1305-1313.
- [241] **Alp, H., Özkol, İ.** (2008). 6 Serbestlik dereceli 6-3, özel yapı 6-3 ve 6-4 paralel mekanizmaların genişletilmiş çalışma uzayı analizi, *itüdergisi/d mühendislik,Cilt:7, Sayı:4*, 3-14.
- [242] **Jiang, Q., Gosselin, C.M.** (2009). Determination of the maximal singularity-free orientation workspace for the Gough–Stewart platform, *Mechanism and Machine Theory* 44, 1281–1293.
- [243] **Cao, Y., Zhou, H., Li, B., Zhang, Q.** (2009). Orientation-Workspace Analysis of a Special Class of the Stewart-Gough Parallel Manipulators, *Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2009)*, 4632-4637.
- [244] **Cao, Y., Zhou, H., Zhang, Q-J, Ji, W-X.** (2010). Research on the orientation-singularity and orientation-workspace of a class of Stewart-Gough parallel manipulators, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics* 224, 19-32.
- [245] **Cao, Y., Ji, W., Li, Z., Zhou, H., Liu, M.** (2010). Orientation-Singularity and Nonsingular Orientation-Workspace Analyses of the Stewart-Gough Platform Using Unit Quaternion Representation, *2010 Chinese Control and Decision Conference*, 2282-2287.
- [246] **Haug, E., Wang,J.Y. ve Wu, J.K.** (1994). Dextrous workspaces of manipulators, Part 1:Analitical Criteria. Technical Report R-125: Center for Simulation and Design Optimization of Mechanical Systems and Mechanical Engineering, The University of Iowa.
- [247] **Plessis, L.J., Snyman, J.A.** (2001). A Numerical Method for the Determination of Dextrous Workspaces of Gough–Stewart Platforms, *International Journal For Numerical Methods In Engineering* Vol.52, 345–369.
- [248] **Castelli, G., Ottaviano, E., Ceccarelli, M.** (2008). A Fairly General Algorithm to Evaluate Workspace Characteristics of Serial and

Parallel Manipulators, Mechanics Based Design of Structures and Machines, 36: 14–33.

- [249] **Bonev, I.A., Ryu, J.** (2001). A geometrical method for computing the constant-orientation workspace of 6-PRRS parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory* 36, 1-13.
- [250] **Saxena, V., Liu, D., Daniel, C.M.** (1997). A Simulation Study of The Workspace and Dexterity of a Stewart Platform Based Machine Tool, *Proc. 1997 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Dallas, TX, USA, 617-623.
- [251] **Alp, H., Anli, E., Özkol, İ.** (2007). Neural network algorithm for workspace analysis of a parallel mechanism, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal* 79/1, 35–44.
- [252] **Cao, Y., Lu, K., Li, X., Zang, Y.** (2011). Accurate Numerical Methods for Computing 2D and 3D Robot Workspace, *Int J Adv Robotic Sy*, 2011, Vol. 8, No. 6, Special Issue Robot Manipulators, 1-13.
- [253] **Merlet, J.-P.** (1998). Efficient estimation of the extremal articular forces of a parallel manipulator in a translation workspace, *Robotics and Automation*, *Proceedings of IEEE International Conference on*, vol.3, 1982 – 1987.
- [254] **Merlet, J.-P.** (2007). A Local Motion Planner for Closed-loop Robots, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* San Diego, CA, USA, 3088-3093.
- [255] **Ji, Z.** (1994). Workspace Analysis of Stewart Platforms via Vertex Space, *Journal of Robotic Systems* 11(7), 631-639.
- [256] **Kim, D.I., Chung, W.K., Youm, Y.** (1997). Geometrical Approach for the Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation* vol.4, 2986 - 2991.
- [257] **Bonev, I.A., Ryu, J.** (1999). Bonev, I.A., and Ryu, J., 1999, “Workspace Analysis of 6-PRRS Parallel Manipulators Based on the Vertex Space Concept,” *Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Las Vegas, NV, USA, DETC99/DAC-86471-54.
- [258] **Tsai, K.Y., Lin, J.C.** (2006). Determining the compatible orientation workspace of Stewart–Gough parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory* 41, 1168–1184.
- [259] **Blaise, J., Bonev, İ., Monsarrat, B., Briot, S., Lambert, J.M.** (2010). Kinematic characterisation of hexapods for industry, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 37 Iss: 1, 79 - 88.
- [260] **Shah, H., Narayanan, M.S., Krovi, V.N.** (2010). CAD-Enhanced Workspace Optimization for Parallel Manipulators: A Case Study, *6th annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, 816-821.
- [261] Electromechanical Linear Actuator C90L360B, Alındığı tarih: 10.7.2011, adres:<http://www.moog.com/products/actuators->

servoactuators/defense/military-ground-vehicles/electromechanical-linear-actuator-c90l360b/

EKLER

EK A: Düzlemsel SPM'nin Tüm Çalışma Uzayını Belirlemek Amacıyla Yazılan (Geliştirilen Yöntem Esaslı) Fortran Kodu.

EK B: Düzlemsel SPM'nin Sabit Yönelim Çalışma Uzayını Belirlemek Amacıyla Geliştirilen Fortran Kodu.

EK C: Geliştirilen Geometrik Yöntem için Yazılan 6-3 SPM Çalışma Uzayı MATLAB kodu.

EK A: Düzlemsel SPM'nin Tüm Çalışma Uzayını Belirlemek Amacıyla Yazılan
(Geliştirilen Yöntem Esaslı) Fortran Kodu

ccccccc bu program planar mekanizmanın tüm çalışma uzayını ccccccc çıkartır.
ccccccc Bacak boylarına bağlı olarak p1 ve p2 noktaları ve ağırlık ccccccc merkezi
bulunur.

CCCCC 2 BACAK + 1 BACAKLI KONFIGURASYON

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

open(1,file="xryr.dat")

open(2,file="xryr2.dat")

ccccc bacak bağlantı koord. ve mn mx bacak boyları

d=2.; xa=0.; ya=0.; xb=1.; yb=0.; xc=3.; yc=0.;

xlmn=1.; xlmx=1.5;

cccccc ADIM DEGERI ve mn mx ACI CCCCCC

dl=0.02; pi=4*atan(1.0); fimnx=pi/6;

ab=xb-xa

CCCCCC bacak uzunluklarını değiştirerek ÇU hesabı CCCCCC

NS=nint((xlmx-xlmn)/dl)+1

write(*,*)(xlmx-xlmn),dl,NS

xl1=xlmn-dl

do i=1,NS

xl1=xl1+dl

xl2=xlmn-dl

ccc xl2=0

do j=1,NS

xl2=xl2+dl

xl3=xlmn-dl

do k=1,NS

xl3=xl3+dl

ccc write(*,*)i,j,xl1,xl2,xl3

ccccc xl1 xl2 kesişim noktası xo yo ve xl1 xl2 bacak açısı kontrol ccccccc

xo=ab-(xl2**2-xl1**2+ab**2)/(2*ab)

if((xl1**2-xo**2).lt.0.) goto 10

yo=sqrt(xl1**2-xo**2)

fi1=atan(abs(yo/xo))

```

        fi2=atan(yo/abs(ab-xo))

c          write(*,39)xo,yo,xl1,xl2,xl3,fi1,fi2,fimnx
c          read(*,*)
          if(fi1.lt.fimnx.or.fi2.lt.fimnx) goto 10
ccc       if(fi1.lt.fimnx) goto 10

cccccc xo yo merkezli çember ile C merkezli çemberin kesişimi
        C1=2*(xc-xo)
        C2=d**2-xl3**2+xc**2-xo**2+yc**2-yo**2
        C3=2*(yo-yc)
        C4=C2/C1
        C5=C3/C1

        aa=C5**2+1
        bb=2*(C4*C5-yo-C5*xo)
        cc=C4**2-2*xo*C4+xo**2+yo**2-d**2

        delta=bb**2-4*aa*cc
        if(delta.lt.0.)goto 10

        yr1=(-bb+sqrt(delta))/(2*aa)
        if(yr1.lt.0.)goto 11
        xr1=C4+C5*yr1

c          write(*,39)((xr1+xo)/2),((yr1+yo)/2),xl1,xl2,xl3

        fi3=atan(yr1/(abs(xc-xr1)))
        if(fi3.lt.fimnx) goto 11

c          alp=atan(abs((yr1-yo)/(xr1-xo)))
c          if(alp.gt.0.001)goto 10

c          write(*,*)alp
c          write(2,*)xr1,yr1
        write(1,*)((xr1+xo)/2),((yr1+yo)/2)

ccc          write(*,*)xr1,yr1,((xr1-xo)**2+(yr1-yo)**2),d

11       yr2=(-bb-sqrt(delta))/(2*aa)
ccc       write(2,*)xo,yo
        if(yr2.lt.0.)goto 10
        xr2=C4+C5*yr2

        fi3=atan(yr2/(abs(xc-xr2)))
        if(fi3.lt.fimnx) goto 10

```

```

write(1,*)((xr2+xo)/2),((yr2+yo)/2)

10    enddo
      enddo
      enddo

39    format(10f10.3)
      stop
      end
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

**EK B: Düzlemsel SPM'nın Sabit Yönelim Çalışma Uzayını Belirlemek Amacıyla
Geliştirilen Fortran Kodu**

```
cccccccc Bu program planar mekanizmanın sabit yönelim uzayını çıkartır
cccccccc Bacak boylarına bağlı olarak p1 ve p2 noktaları ve ağırlık merkezi bulunur.
CCCCC 2 BACAK + 1 BACAKLI KONFIGURASYON
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
      real l1,l2,l3,lmn,lmx,hmn
      open(1,file="xryr.dat")
cccccc bacak bağlantı koord. ve mn mx bacak boyları
      d=2.; xa=0.; ya=0.; xb=1.; yb=0.; xc=3.; yc=0.;
      Lmn=1.; Lmx=1.5; hmn=0.1; hmx=2.5;
cccccc ADIM DEGERI ve mn mx ACI CCCCCC
      dh=0.01; pi=4*atan(1.0); fimnx=pi/6;ds=0.01
      ab=xb-xa
      ac=xc-xa

      ym=hmn-dh
cccccc sabit platform konum açısı radyan ccccc
      alf=0.0*pi/180
CCCCCC bacak uzunluklarını değiştirerek ÇU hesabı CCCCCCCC
                                                    do while(ym.le.hmx)

      xm1=ac/2-ds
      xm2=ac/2+ds
      ym=ym+dh
      do i=1,200
ccc    write(*,*)i,ym
      xm1=xm1+ds
      xm2=xm2-ds
cc    write(*,*)xm1,xm2,ym
cccccc l1 l2 l3 uzunlukları ve kontrol ccccccccc
      xm=xm1
      xo=xm-d/2*cos(alf)
      xr=xm+d/2*cos(alf)
      yo=ym-d/2*sin(alf)
      yr=ym+d/2*sin(alf)
c      write(*,*)xm,xo,xr,yo,yr
```

```

l1=sqrt((xo-xa)**2+(yo-ya)**2)
l2=sqrt((xo-xb)**2+(yo-yb)**2)
l3=sqrt((xr-xc)**2+(yr-yc)**2)

if(l1.lt.Lmn.or.l2.lt.Lmn.or.l3.lt.Lmn) goto 50
if(l1.gt.Lmx.or.l2.gt.Lmx.or.l3.gt.Lmx) goto 50

if(xo.eq.0.0)then
fi1=pi/2
goto 60
endif
fi1=atan(yo/abs(xo))

60  if((ab-xo).eq.0.0)then
fi2=pi/2
goto 61
endif
fi2=atan(yo/abs(ab-xo))

61  if((xc-xr).eq.0.0)then
fi3=pi/2
goto 62
endif
fi3=atan(yr/(abs(xc-xr)))
c   write(*,*)fi1,fi2,fi3

62  if(fi1.lt.fimnx.or.fi2.lt.fimnx.or.fi3.lt.fimnx) goto 50

write(1,*)xm,ym
cccccccccccccccccccccccccccccc
50  xm=xm2
    xo=xm-d/2*cos(alf)
    xr=xm+d/2*cos(alf)
    yo=ym-d/2*sin(alf)
    yr=ym+d/2*sin(alf)

l1=sqrt((xo-xa)**2+(yo-ya)**2)
l2=sqrt((xo-xb)**2+(yo-yb)**2)
l3=sqrt((xr-xc)**2+(yr-yc)**2)

if(l1.lt.Lmn.or.l2.lt.Lmn.or.l3.lt.Lmn) goto 20
if(l1.gt.Lmx.or.l2.gt.Lmx.or.l3.gt.Lmx) goto 20

if(xo.eq.0.0)then
fi1=pi/2
goto 70
endif

```

```

        fi1=atan(yo/abs(xo))
70      if((ab-xo).eq.0.0)then
        fi2=pi/2
        goto 71
      endif
        fi2=atan(yo/abs(ab-xo))
71      if((xc-xr).eq.0.0)then
        fi3=pi/2
        goto 72
      endif
        fi3=atan(yr/(abs(xc-xr)))
c      write(*,*)fi1,fi2,fi3

72      if(fi1.lt.fimnx.or.fi2.lt.fimnx.or.fi3.lt.fimnx) goto 20
ccc    write(*,*)xm,l1,l2,l3
        write(1,*)xm,ym

20                                          enddo

        enddo

        stop
        end
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

EK C: Geliştirilen Geometrik Yöntem için Yazılan 6-3 SPM Çalışma Uzayı
MATLAB kodu

```
clc
clear
tic
%a1,b1,c1 merkezli d yarıçaplı küre.....
%%%%n2 de: Birinci bacak ve ikinci bacağın üst platformda birleştiği
%%%%bağlantı noktası ile her iki bacağı birleştiren doğru parçası üzerinde
% merkezi oluşan r1 yarıçaplı küre ile bu üst platform birinci noktasının
(a1,b1,c1)koordinatlarının, oluşan düzlem ile xy düzlemi arasında oluşan fi açısının
ve bacak boylarının (L1 ve L2)değiştirilerek saptanması ve çizdirilmesi
%r2 yarıçaplı çemberin oluşturulması

alp1=150*pi/180; alp2=30*pi/180; d1=1; fmn=45*pi/180;fmin=60*pi/180;
fmax=100*pi/180;
dl=0.01; df=1*pi/180; Lmin=1.; Lmax=1.02; La=1;Lc=La; f1=fmin-df;

xx1=cos(pi/6);yy1=0; xx2=2*xx1;yy2=sin(pi/6);
xx3=xx2;yy3=yy2+1;xx4=xx1;yy4=yy3+sin(pi/6);
xx5=0;yy5=yy3;xx6=0;yy6=yy2;
inok=0;
%Sabit platformun normali
spa=[0 0 1];

i=0;
while f1<=fmax;
    f1=f1+df;
    acid=f1*180/pi
    L1=Lmin-dl;
    while L1<=Lmax;
        L1=L1+dl;
        L2=Lmin-dl;
        while L2<=Lmax;
            L2=L2+dl;
        end
    end
    i=i+1;
```

```

%1,4 ve 6 nolu bacakların sabit platform bağlantı noktalarının küre merkezlerine
(O1,O2 ve O3)uzaklıkları
Lb1=(La^2+L1^2-L2^2)/(2*La);
%bacakların birleştiği üst platform bağlantı noktaları P lerin oluşturduğu kürelerin
yarıçapları r1,r2,r3
r1=sqrt(L1^2-Lb1^2);
%küre merkezlerinin koordinatları
xo1=xx1+Lb1*cos(pi-alp1);
yo1=yy1+Lb1*sin(pi-alp1);
%bacakların bağlantı noktaları(P1,P2,P3)ile sabit platformdaki bacak bağlantı
noktaları arasında oluşan düzlemin xy düzlemi ile yaptığı açı fi;

```

```

%Üst platformun birinci köşesi ve ikinci köşesi arasındaki mesafe bağıntısı u1=(aa1 -
aa2)^2+(b1-b2)^2+(c1-c2)^2-d^2 ile u1 fonksiyonunu tanımlıyoruz.

```

```

a1=xo1-r1*cos(f1)*sin(pi-alp1);
b1=yo1+r1*cos(f1)*cos(pi-alp1);
c1=r1*sin(f1);
%birinci grup bacakların sabit düzlem ile mafsalsal açıları
p1=[a1 b1 c1];
n1=[(a1-xx1) (b1-yy1) (c1-0)];n1=n1/norm(n1);
n2=[(a1-xx2) (b1-yy2) (c1-0)];n2=n2/norm(n2);
aci1=acos(dot(n1,spa));
aci2=acos(dot(n2,spa));
%Mafsalsal açıları sağlanıyorsa işleme devam et
if aci1 && aci2 <=fmn
%İkinci grup bacaklar için
ii=0;
L3=Lmin-dl;
while L3<=Lmax;
L3=L3+dl;
L4=Lmin-dl;
while L4<=Lmax;
L4=L4+dl;
ii=ii+1;

```

```

%1,4 ve 6 nolu bacakların sabit platform bağlantı noktalarının küre merkezlerine
(O1,O2 ve O3)uzaklıkları
Lb3=(La^2+L3^2-L4^2)/(2*La);
%bacakların birleştiği üst platform bağlantı noktaları P lerin oluşturduğu kürelerin
yarıçapları r1,r2,r3
r2=sqrt(L3^2-Lb3^2);
%küre merkezlerinin koordinatları
xo2=xx3+Lb3*cos(pi-alp2);
yo2=yy3+Lb3*sin(pi-alp2);

```

```

%bacakların bağlantı noktaları(P1,P2,P3)ile sabit platformdaki bacak bağlantı
noktaları arasında oluşan düzlemin xy düzlemi ile yaptığı açı fi;

```

%nr3 de: hesaplanan hareketli platformun izdüşümü çember ile ikinci köşenin izdüşümü çemberi birleştiren doğrunun ilk çemberi kestiği noktaların saptanması

$m = \tan(\pi/2 - \alpha_2)$;

$k = y_{o2} - m \cdot x_{o2}$;

%kürenin izdüşümü çemberle $y = mx + b$ doğrusunun kesişimi, disc denklemin

%discriminantı

$a = 1 + m^2$;

$b = -[2 \cdot a_1 - 2 \cdot m \cdot (k - b_1)]$;

$c = (k - b_1)^2 - d_1^2 + a_1^2$;

$disc = b^2 - 4 \cdot a \cdot c$;

if $disc \geq 0$ %iki kök var tx1 ve tx2

$tx1 = 0.5 \cdot (-b + \sqrt{disc}) / a$;

$tx2 = 0.5 \cdot (-b - \sqrt{disc}) / a$;

$ty1 = m \cdot tx1 + k$;

$ty2 = m \cdot tx2 + k$;

$t1 = (tx1 - x_{o2}) / \sin(\alpha_2)$;

$t2 = (tx2 - x_{o2}) / \sin(\alpha_2)$;

$dy = \text{abs}(ty1 - ty2)$;

$dx = \text{abs}(tx1 - tx2)$;

$r = \sqrt{dx^2 + dy^2} / 2$;

$t0 = (t2 + t1) / 2$;

$teta = \text{atan}(\text{abs}(c1 / t0))$;

$tet = \pi - teta$;

$l = \sqrt{c1^2 + t0^2}$;

if $(r + r2) > l$

if $(\text{abs}(t0) + r) > r2$

if $(l + r2) > r$

$aa = (r^2 - r2^2 + l^2) / (2 \cdot l)$;

$bb = l - aa$;

$h = \sqrt{r^2 - aa^2}$;

$tp2 = bb \cdot \cos(tet)$;

$zp2 = bb \cdot \sin(teta)$;

$ta = tp2 + h \cdot \sin(teta)$;

$za = zp2 + h \cdot \cos(teta)$; %a noktasının yükseliği (fa için)

$tb = tp2 - h \cdot \sin(teta)$;

$zb = zp2 - h \cdot \cos(teta)$; % b noktasının yüksekliği (fb için)

$xa = x_{o2} + ta \cdot \sin(\alpha_2)$;

$ya = y_{o2} + ta \cdot \cos(\alpha_2)$;

$xb = x_{o2} + tb \cdot \sin(\alpha_2)$;

$yb = y_{o2} + tb \cdot \cos(\alpha_2)$;

%xa, ya, za fa açısı küre ile tz düzleminde oluşan kesişim çemberinin merkezi

%z=c1 yüksekliğinde

%t-z eksen takımında oluşan düzlem açıları iki değer veriyor. Burada

```
%bulduğumuz koordinatlar birinci köşeden d uzaklıkta olan (bu şartı
%sağlayan)ikinci köşenin olası koordinatları
```

```
fa=asin(za/r2);
fb=asin(zb/r2);
```

```
%İkinci bacak grubu bacakların sabit platform ile mafsalları
%Mafsalları sağlanıyorsa işleme devam et
```

```
m=0;
```

```
%Birinci çözüm
```

```
n3=[(xa-xx3) (ya-yy3) (za-0)];n3=n3/norm(n3);
n4=[(xa-xx4) (ya-yy4) (za-0)];n4=n4/norm(n4);
aci3=acos(dot(n3,spa));
aci4=acos(dot(n4,spa));
```

```
if aci3 && aci4 <=fmn
    m=m+1;
    ra(m)=xa;rb(m)=ya;rc(m)=za;
```

```
end
```

```
%ikinci çözüm
```

```
n3=[(xb-xx3) (yb-yy3) (zb-0)];n3=n3/norm(n3);
n4=[(xb-xx4) (yb-yy4) (zb-0)];n4=n4/norm(n4);
aci3=acos(dot(n3,spa));
aci4=acos(dot(n4,spa));
```

```
if aci3 && aci4 <=fmn
    m=m+1;
    ra(m)=xb;rb(m)=yb;rc(m)=zb;
```

```
end
```

```
for kk=1:m
    a2=ra(m);b2=rb(m);c2=rc(m);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%a1,b1,c1 birinci grup bağlantı noktası
```

```
%a2,b2,c2 ikinci grup bağlantı noktası
```

```
%a3,b3,c3 üçüncü grup bağlantı noktası
```

```
%%%%%%%% Birinci ve ikinci grup bağlantı noktalarını birleştiren doğrunun
```

```
%%%%%%%% a0,b0,c0 noktasında yeni (x',y',z') eksen takımı tanımlanır
```

```
%hareketli platform 1-2 kenarı ile 3 noktası arasındaki dik mesafe
```

```
% X' uzayındaki çemberin yarıçapı ru
```

```
ru=d1*sqrt(3.)/2;
```

```
%üçüncü grup bacaklar için
```

```
a0=(a1+a2)/2; b0=(b1+b2)/2; c0=(c1+c2)/2;
uu=sqrt((a1-a2)^2+(b1-b2)^2);
```

```

% gama ve beta açıları
gama=atan(((a1-a2)/(b1-b2)));
beta=atan(((c1-c2)/uu));
% X' uzayından X uzayına Dönüşüm matrisi AD
alf1=gama;
alf3=beta;

AD1=[cos(alf1) -sin(alf1) 0;sin(alf1) cos(alf1) 0;0 0 1];
AD3=[1 0 0;0 cos(alf3) -sin(alf3);0 sin(alf3) cos(alf3)];
AD=inv(AD3*AD1);

% X' uzayına dönüştürülmüş 5 ve 6 noktaları
ba5=[xx5; yy5; 0];
ba6=[xx6; yy6; 0];
ba0=[a0;b0;c0];

ba5u=inv(AD)*(ba5-ba0);
ba6u=inv(AD)*(ba6-ba0);

p1=[a1 b1 c1];
p2=[a2 b2 c2];
pu1=inv(AD)*(p1'-ba0);
pu2=inv(AD)*(p2'-ba0);

yps=180;
dw=pi/yps;
w1=-dw;
for k=1:(2*yps+1)
    w1=w1+dw;

xu=-ru*cos(w1);
zu=ru*sin(w1);
bu=[xu;0;zu];

n3=ba0+AD*bu;

a3=n3(1);
b3=n3(2);
c3=n3(3);

ll5=sqrt((n3(1)-xx5)^2+(n3(2)-yy5)^2+(n3(3)-0)^2);
ll6=sqrt((n3(1)-xx6)^2+(n3(2)-yy6)^2+(n3(3)-0)^2);
% Üçüncü grup bacaklar için uzunluk koşulları sağlanıyorsa devam et
if ll5>=Lmin & ll6>=Lmin
    if ll5<=Lmax & ll6<=Lmax
        Lb6=(ll6^2+Lc^2-ll5^2)/(2*Lc);
        r3=sqrt(ll6^2-Lb6^2);

%Hareketli platformun ağırlık merkezi

```

```
%ao=2*a0/3+a3/2;bo=2*b0/3+b3/2;co=2*c0/3+c3/2;
%ao=(a0+a3)/2;bo=(b0+b3)/2;co=(c0+c3)/2;
ao=2*a0/3+a3/3;bo=2*b0/3+b3/3;co=2*c0/3+c3/3;
```

```
%%%%%%%%%%%%%% hareketli platform ile bacak açılarının bulunması
```

```
%%%%%%%%%%%%%% yüzey
```

```
x(1)=xx1;y(1)=yy1;z(1)=0;
x(2)=a1;y(2)=b1;z(2)=c1;
x(3)=xx2;y(3)=yy2;z(3)=0;
```

```
p2=[a2 b2 c2];
p3=[a3 b3 c3];
ny=cross((p2-p1),(p3-p1));
ny= ny/norm(ny);
norm(ny);
%ny(3)=-ny(3);
```

```
n3=[(a2-xx3) (b2-yy3) (c2-0)];n3=n3/norm(n3);
n4=[(a2-xx4) (b2-yy4) (c2-0)];n4=n4/norm(n4);
n5=[(a3-xx5) (b3-yy5) (c3-0)];n5=n5/norm(n5);
n6=[(a3-xx6) (b3-yy6) (c3-0)];n6=n6/norm(n6);
```

```
%Üçüncü grup ayakların sabit platform ile mafsalları
```

```
aci=acos(dot(n5,spa));
if aci<=fmn
aci=acos(dot(n6,spa));
if aci<=fmn
```

```
%%%%%%%%%%%%%%
```

```
aci=acos(dot(n5,ny));
if aci<=fmn
aci=acos(dot(n6,ny));
if aci<=fmn
aci=acos(dot(n1,ny));
if aci<=fmn
aci=acos(dot(n2,ny));
if aci<=fmn
aci=acos(dot(n3,ny));
if aci<=fmn
aci=acos(dot(n4,ny));
if aci<=fmn
```

```
inok=inok+1;
```

```
hold on
```

```
%plot3(x,y,z,'b')
```

```
%x(1)=xx3;y(1)=yy3;z(1)=0;
%x(2)=a2;y(2)=b2;z(2)=c2;
%x(3)=xx4;y(3)=yy4;z(3)=0;
```

```
%plot3(x,y,z,'g')
```

```
%x(1)=xx5;y(1)=yy5;z(1)=0;
%x(2)=a3;y(2)=b3;z(2)=c3;
%x(3)=xx6;y(3)=yy6;z(3)=0;
```

```
%plot3(x,y,z,'y')
```

```
%xt(1)=a1;yt(1)=b1;zt(1)=c1;
%xt(2)=a2;yt(2)=b2;zt(2)=c2;
%xt(3)=a3;yt(3)=b3;zt(3)=c3;
%xt(4)=a1;yt(4)=b1;zt(4)=c1;
```

```
%plot3(xt,yt,zt,'r')
```

```
%hold on
%plot3(a3,b3,c3,'g.')
plot3(ao,bo,co,'k.')
end
```

```
end
end
end
end
end
end
```

```
end
end
```

```
%ao=2*a0/3+a3/2;bo=2*b0/3+b3/2;co=2*c0/3+c3/2;
```

```
%hold on
%plot3(a1,b1,c1,'r+')
%plot3(a3,b3,c3,'b*')
%plot3(ao,bo,co,'g.')
end
```

```
end
end
```

```
end
%%%%%%%%%%%%%%
end
end
end
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%
```

```
end
end
end
end
    end
    end
end
    inok=inok
end
```

```
toc
```


ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Serdar AY
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 05.03.1971
Adres: Hava Harp Okulu Dekanlık-Yeşilyurt-İstanbul
E-Posta: say@hho.edu.tr
Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi
Yüksek Lisans : Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Mesleki Deneyim ve Ödüller: 1'inci ve 2'nci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlıkları'nda çeşitli yöneticilik/proje subaylığı ile Hava Harp Okulu'nda akademisyenlik.

Yayın ve Patent Listesi: -

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Ay S., Vatandaş E., Hacıoğlu A.,2012: Determination of the Reachable Workspace of 6-3 Stewart Platform Mechanism. International Conference of Mechanical Engineering 2012, July 04-06, 2012 Imperial College London, England.
- Ay S., Vatandaş E., Hacıoğlu A.,2011: A novel geometrical approach to determining the workspace of 6-3 Stewart Platform Mechanism. Recent Advances of Space Technologies 2011, June 09-11, İstanbul, Turkey, 95-100.
- Ay S., Vatandaş E., Hacıoğlu A.,2011: Yeni Bir Geometrik Yaklaşımla Stewart Platform Mekanizmasının Kinematik İncelemesi. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu 2011, 16-18 Haziran 2011 Niğde Üniversitesi.
- Ay S., Vatandaş E., Hacıoğlu A.,2009: The Effect of Radius of Joint Location on Workspace Analysis of The 6-6 Stewart Platform Mechanism. Recent Advances of Space Technologies 2009, June 04-06, 2009 İstanbul, Turkey, 728-731.