
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

İLAVE BACAKLI ALTI SERBESTLİK DERECELİ PARALEL MANİPÜLATÖR ANALİZİ

Mohammad Juma SADEQI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2016

Mohammad Juma SADEQI tarafından hazırlanan "İLAVE BACAKLI ALTI SERBESTLİK DERECELİ PARALEL MANİPÜLATÖR" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ali SAYGIN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum .....

Başkan : Doç. Dr. Mahir DURSUN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum .....

Üye : Doç. Dr. Uğur GÜVENÇ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum .....

Tez Savunma Tarihi: 15/01/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mohammad Juma SADEQI

15/01/2016

İLAVE BACAKLI ALTI SERBESTLİK DERECELİ PARALEL MANİPÜLATÖR ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mohammad Juma SADEQI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2015

ÖZET

Paralel manipülatörler sivil ve askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde 3 ve ya 6 serbestlik derecesine göre manipülatörlerin tasarımları ve matematiksel modeller oluşturulmuştur. Yapılan bu tez çalışmasında 6 serbestlik derecesine sahip paralel manipülatör merkezine sabit bacak eklenmiştir. Merkezdeki sabit bacak sayesinde hareketli üst platforma ağır yükler ve askeri atış sistemlerinin eklenebilmesi amaçlanmıştır. Benzer şekilde ağır yüklerin titreşim testlerinin yapılabilmesine imkan sağlanmıştır. Ağır yükler için tasarlanan manipülatörün çalışma uzayında hareket sınırları incelenmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak merkeze eklenen sabit bacağa ait ters kinematik matematiksel model geliştirilmiştir ve benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Bilim Kodu : 90519
Anahtar Kelimeler : 6 DOF, Paralel Manipülatör, Ters Kinematik, Simülasyon

Sayfa Adedi : 79
Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ali SAYGIN

THE ANALYSIS OF 6 DEGREES OF FREEDOM PARALLEL MANIPULATOR WITH A FIXED LIMB

(M. Sc. Thesis)

Mohammad Juma SADEQI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2016

ABSTRACT

Parallel manipulator is widely used in civilian and military areas. According to the 3 or 6 degrees of freedom, a different type of parallel manipulator is designed. In this study, for 6 degrees of freedom parallel manipulator, an extra rigid limb is added. The added constant limb is aimed at heavy-load condition and military firing system. The designed manipulator workspace field is printed for heavy-load condition. In comparison with the other studies, a rigid extra limb is added in the middle of manipulator between the top and base platforms, then the inverse kinematic of model is developed and the model is simulated.

Science Code : 90519
Key Words : 6 DOF, Parallel Manipulator, Inverse Kinematics, Simulation

Page Number : 79
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Ali SAYGIN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katakılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali SAYGIN ‘a, bilgi birikimimin artmasında önemli katkılara sahip olan sayın hocalarımıza, benden maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca maddi ve manevi desteklerinden dolayı devletimiz Afganistan İslamic Cumhuriyet’e de çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. MEKANİZMALAR 5

2.1. Mekanizmalar 5

2.2. Paralel Mekanizmalar 6

2.3. Paralel ve Seri Mekanizmaların Karşılatırılması 7

2.4. Stewart Platform Mekanizması 9

2.4.1. Stewart platform mekanizmasının (SPM) kullanım alanı 10

2.4.2. Uçuş simülatöründe SPM kullanımı 10

2.4.3. Oyun simülatöründe SPM kullanımı 11

2.4.4. Uzay çalışmalarında SPM kullanımı 12

2.4.5. İnsansız hava araçlarında SPM kullanımı 14

2.4.6. Tıpta SPM kullanımı 14

2.4.7. Manipülatörde SPM kullanımı 15

2.4.8. Ölçüm cihazlarında SPM kullanımı 16

2.4.9. CNC tezgahlarda SPM kullanımı 17

2.4.10. Üç boyutlu (3D) yazıcılarda SPM kullanımı 18

2.5. Önerilen 6 DOF PM+1 Sabit Bacak Mekanizması (Mimarısı)..... 19

Sayfa

2.5.1. Modelin geometriği..... 20

3. ANALİZ..... 22

3.1. Kinematik Analiz..... 22

3.2. 3X3 SPM+1 Sabit Bacak Ters Kinematik Analizi..... 22

3.3. Düz Kinematik Analiz..... 27

3.3.1. 3X3 artı 1 sabit bacak ile SPM düz kinematik problemin bezuot metodu ile çözümü..... 31

3.4. Mekanizmanın Çalışma Uzayı..... 35

4. MEKANİK TASARIM VE DOĞRULAMA..... 38

4.1. SolidWork Çalışmaları..... 39

4.1.1. Sabit platfrom..... 39

4.1.2. Bacak bağlantı arayüzü..... 40

4.1.3. Hareket eklem noktası..... 41

4.1.4. Sabit bacak hareket eklem noktası..... 42

4.1.5. Silindir..... 43

4.1.6. Sabit bacak..... 44

4.1.7. Hareket platformu..... 45

4.2. Altı DOF Stewart Platformu Bir Sabit Bacaklı 3D Modeli..... 46

4.3. SolidWork'tan SimMechanich'a Aktarım..... 47

4.4. Matlab'da Model Çalışmalrı..... 48

4.5. Matlab'da Benzetim Çalışmaları..... 55

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME..... 62

KAYNAKLAR..... 63

EKLER..... 68

EK-1. Ters kinematik saysal örnek 69

Sayfa

EK-2. D_i , E_i , F_i ve G_i , H_i , I_i açık ifadeleri 71

EK-3. K_i açık ifadeleri 73

EK-4. Çalışma uzayı kodları 74

ÖZGEÇMİŞ 79

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. KUKA endüstriyel seri manipülatör 5

Şekil 2.2. Stewart platform mekanizması 6

Şekil 2.3. Üç serbestlik dereceli RRR “Agile Eye” 7

Şekil 2.4. Üç serbestlik dereceli PRRR “Tripteron” 7

Şekil 2.1. Stewart platform mekanizması 9

Şekil 2.2. Örnek bir uçuş simülatörü (Havelsan CN 235 Simülatörü) 10

Şekil 2.3. Oyun simülatöründe SPM’nin kullanımı 11

Şekil 2.4. Uzay teleskobunda SPM kullanımı (PI) 12

Şekil 2.5. Uydu çanağında SPM kullanımı (PI) 13

Şekil 2.6. Stewart platfrom manipülatör artı seri manipülatör 14

Şekil 2.7. Da-Vinci ameliyat robotu 15

Şekil 2.8. Stewart platformunun ağır kullanım modülü 16

Şekil 2.9. Stewart platformunun ölçüm cihazı olarak kullanımı 17

Şekil 2.10. CNC tezgahında SPM kullanımı 18

Şekil 2.15. Üç boyutlu yazıcıda SPM kullanımı 19

Şekil 2.16. 3X3 6-DOF PM+bir sabit bacak şematik gösterimi 20

Şekil 2.17. Sabit bacak geometriği 21

Şekil 3.1. Kinematik analiz modeli 24

Şekil 3.2. Altı serbestlik denereli paralel manipülatörün görseli 25

Şekil 3.3 Eyleyici vektörünün bulunması 27

Şekil 3.4. X ekseninde 35 derece,Y ekseninde 35 derece, uzunluğu 2 metre manipülatör konumu 28

Şekil 3.5. 3X3 SP artı bir sabıt bacağın kinematik eşdeğeri 30

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.6. Vektör yerleşimi 30

Şekil 3.7. Kenar uzunluklar 31

Şekil 3.7. Koordinat sisteminin tanımı ve alt platkanın taban açıları 32

Şekil 3.8. Vektörlerinin tanımları 33

Şekil 3.9. Hareketli üst platform X ve Y eksenlerde 30° de 37

Şekil 3.10. Üç eksen hareket uzayı 38

Şekil 3.11. İki eksen hareket uzayı 38

Şekil 4.1. Sabit platformun 3D modeli 39

Şekil 4.2. Bacak bağlantı arayüzü 40

Şekil 4.3. Hareket eklem noktası 41

Şekil 4.4. Sabit bacak ile hareketli platform arasında kullanılan eklem noktası 42

Şekil 4.5. Silindirin 3D ebatları 43

Şekil 4.6. Sabit bacağın 3D ebatları 44

Şekil 4.7. Hareketli platformun 3D ebatları 45

Şekil 4.8. Stewart platformunun 3D ebatları 46

Şekil 4.9. SolidWorks'ta stewart platformu 47

Şekil 4.10. Paralel manipülatör modeli 48

Şekil 4.11. Bacak uzunlukları vektörü 49

Şekil 4.12. Sinüs sinyal formu 50

Şekil 4.13. PID denetleyici 51

Şekil 4.14. Paralel manipülatör (stewart platform) 3 boyutlu modeli 51

Şekil 4.15. Paralel manipülatörün mekanik modeli 52

Şekil 4.16. Hareketli üst platform modeli 53

Şekil 4.17. Hareketli üst platform bağlantı noktası modeli 53

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.18. Silindir modeli 54

Şekil 4.19. Alt platform bağlantı noktası modeli 54

Şekil 4.20. Sabit alt platform modeli 55

Şekil 4.21. Pozisyon grafikleri, bacak 1-3 56

Şekil 4.22. Pozisyon grafikleri, bacak 4-6 56

Şekil 4.23. Hız grafikleri, bacak 1-3 57

Şekil 4.24. Hız grafikleri, bacak 4-6 57

Şekil 4.25. Tüm bacak pozisyon grafikleri 58

Şekil 4.26. Tüm bacak hız grafikleri 58

Şekil 4.27. Silindirlerin 0.5 Hz de pozisyon değişimleri 59

Şekil 4.28. Silindirlerin 0.5 Hz de hız değişimleri 59

Şekil 4.29. Silindirlerin 1 Hz de pozisyon değişimleri 60

Şekil 4.30. Silindirlerin 0.5 Hz de hız değişimleri 60

Şekil 4.31. Silindirlerin 0.5 Hz de denetleyici olmaksızın pozisyon değişimleri 61

Şekil 4.32. Silindirlerin 0.5 Hz de denetleyici olmaksızın hız değişimleri 61

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
3D	Üç boyutlu
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CNC	Computed Numerically Controlled
DOF	Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)
H	Hız
Hz	Herz
K	Kuvvet
Kd	Türev Kazancı Katsayısı
Ki	İntegral Kazancı Katsayısı
Kp	Oransal (Orantı) Katsayısı
PID	Oransal-İntegral-Türev modu
PM	Paralel Manipölatür
Poz	Pozisyon
SP	Stewart Platform
SPM	Stewart Platform Mekanizma
XML	Genişletilebilir İşaretleme Dilli

1. GİRİŞ

Paralel manipülatör (mekanizma) bir kapalı kinematik zincirdir. Manipülatörde, platformun tüm kolları üst yüzey ile alt noktalar arasında paralel olarak bağlanmaktadır. Bu bağlantı yüksek hassasiyet ve yüksek hıza izin vermektedir. Paralel ve seri kinematik manipülatörler bulunmaktadır. Paralel kinematik manipülatör seri kinematik manipülatör ile karşılaştırdığında yüksek bir doğruluk derecesi açısından daha iyi performans ve yüksek hıza (ivme) sahip olmaktadır. Bu nedenle paralel manipülatörler endüstriyel uygulanmalara daha uygundur. Örnek olarak kaldırma-ve-yerleşme ve yüksek hızda işlemelerde kullanılmaktadır. Ayrıca, simülasyon sistemlerde, otomasyon alanlarda, mekanizmalarda, konumlandırma araçlarında, yürüyüş makinelerinde, radyo teleskoplarında, medikal tıp uygulamalarında yaygın kullanılmaktadır.

Paralel manipülatörler(PM) serbestlik derecesine göre isim almaktadır. Yaygın olarak 3 ve 6 serbestlik derecesi kullanılmaktadır. Popüler paralel manipülatörlerden biri altı derece serbestlik dereceli(6-Degree of Freedom-DOF) Stewart Platformu'dur. Stewart platformu (SP) 1965 yılında Stewart tarafından uzay simülatörü olarak önermiştir. SP bir üst plaka (hareketli platform), bir alt plaka (sabit platform) ve altı adet genişletilebilir bacak ile üst plaka alt plakaya bağlanmaktadır [1]. Sonraki yıllarda değişik platform çalışmaları yapılmıştır.

Zhiyong Qu ve Zhengmao Ye yaptıkları çalışmada 3 serbestlik dereceli 3-DOF paralel manipülatör' ün (PM) kinematik analizini anlatmışlardır [2]. Lung-Wen, Tsai ve Sameer Joshi 3-DOF pozisyon mekanizmaları için yeni bir kinematik mimarisi sunarak melez kinematik makina adını vermişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada dört tip mekanizmanın çalışma uzayı ve sertlik özeliklerini karşılaştırdıktan sonra, 3-RUU (Revolute Universal Universal Jionts) manipülatör için dört tip mimari içerinden en güzel tasarımı elde etmişlerdir [3]. Yangmin Li ve Qingsong Xu da 3-DOF PM'un farklı tiplerde kinematik analizler üzerinde çalışmışlardır [4]. Sameer Joshi ve Lung-Wen Tsai, iki tip 3-DOF PM biri üç bacaklı ve diğeri 3 bacaklı ve bir destekli bacak ile çalışan manipülatörün karşılaştırmasını yapmışlardır. Bu iki mekanizmanın düz kinematiği ve Jacobian Matris analizini karşılaştırdıktan sonra Triceps manipülatör, 3-UPU (P=Prismatic Joint) PM'na göre daha iyi çalışabildiğini savunmuşlardır [5]. Sameer Joshi ve Lung-Wen Tsai bir başka çalışmada, Jacobian Matris'in Reciprocal Screws teoriyi kullanarak, Limitli-DOF Jacobian

analizin üzerinde çalışmıştır. 3-DOF ve 3-RPS (S=Spherical Joint) PM'ün için bir örnek uygulama gerçekleştirmişlerdir [6].

Dan Zhang ve Jianhe Lei, Yapay Zeka yöntemiyle, Yeni 3-DOF bir pasif bacaklı sistemin analizin üzerinde çalışmışlardır. Onlar robotun düz kinematik analizi için farklı akıllı yöntemler uygulanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, v-SVMmetodu ile lineer Kernal fornksiyonu kullanarak paralel manipülatörün en iyi performansını elde etmek için ileri kinematik modelin doğru tahmin edilmesi gerektiğini bulmuşlardır [7].

Dan Zhang ve Zhen Gao, dört ayaklı hünerli maden kurtarma robotun baş bölümü için, 4-UPS+PU mekaniksel melez manipölürün tasarımı, modellemesi ve optimizasyonun üzerinde çalışmışlardır [8].

Huiping Shan, Tingli Yang ve Lv-Zhong Ma, 6-DOF robotlu mekanizmalara kinematik mimari analizi üzerine çalışmışlardır [9]. Feng Gao, Weimin Li, Xianchao Zhao, Zhenlin Jin ve Hui Zhao, çeşitli yapıdaki bileşik bacaklı belirli serbestlik derece üzerinde araştırma yapmışlardır [10]. Yangnian Wu ve Clement Gosselin IEEE'nin üyeleri 3-DOF ve 6-DOF PM için tepkisiz tasarım üzerinde çalışmışlardır [11]. Chifu Yang, Qitao Huang, Jingfeng He, Hongzhou Jiang ve Junwei Han, 6-DOF PM'ün kontrolu modellemişler [12]. Doik Kim, Wankyun Chung ve Youngil Youm, 6-DOF PM'ü analitik temsil determinantli görülmemişliğini analiz etmişlerdir [13]. [14-16] yazarları 6-DOF PM'ün simülasyonu üzerine araştırma yapmışlardır.

Türkiye'de Stewart Platform Mekanizim (SPM) yüzerinde farklı çalışmalar yapılmış olup Onur A. 2005 yılında tamamladığ yüksek lisans tez çalışmasında altı serbestlik derecesine sahip tankın işletimi sırasında alın aynasının maruz kalacağı bozucu etkilerin benzetimini sağlamak amacıyla bir Stewart Platformu geliştirilmiştir [17]. Sarper G. 2006 yılında yüksek lisans tez çalışmasında altı serbestlik dereceli paralel bağlı eyleyicilerden oluşan bir platform tasarlamış, geliştirilmiş ve sanal ortamda benzetimi yapılmış, çalışmada cihaz kara, hava ve deniz araçlarının hareket profillerini laboratuar ortamında gerçekleştirme özelliğini sağlamıştır [18]. Ulucay Ö. 2006 yılında yüksek lisans tez çalışmasında Stewart Platfromun tasarımı ve analizi yapmış, kontrol yöntemi geliştirilmiş ve sistem kurulup test edilerek doğrulanmıştır. Çalışmada minimum 500 nm çözünürlüklü hareket sağlayan ve altı serbestlik derecesine sahip bir Stewart Platform kurulması hedeflenmiş ve yapılan

deneyleri sonunda sistemin hedeflenen 500 nm'den daha iyi bir hassasiyet değerini başardığı gösterilmiş [19]. Ünsal A. 2007 yılında yaptığı tez çalışmasında SP'nın düz ve ters kinematik analizi teorik olarak ifade edilmiş [20]. Yıldız İ. 2007 yıllında yapılan yüksek lisans tez çalışmasında,, 3x3 kuvvet geri beslemeli bir Stewart platformunun kinematik analizi, bağ-grafik modellenmesi ve simülasyonu/Kinematic analysis, bond-graph modelling and simulation of a 3x3 Stewart platform with force feedback incelenmiştir [21].

Kömürlüoğlu H. 2007 yılında belirli bir Stewart Platform mekanizmasının ileri ve geri kinematik analizlerininin matematiksel ifadeleri üzerine çalışmıştır [22]. Cin S. 2007 yılında tamamlanan tez çalışmasında, kuvvet/tork geri beslemeli uzaysal hareket eden araçları kumanda etmek amacıyla bir ara yüz olarak kullanılan Stewart platformu mekanizmasının çalışma uzayı odaklı tasarım incelemesi yapmıştır [23]. Ulaş B. 2009 yılında tamamlanan tez de paralel manipülatörlerin belirlenen tasarım kriterlerini karşılayacak şekilde tasarlanması amacıyla kullanılabilecek yöntemler araştırılmış ve bu yöntemlerin çalışma uzayı, geometrik boyutlar ve uç elemanının taşıyabileceği yüke bağlı eyleyici kuvvetlerinin belirlenmesi amacıyla kullanıbilmesi için takip edilebilecek bir prosedür geliştirmiştir [24]. Güney A. 2010 yılında tamamladığı tez çalışmasında 3X3 Stewart Platformunun uzaysal hareketi, uçak simülatörlerindeki gibi simülasyonu yerine, uzaysal hareket yapan üç öteleme artı üç dönme ekseni herhangi fiziksel cismin tek noktadan Stewart Platform kullanılarak kontrolünü incelemiştir [25].

Kizir S. 2012 yılında tamamladığı tez çalışmasında, geliştirilen SP'nın ileri ve ters kinematiği, dinamık modeli ve Jakobiyen matrisi destek ile altı serbestlik dereceli SP'nın robotik cerrahi alanda haptik arayüzde, kuvvet konum kontrolü ve kuvvet geri belemeli geliştirilmesi amaçlamıştır [26]. Ay S. 2013 yılında tamamladığı doktora tez çalışmasında, 6X3 Stewart Platfrom Mekanizmasının (SPM) çalışma uzayı yeni bir geometrik yaklaşım kullanılarak elde edilmiş olup aynı çalışmada SPM'nın tüm özelliklerini incelenmiştir [27]. Burak Inner A. 2013 yılında tamamladığı tez çalışmasında robot tasarımcıları ve araştırmacıları için bir Genel Stewart Platform (GSM) benzetim aracı (STEWSIM) tasarlanarak gerçekleştirlmiş ve farklı sayıda bacağa sahip olası tüm GSP mekanizmalarının kolaylıkla tasarlanbilmesini sağlayan bağlantı matrisi algoritması geliştirilmiştir [28]. Anlı E., Alp H., N. Yurt S. ve Özkol İ. 2005 yaptıkları çalışmada, paralel mekanizmaların genel özellikleri, kinematik dinamik ve çalışma uzayları hakkında

2005'e kadar yapılan çalışmaların bir özetini makalelerinde sunmuşlar ve ileriye yönelik önerilerde bulunmuşlardır [29]. Dilan R. A., Yaman U., Çalışkan H., Demirer S. ve Balkan T. 2011 çalışmalarında, üç serbestlik derecesine sahip hidrolik bir hareket taklitçisinin kinematik çözümlemesini yapmışlardır [30]. Şahbaz H., Karagülle H. ve Malgaca L. 2007 yılında yaptıkları çalışmada, bir hegzapodu ADLINK PCI hareket kontrol kartlarıyla servo ve adım motorların kontrolü gerçekleştirmişlerdir [31].

Bu çalışmada 6-DOF Stewart Platformuna merkezde bir bacak eklenerek formun düz kinematik analizi amaçlanmıştır. Merkez noktaya yerleştirilen rijid ayak ile üst tabla üzerine yerleştirilecek ağır yüklerin eyleyicilere aşırı yüklenmesi engellenmesi amaçlanmıştır. Merkez noktada bulunan özel bağlantı ayağının imkan sağladığı aralıkta hareket kabiliyeti sınırlanmaktadır.

2. MEKANİZMALAR

Endüstrileşmeye bağlı olarak, kalite ve üretim standartlarının yükseltilmesi için robotlar kullanılmaya başlanmıştır. Robotlar denetleyici kontrollü manipülatördür. Hareket tipine göre ve eklem yapısına göre manipülatörler sınıflandırılmaktadır. Yapıları itibariyle manipülatörler seri ve paralel olmak üzere iki gruba ayrılır.

2.1. Mekanizmalar

Seri mekanizmalar, bir dizi eklemlerden ve bu eklemleri birbirine birleştiren seri bağlardan oluşmuş mekanizmalardır. Seri mekanizmalar, paralel mekanizmalara göre daha basit kinematik denklemlere ve geniş çalışma uzayına sahip olmaları sebebiyle endüstriyel, askeri ve sağlık alanında yaygın olarak tercih edilmiştir. Şekil 2.1 de seri mekanizma örneği verilmiştir [20].



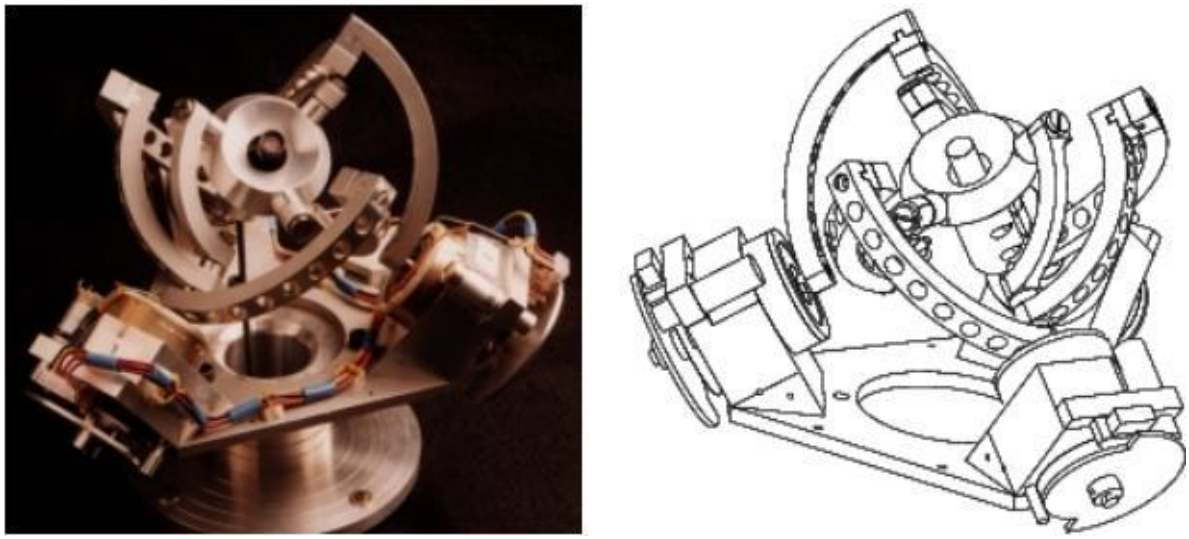
Şekil 2.1. KUKA endüstriyel seri manipülatör [35]

2.2. Paralel Mekanizmalar

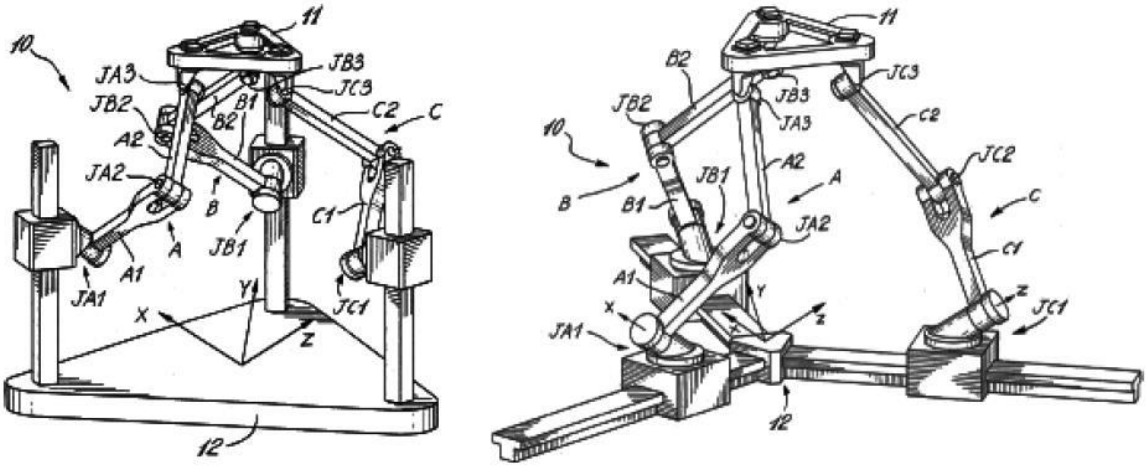
Paralel mekanizmalar, ana çerçeve ile yük arasında birçok paralel bağın bir araya gelmesiyle oluşmuş yapılardır. Başka bir ifadeyle; iki farklı platform arasında en az iki bağımsız kinematik bağ ile bağlandığı mekanizmalardır. Paralel mekanizmalar, sabit ve hareketli platforma eklemlerle bağlıdır. Paralel mekanizmalar bağlarının yalnızca bir kaçı eyleyiciler tarafından hareket ettirilen yapılardır. Kullanılan eyleyiciler bağların boyunu değiştirir. Bu tür kinematik zincirlerin en ünlüsü Stewart Platformudur. Paralel mekanizmalara örnek olarak Stewart Platform Mekanizması Şekil 2.2'de, "Agile Eye" Şekil 2.3'te, "Tripteron" Şekil 2.4'te gösterilebilir.



Şekil 2.11. Stewart platform mekanizması [36]



Şekil 2.12. Üç serbestlik dereceli RRR “agile eye” [37]



Şekil 2.13. Üç serbestlik dereceli PRRR “Tripteron” [21]

2.3. Paralel ve Seri Mekanizmaların Karşılatırılması

Seri mekanizmalarda düz kinematik denklemlerin çözümü kolay olmasına karşın ters kinematik denklemlerin çözümü doğrusal olmayan sistemlerin çözümünü gerektirdiğinden oldukça zordur. Paralel sistemlerde ise ters kinematik denklemlerin çözümü kolayken düz kinematik denklemlerin çözümü karmaşıktır. Statik analizde ise; ters kuvvet çevrimi seri mekanizmalar için kolayken düz kuvvet çevrimi zordur. Diğer taraftan düz kuvvet çevrimi paralel mekanizmalarda kolayken ters kuvvet çevrimi oldukça zordur. Çünkü paralel mekanizmaların her bir ayağı bir seri mekanizma olarak değerlendirilebilir [20].

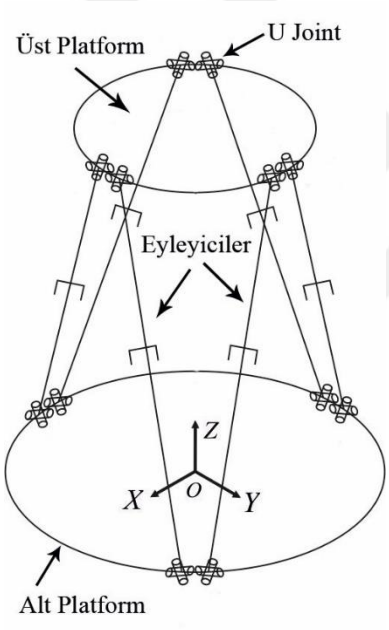
Seri bağlı mekanizmaların geniş çalışma uzayına sahip olmasına karşın hareket ettirilecek veya taşınacak kütlenin mekanizmanın toplam kütlesine oranı düşüktür. Seri mekanizmalar, düşük doğal frekanslara sahip olmaları sebebiyle yüksek hızda ve yüksek yükler altındaki performansları düşüktür. Ayrıca, sabit noktadan uca doğru tüm bağlar, hem kendinden sonraki bağ ve eyleyicilerin ağırlığını taşıyabilecek kadar büyük olması, hem de istenilen hassasiyeti sağlaması gerekmektedir. Seri mekanizmaların bir başka dezavantajı ise, eyleyici ve bağ noktalarında oluşan hatalarının toplanarak uç noktada daha büyük hata toplamı vermesidir.

Paralel bağlı mekanizmalar ise daha dar alanda hareket etmelerine rağmen birçok bağın bir araya gelmesinden dolayı hareket ettirilecek veya taşınacak kütle mekanizmanın toplam kütlesine oranı yüksektir. Kinematik denklemlerinin karmaşık olmasına rağmen hassasiyet bakımından daha üstün oldukları ve doğal frekansları ile kuvvet/ağırlık oranları yüksek olduğundan, paralel mekanizmalar uygulamalarda tercih edilmektedir. Eyleyiciler sabit platforma monte edilmiş olduğundan hareketli parçaların ağırlığı da düşüktür. Ayrıca, sabit platformla hareketli platform arasında paralel eyleyicilerin bağlanması sebebiyle eyleyici hataları uca doğru eklenerek büyümez [25]. Seri mekanizmalara göre bazı üstünlüklerinden dolayı paralel mekanizmalar hareketli simülatörlerde ve tıp robotlarında kullanımı son derece yaygındır.

Mekanizmalar serbestlik derecesine göre isim almaktadır. Seri ve paralel mekanizmalarda serbestlik derecesi tanımı değişmektedir. Seri mekanizmalarda her bir eklemin konumu ve yönelimi bir önceki veya bir sonraki konuma göre ifade edilir. Her bir eklem için homojen dönüşüm matrisi oluşturulur. Seri mekanizmanın serbestlik dercesine göre bu matrislerin sayısı belirlenir. Üç boyutlu uzayda herhangi bir noktaya herhangi bir yönelimle ulaşmak için altı serbestlik derecesi yeterlidir. Paralel mekanizmalarda ise serbestlik derecesi sabit platform ile hareketli platform arasında hareket eden hareketli düzlem sayısına göre belirlenir. Her bir eyleyicinin ileri veya geri yönlü hareketi bir düzlemi oluşturmaktadır. Birbirlerinden farklı doğrultuda hareket eden ve üç boyutlu uzayda ifadesi bulunan her eksen bir serbestlik derecesi oluşturmaktadır. Paralel mekanizmalarda 3 veya 6 serbestlik derecesine uygun eyleyiciler kullanılmaktadır.

2.4. Stewart Platform Mekanizması

D. Stewart, paralel mekanizmanın uçuş simülatörlerinde kullanılması fikrini önermiştir. İsmini taşıyan Stewart Platform Mekanizması (SPM) özel bir paralel mekanizmadır. Stewart platform mekanizması, kontrol edilebilir 6 serbestlik derecesine sahiptir. SPM, sabit platform, eyleyiciler ve hareketli platformdan oluşur. Eyleyiciler, boyları değişebilen yapıları vasıtasıyla hareketli platformun konum değiştirmesini sağlamaktadır. Platformları birbirine bağlayan ve boyları değişebilen eyleyiciler; hidrolik, pnömatik veya elektrik motorlu yapıda olabilmektedir. Sabit ve hareketli platform bağlantı noktaları eş düzlemli olabileceği gibi, farklı düzlemlerde de olabilir.



Şekil 2.14. Stewart platform mekanizması

2.4.1. Stewart platform mekanizmasının (SPM) kullanım alanı

Stewart Platform Mekanizmaları konusunda son yıllarda artan çalışmalara bağlı olarak kullanım alanı genişlemiştir. Stewart platformu yaygın olarak uçak simülatörlerinde, uzay simülatörlerinde, oyun simülatörlerinde, petrol platformlarında, denizaltı araştırmalarına, mikro cerrahi robotlarında, hafif metal işleme, kesme, şekil verme ve motaj sektörüne kadar kullanım yelpazesi çok geniştir [23].

2.4.2. Uçuş simülatöründe SPM kullanımı

Stewart Platformu havacılık sektöründe kullanılmasıyla beraber önem kazanmıştır. Pilotların gerçek uçakla uçmaya başlamadan önce eğitimlerinin sağlanması, hava koşullarına göre tecrübe kazanılması, farklı basınçlarda vücut dengesinin korunması gibi kazanımlar uçuş simülatörleri ile uçmadan önce pilotlara kazandırılmaktadır.

Uçak ve helikopter için ayrı tasarlanan simülatörler, pilot adaylarının uygulamalı uçuş eğitimine başlamadan önce öğrendikleri test etme imkanı sağlamaktadır. Acil durum eylem planlarının simülatörde denenmesi sebebiyle büyük maddi kazanç sağlamaktadır. Bu sebeple, askeri ve sivil alanda çeşitli uçuş simülatörleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Simülatörlerin pilot adaylarının yetiştirilmesinde kullanılması, adayların ileride kullanacakları uçaklardaki maddi ve manevi kayıpları azaltmaktadır [20]. Örnek bir uçuş simülatörü Şekil 2.5' de verilmiştir.



Şekil 2.15. Örnek bir uçuş simülatörü (havelsan CN 235 simülatörü) [18]

Uçuş eğitimi için kullanılan simülatörlerde, pilot adaylarının maruz kalacağı öteleme ve dönme hareketleri simülatörde sürekli güncellenmekte ve adaylara yeni beceriler kazandırılmaktadır [yeni kaynak ekle]. Gerçek uçak veya helikopterde yapılan tasarım

değişiklikleri benzer şekilde simülatörlerde yapılarak pilot adaylarının tam uyum sağlaması gerçekleştirilmektedir. İnsan vücudunun algılaması gereken ivmesel ve basınç değişimleri simülatörün altında bulunan paralel mekanizma ile sağlanmaktadır [20].

2.4.3. Oyun simülatöründe SPM kullanımı

Oyun simülatörleri eğlence dünyasında en çok tercih edilen oyun makineleridir. Özellikle alışveriş merkezlerinde bulunan simülatörler, yarış arabası veya uzay aracı olarak çalıştırılarak çocukların ve yetişkinlerin kullanımına sunulmuştur. Bazı sinema filmleri benzer platformları kullanarak 3 boyutlu ve hareketli görseller ile izleyicileri cezbetmektedir. Şekil 2.7' de oyun simulatöründe SPM ait görsel verilmiştir.



Şekil 2.16. Oyun simülatöründe SPM'nin kullanımı [38]

2.4.4. Uzay çalışmalarında SPM kullanımı

Atmosferin olumsuz etkileri olan görüntüde bulanıklık, hava kirliliği, yansımalar, ozon tabakası, mor ötesi ışınlar sebebiyle uzayda teleskopik çalışmalar önem kazanmıştır.

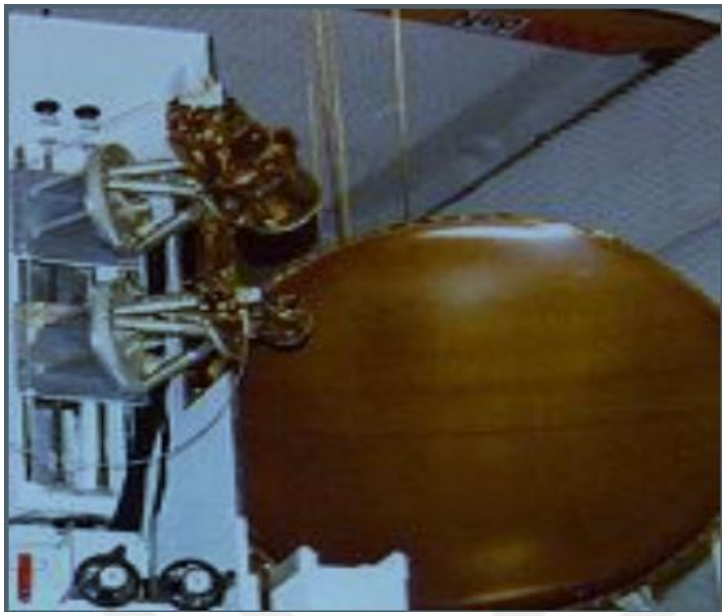
Teleskobların uzayda çalıştırılması benimsenmiş ve birkaç deneme yapılmıştır. Teleskop ince ayarında kullanılan SPM'nin kinematik parametrelerinin optimizasyonunu ve tekillik

analizini ve 6 serbestlik dereceli SPM'nin tekillik analizini üzerine çalışmalar yapılmıştır [1]. Şekil 2.8' de gösterilen uzay teleskop aynalarının ve optiklerinin ayarlanmasında SPM kullanılmaktadır [27].



Şekil 2.17. Uzay teleskobunda SPM kullanımı (PI) [39]

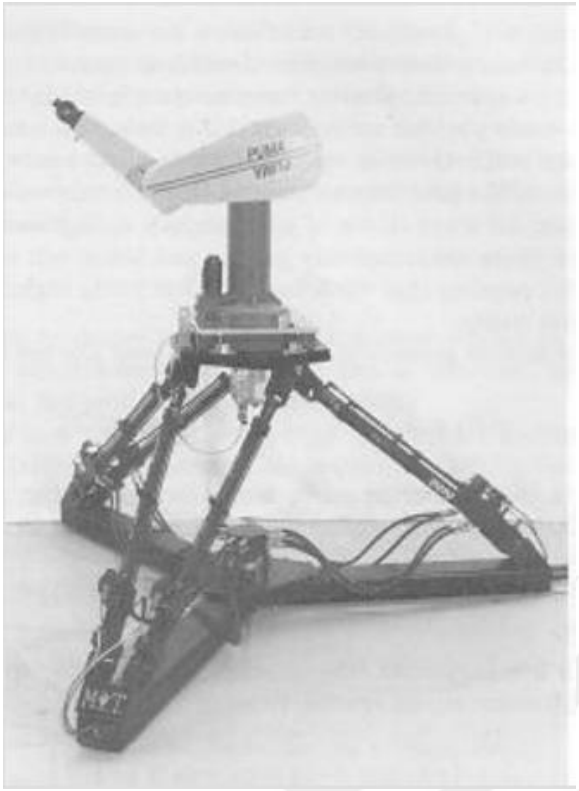
Uzay teknolojileri kapsamında SPM ayrıca Şekil 2.9' da gösterilen çanak uydunun konumlandırmasında kullanılmaktadır [27].



Şekil 2.18. Uydu çanağında SPM kullanımı (PI)

2.4.5. İnsansız hava araçlarında SPM kullanımı

İnsansız hava araçları olarak adlandırılan ve daha çok askeri amaçlarla kullanılan mobil robotlarda da manipulator kullanılmaktadır. Burada amaç lojistik destek sağlamak, gözlemlemek ve işaretleme amaçlı olarak platformu kullanmaktır. Standart kullanımda 6 SPM platformun 6'lık kısmı alta gelecek şekilde olurken, platform ters olarak tavana monte edilerek hareketli kısım altta olması mümkündür [34].



Şekil 2.19. Stewart platfrom manipülatör artı seri manipülatör [34]

2.4.6. Tibbi cihazlarda SPM kullanımı

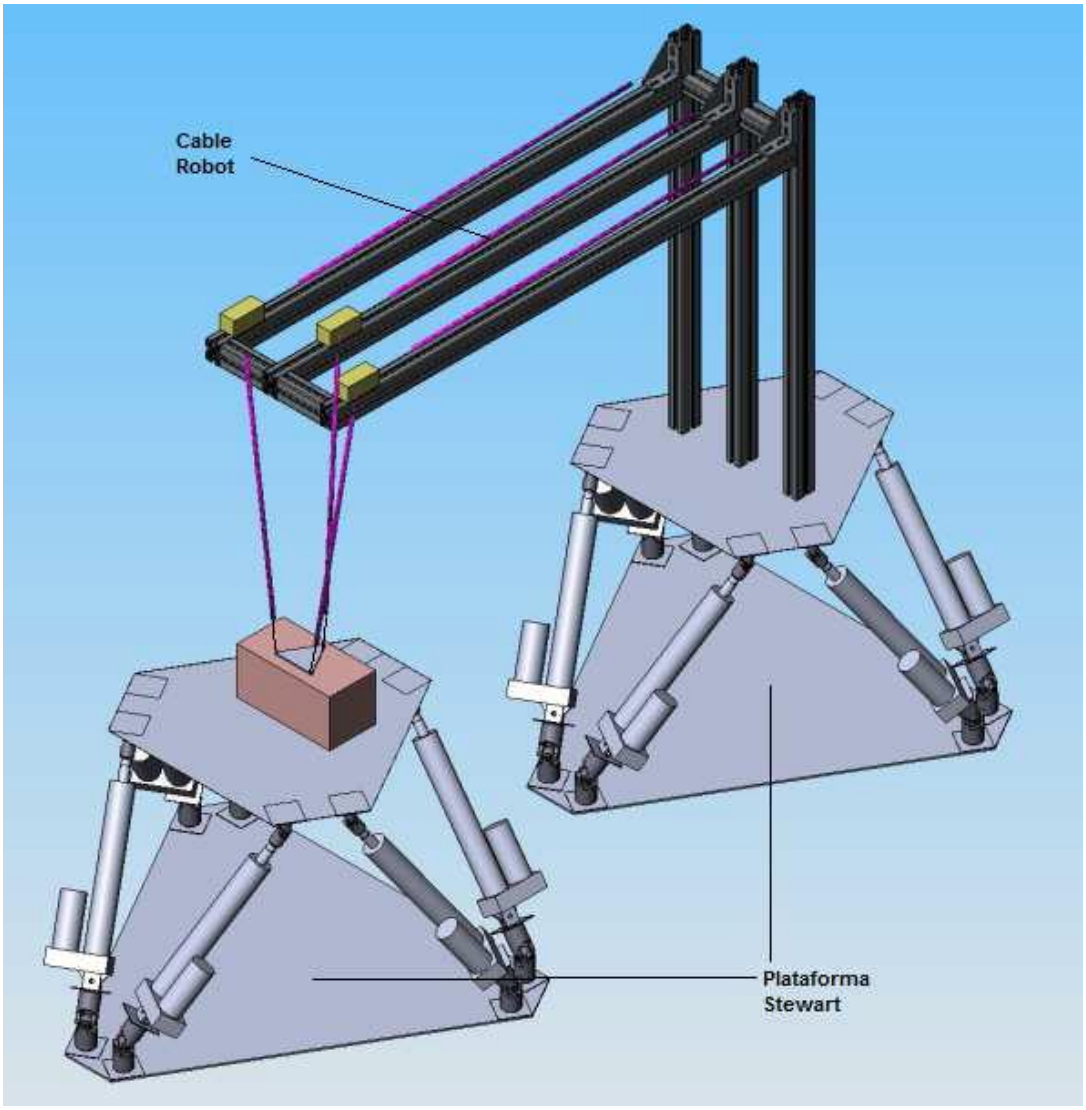
Cerrahi yöntemler (örneğin, kavrama, kesme ve birleştirme v.b) her hasta için farklılıklar göstermektedir. Dokunun sertliği, zarar görmesi ve zararlı dokunun konum farklılığı ameliyatı yapacak cerrahlar için risk oluşturmaktadır. Doktordan kaynaklanacak riskleri azaltmak için cerrah robotlar üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Her ameliyat için farklı özelliklere sahip paralel mekanizmaların kullanılması gerekmektedir. Cerrahi işlem sırasında mekanizmanın hareket yönü, mesafesi ve derinliği operatör doktora bağlı olup riskleri en aza indirecek işlemlerin yapılması için yardımcı donanımlarla (kamera, sensör v.b) destek sağlanmaktadır. Şekil 2.11' de en yaygın kullanılan ameliyat robotuna ait görsel verilmiştir [40].



Şekil 2.20. Da-Vinci ameliyat robotu [38]

2.4.7. Manipülatörde SPM kullanımı

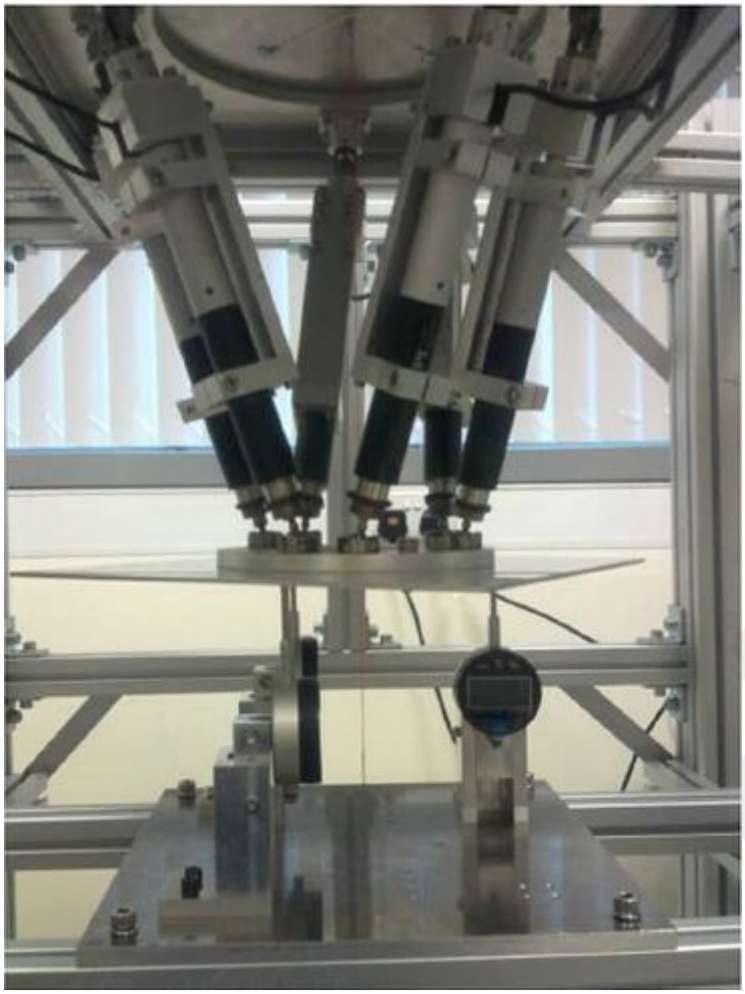
Manipülatörler gezgin robotlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İnşaat alanlarında ağır yüklerin transferinde kullanılmaktadır. Benzer şekilde liman viçlerinde de bu yapı görülmektedir. Yönetici platformdan hareket komutlarını alan büyük inşaat makineleri istenilen koordinata hareketi sağlamaktadır [25]. Şekil 2.12' de ağır yük uygulamalarında kullanılan modül şekli verilmiştir.



Şekil 2.21. Stewart Platformunun ağır yükte kullanım modülü [39]

2.4.8. **Ölçüm cihazlarında SPM kullanımı**

Stewart platform, hassas koordinat ölçüm (CMM) cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hassas koordinat ölçüm cihazları, sanayide üretilen parçaların yüzeysel hassas ölçümlerinde kullanılmaktadır. Ölçüm raporuna bağlı olarak, üretilen parçaların standartları sağlaması durumunda üretimde kullanılmasına izin verilmektedir. Özellikle uçak, helikopter, motorlu taşıt, tıp cihazlarının üretiminde bu raporlar önem kazanmaktadır. Platform üzerine sabitlenen hassas ölçüm sensörleri, platform hareketleri ile önceden belirlenen koordinatlara hareket ettirilerek parçanın yüzey ölçümlerini gerçekleştirir [25]. Şekil 2.13' de CMM uygulama örneği verilmiştir [42].



Şekil 2.22. Stewart Platformunun ölçüm cihazı olarak kullanımı [42]

2.4.9. CNC tezgahlarda SPM kullanımı

Bilgisayarlı sayısal kontrol (Computed Numerically Controlled- CNC) kelimelerinin İngilizce baş harflerinden oluşan CNC tezgahlar yapıları itibariyle hassas üretim gerçekleştirilen tezgahlardır. Kesme ve dönme aparatları kullanılarak tezgah içerisine yerleştirilen nesne işlenmektedir.

Klasik tezgahlara göre daha yüksek hızı, hassasiyeti ve rijitliği sebebiyle Şekil 2.14' deki gibi CNC tezgahlarda talaşlı imalatla karmaşık şekilli malzemeleri işlemede kullanılmaktadır [27].

Altı serbestlik dereceli SPM, klasik tezgahlara göre daha yüksek hızı, hassasiyeti ve rijitliği sayesinde Şekil 2.14' deki gibi CNC tezgahlarda talaşlı imalatta malzemeleri işlemede kullanılmaktadır [27].



Şekil 2.23. CNC tezgahında SPM kullanımı [27]

2.4.10. Üç Boyutlu (3D) yazıcılarda SPM kullanımı

Üç boyutlu yazıcılarda yaygın olarak SPM kullanılmaktadır. Aynı platform kullanılarak boyama işlemide gerçekleştirilmektedir. Benzer şekilde 3D yazıcı ile değişik gıda ürünleri çocukların dikkatini çekecek şekilde üretilmektedir. Çizgi kahramanların üç boyutlu ve renkli figürleri 3D yazıcıda üretilmekte ve mağzalarda satılmaktadır. Pilot uygulama olarak ilk uygulamlarda çocuk şekerleri (Şekil 2.15) tercih edilmiştir [43].



Şekil 2.15. Üç boyutlu yazıcıda SPM kullanımı [41]

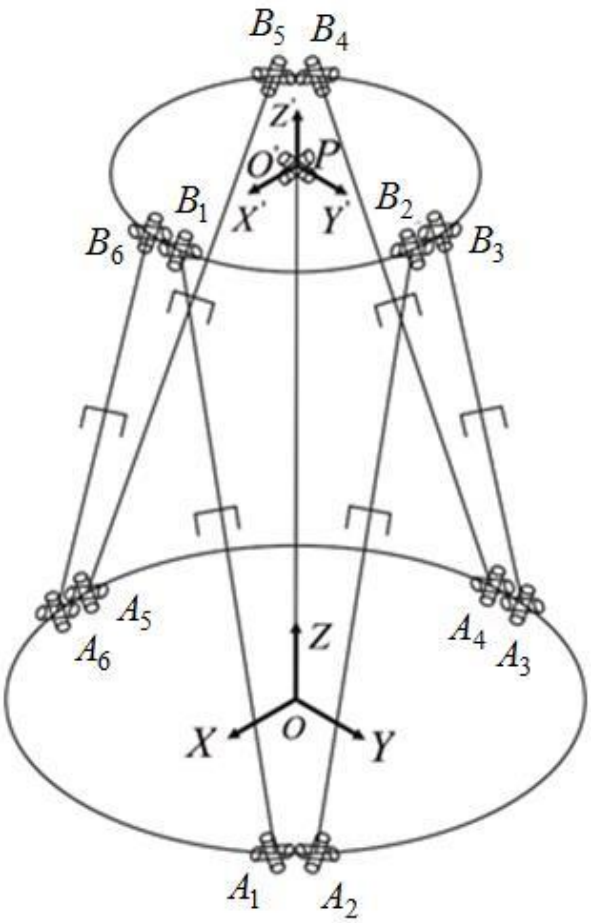
2.5. Önerilen 6-DOF PM +1 Sabit Bacak Mekanizması (Mimarısı)

Bu tezde SPM'nun yeni bir formu incelenmiştir. Bu mekanizma iki düzlemsel platformdan, aradaki hareketli bacaklardan ve bir de sabit bir bacaktan oluşmaktadır. Alt platform sabit ve üst platform hareketlidir. Bu iki platform altı adet eyleyicilerle bir birine bağlamaktadır ve ayrıca her iki platformda da üç noktada ikişerli olarak kollar düzlemsel platforma bağlamaktadır. Bu yüzden bu tip mekanizmaya 3X3 SPM denilmektedir. Şekil 2.17'ye göre her eyleyci alt platrformdan, sırasıyla çok yönlü bağlantı noktası(universal joint), eyleyici ve yeniden çok yönlü bağlantı noktası(universal joint) ile üst platforma bağlamaktadır. Alt platfromun merkezinde ayrı bir sabit ve rijid bir bacak oluşturularak üst plaftormun merkezine bir çok yönlü bağlantı noktası ile bağlamaktadır. Bu sayede alt sistem ile rijit bacak birbirine bağlı hareket edebilirken, çok yönlü bağlantı noktası(universal joint) sayesinde üst düzlemsel platform rijit bacak üstünde dönebilmektedir. Sabit bir rijid oluşturunca üstteki platform sadece X, Y ve Z eksen etrafında dönme hareketi yapmaktadır. Çünkü üst platformun merkezi sabit kalacak ve sadece altı adet eyleyici ile üsteki platform merkezin etrafında döner bir harekete sahip olacaktır.

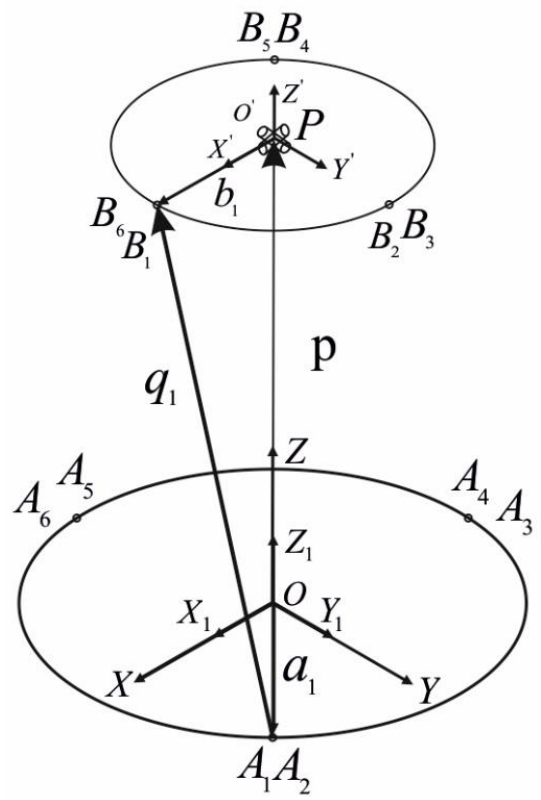
Sabit bacak eklemesi ile mekanizmanın ağır taşıma gücü yükseltilir, bu sayede platforma yüksek basınç ve kuvvet uygulanması gereken yük durumlarında tercih edilir. Bu tez çalışmasında askeri uygulama ve ağır yük durumu için bu yapı tercih edilmiştir. Bu tarz platformların en büyük sıkıntısı, sabit bacak eklemesiyle mekanizmanın doğrusal hareketi kaybolur ve böylece mekanizmanın çalışma uzayı küçülür.

2.5.1. Modelin geometriği

Önerilen 6-DOF PM artı bir sabit bacağa ait yapı Şekil 2.16 ve Şekil 2.17' de gösterilmiştir. Bu oluşan manipülatör bir hareketli üst plaka ve sabit bir alt plakadan oluşmuştur. Klasik kinematik mimariden farkı ilave bir sabit bacak eklenmiş ve hareket uzayı değişmiştir.



Şekil 2.16. 3X3 6-DOF PM+Bir sabit bacak şematik gösterimi



Şekil 2.17. Sabit bacak geometriği

Mekanızmanın temelinde $O-XYZ$ bir sabit referans çerçevesi eklemektedir ve bir koordinat çerçevsi $O^{'}-X^{'}Y^{'}Z^{'}$ harekatli platformuna bağlamaktadır. Şekil 2.17' de sabit platformda eyleyicinin bağlanmış noktaları A_i ile ve hareketli platformda eyleyicinin bağlanmış noktaları B_i ile gösterilmiştir, böylece $O^{'}$ noktası hareketli platformun merkezinde $P\left(X^{'},Y^{'},Z^{'}\right)$ koordinat ile yerleşmektedir.

3. ANALİZ

Mekanizma, belirli bir yörünge üzerinde hareketi sağlayan birbirine mafsallanmış uvuzlardan oluşan mekanik düzenekler olup hareket ve kuvvet iletmek veya dönüştürmek amacıyla kullanılır. Büyüklükleri bilinen her mekanizma; kinematiği, dinamiği ve sistematiği açısından incelenir [32].

Kinematik, hareketi doğuran sebepleri, kuvvetleri veya momentleri, kütleleri göz önüne almaksızın yalnız hareketin incelenmesidir. Kinematik analiz mekanizmaların dinamik analizi için ilk basamak teşkil ettiği gibi, mekanizmaların sentezi için de temel teşkil eder [33].

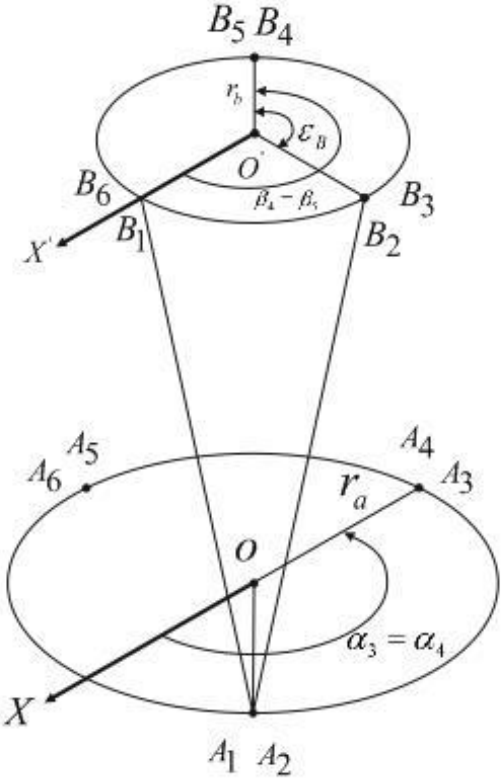
3.1. Kinematik Analiz

Paralel mekanizmaların kinematik analizi düz ve ters kinematik olarak iki başlıkta incelenir. Düz kinematik analizde eyleyicinin hareketine bağlı olarak hareketli üst platformun sabit alt platforma göre yer değiştirme ve yönelmesini bulmak için kullanılır ve üst platform ile alt platform arasında dönme matrisi bulunarak hareketin uzay vektöründeki yerinin bulunmasını sağlar. Düz kinematik denklemler ile hareketli platformun koordinat sistemindeki hareketi eyleyici hareket kabiliyetine göre bulunmasını sağlar. Düz kinematik yöntemi paralel mekanizmalarda uygulamak zordur ve birden fazla sonuç bulma gibi problemlerle sonuçlanabilir. Örneğin hareketli üst platform 10 derece açı ile konumlansın denildiğinde birden fazla çözüm ortaya çıkar.

Ters kinematik analiz ise hareketli üst platformun yeri bilinen yeni koordinat noktasına gitmesi için eyleyici hareket boylarının bulunmasını sağlar. Paralel mekanizmalarda ters kinematik analizi kolaydır ve tek sonuç çıkmaktadır. Üst hareketli platform belirlenen koordinatta duracak ise eyleyici(bacak) hareket boylarının hesaplaması tek sonuç ile mümkün olacaktır. Farklı bacak hareketleri ile aynı koordinat noktasını elde etmek mümkün değildir.

3.2. 3X3 SPM+1 Sabit Bacak Ters Kinematik Analizi

Herhangi bir cismin hareketi dönme ve öteleme elemanter hareketlerinin birleşimi tarzındadır. Üç boyutlu uzayda bir cismin yapabileceği elemanter hareketlerinin sayısı o cismin serbestlik derecesi olarak tanımlanır. Mafsal Serbestlik Derecesi: Üç boyutlu uzayda, mafsalın müsade ettiği elemanter hareketlerin sayısı o mafsalın serbestlik derecesi olarak tanımlanır.



Şekil 3.2. Kinematik analiz modeli

Şekil 3.1'e göre üst ve alt platforma ait köşe noktalarının pozisyon vektörleri aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilir;

$$ {}^{B}\vec{B}_i = \begin{bmatrix} B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_B \cos(\beta_i) \\ r_B \sin(\beta_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.1)} $$

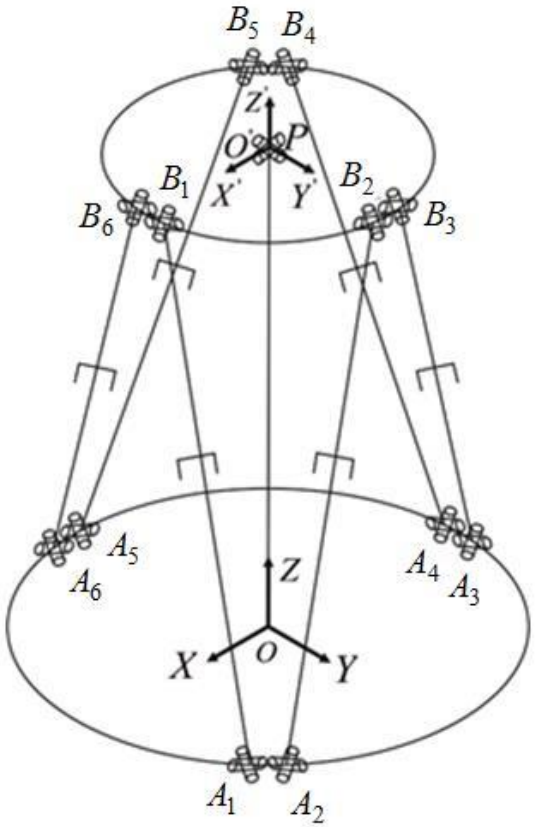
$$ {}^{A}\vec{A}_i = \begin{bmatrix} A_{ix} \\ A_{iy} \\ A_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_A \cos(\alpha_i) \\ r_A \sin(\alpha_i) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.2} $$

$i = 1,2,3,..6$ bacak numarası

Alt ve üst platformdaki α_i ve β_i açıları, şekil 3.1' de $\overline{OA_i}$ ve $\overline{O'B_i}$ uzunluğudur. Bu açılar x-ekseninden OA çizgisine ve x'-ekseninden $O'B$ çizgisine olan açılarıdır;

$$ \begin{aligned} &\beta_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{\varepsilon_B}{2};\ \alpha_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{\varepsilon_A}{2};\ i = 1,3,5 \\ &\beta_i = \beta_{i-1} + \varepsilon_B;\ \alpha_i = \alpha_{i-1} + \varepsilon_A;\ i = 2,4,6 \end{aligned} \tag{3.3} $$

i =bacak numarısı



Şekil 3.2. Altı serbestlik denereli paralel manipülatörün görseli

Analiz için pozisyon vektörü ${}^{A}P$, hareketli platformun pozisyonu bulmak için kullanılır. Şekil 3.2 de eksen dönüşümleri için hareketli masfalların yerleşimi verilmiştir;

$${}^{A}P = OO' = [p_x, p_y, p_z]^T \tag{3.4}$$

Bu modelde p_x ve p_y sıfırdır ama ve p_z sabittir. Rotasyon matrix ${}^{A}R_B$ sabit platforma göre hareketli platformun oryantasyonu için kullanmaktadır.

Yukarıda verilen (3.1), (3.2), (3.3) denklemlerinden faydalanılarak, $R = (R_X\ R_Y\ R_Z)$ şeklinde tanımlanır. Burada R_X , X ekseni etrafındaki dönme matrisi, R_Y , Y ekseni etrafındaki dönme matrisi, R_Z ise Z ekseni etrafındaki dönme matrisidir. X ekseni etrafındaki dönmenin ψ derece, Y etrafındaki dönmenin θ derece, Z ekseni etrafındaki dönmenin de ϕ derece olduğu hesaba katılırsa, Euler açılarından faydalanılarak $R = (R_X\ R_Y\ R_Z)$ aşağıdaki gibi bulunur [21];

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ 0 & \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

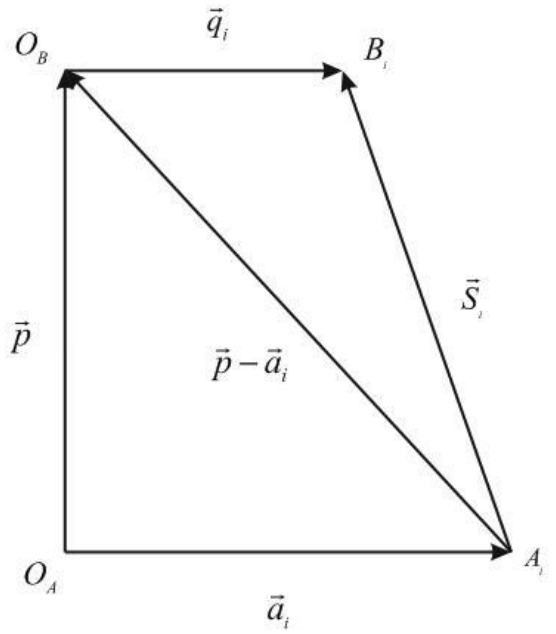
$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \text{con}(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

R matrisi ise;

$${}^{A}R_B = R_Z(\phi) R_Y(\theta) R_X(\psi) \tag{3.8}$$

$${}^{A}R_B = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\theta & \cos\phi\sin\theta\sin\psi + \sin\theta\cos\psi & -\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ -\sin\phi\cos\theta & -\sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi + \cos\phi\sin\psi \\ \sin\theta & -\cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Bacak vektörlerini bulabilmek için, üst platformun bacak bağlantı noktalarını alt platform koordinat sisteminde ifade etmek gerekir. Şekil 3.3'te bacak vektörlerinin yerleşimi ve eyleyici vektörünün bulunması verilmiştir.



Şekil 3.3 Eyleyici vektörünün bulunması

Şekil 3.3' te eyleyici (bacak) vektörü hesaplanacak olursa;

$$\vec{S}_i = \vec{q}_i + \vec{p} - \vec{a}_i \tag{3.10}$$

$$\vec{q}_i = R\vec{b}_i \tag{3.11}$$

$$\vec{S}_i = R\vec{b}_i + \vec{p} - \vec{a}_i \tag{3.12}$$

(3.12) denklemde $\vec{S}_i$ bacak vektörü, p ise hareketli üst platformun öteleme vektörüdür.

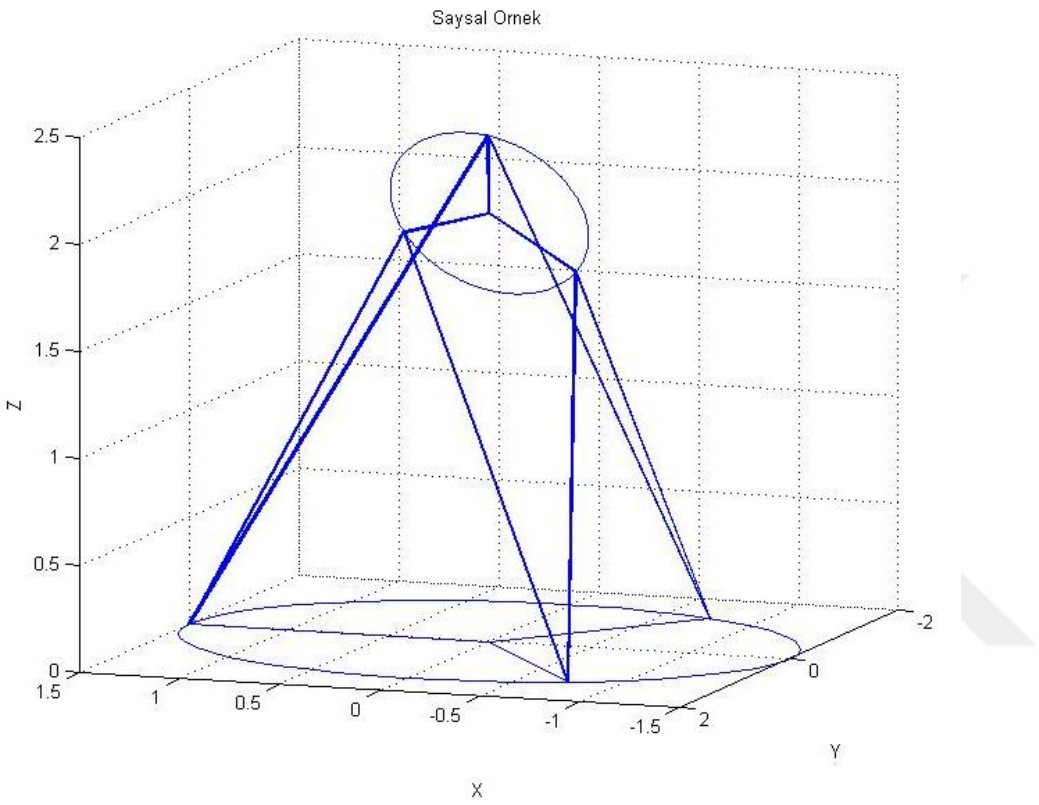
3X3 SPM+1 Sabit Bacak Ters Kinematik analize ait sayısal örnek; Ters kinematik denklemler vasıtası ile hareketli üst platformun aşağıda verile koordinatları için manipülatör bacak boyları hesaplanacaktır. Verilen koordinat ve platformun pozisyonu Şekil 3.4' de gösterilmiştir. Denklemler hesaplaması Matlab programda yazılmış ve program kodları EK1'de verilmiştir. Uygulama;

X ekseninde 30 derece

Y ekseninde 30 derece

Uzunluğu 2 metre

İçin gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. X ekseninde 30 derece,Y ekseninde 30 derece, uzunluğu 2 metre manipülatör konumu

Şekil 3.4’ de verilen manipülatör bacak boyları program kodları EK1 verilen denklemeler kullanılarak hesaplandığında aşağıda verilen uzunlular bulunacaktır.

L1 = 2,297m

L2 = 2,202m

L3 = 2,400m

L4 = 2,202m

L5 = 2,634m

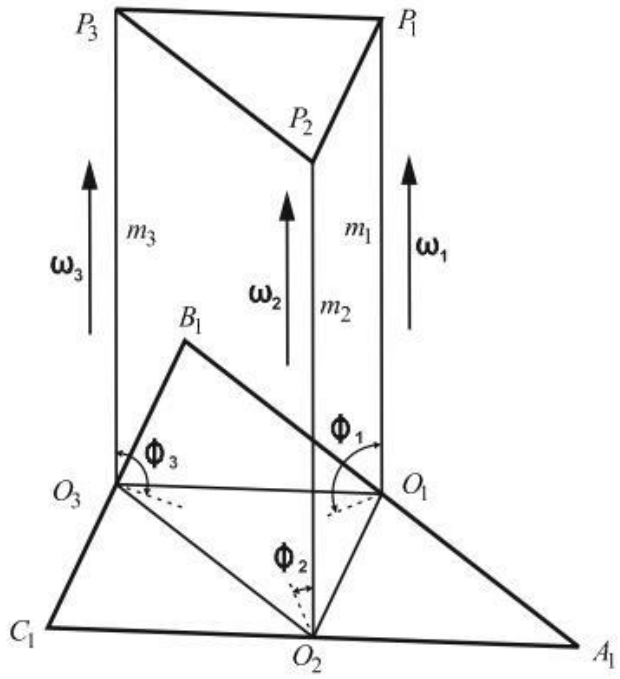
L6 = 2,725m

3.3. Düz Kinematik Analiz

Düz kinematik denklemler, verilen bacak boylarına göre hareketli üst platformun yapacağı dönme ve öteleme değişkenlerinin bulunmasını sağlar. Düz kinematik hesaplamalar yapılırken literatürde yer bulan alt tablada 3 noktadan bağlantı, üst tablada 3 noktadan bağlantı denklemleri incelenmiştir.

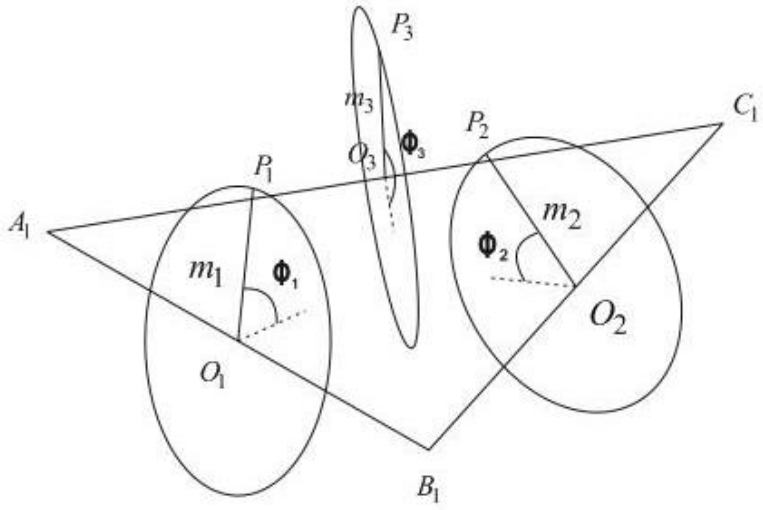
Şekil 3.5' te sabit alt tablada 3 noktadan ve hareketli üst tablada 3 noktadan bağlantılı olduğu varsayılarak bacakların sabit alt platfaormda A_1, B_1, C_1 ve üst noktada ise P_1, P_2 ve P_3 olarak bağlantı noktaları isimlendirilebilir. Alt platform da kenar uzunlukları A_1B_1, A_1C_1, C_1B_1 mesafeleri için a, b ve c kabul edilecek olursa benzer şekilde üst platformda ise P_1P_2, P_2P_3, P_1P_3 uzunlukları b_1, b_2 ve b_3 olarak isimlendirilebilir. Sabit paltform ile hareketli platformda bağlantı noktaları arasında bacak boyları

$L_1, L_2 ... L_6$ alınabilir. Şekil 3.6' da belirtilen altı adet bacak boylarını gösteren şekil verilmiştir. $A_1P_1B_1$ üçgeni incelendiğinde P_1 noktası O_1 merkezli m_1 yarıçaplı çember üzerindedir. Aynı şekilde P_2 ve P_3 noktaları sırasıyla O_2 merkezli m_2 yarıçaplı çember ve O_3 merkezli m_3 yarıçaplı çember üzerinde olacaktır. Böylece sistem O_1 noktasında döner mafsal ve P_1 noktasında küresel mafsal varmış gibi ele alınabilir. Buradaki kısıt P_1, P_2 ve P_3 noktaları arasındaki uzaklığın sabit olmasıdır. O_1 noktası, A_1 noktasından r_1, B_1 noktasından r_2 kadar, O_2 noktası, A_1 noktasından s_1, C_1 noktasından s_2 kadar ve O_3 noktası, B_1 noktasından t_1, C_1 noktasından t_2 kadar uzaktadır.

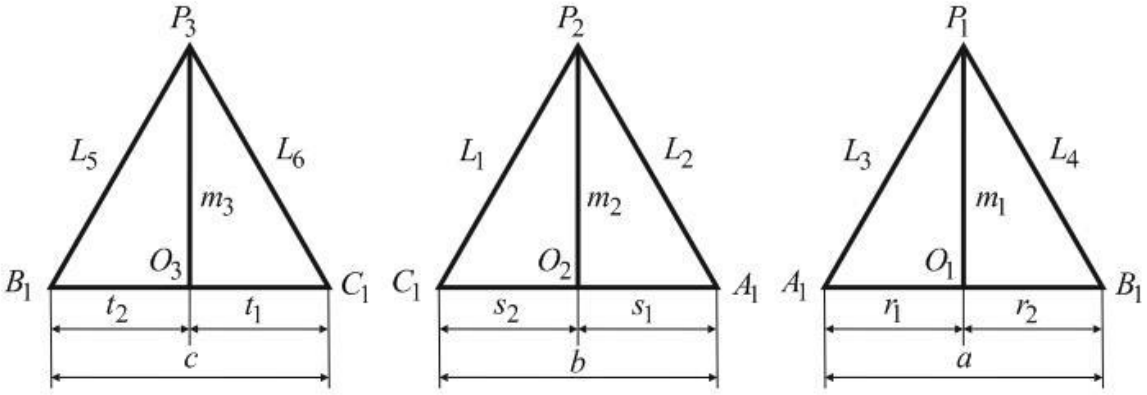


Şekil 3.5. 3X3 SP artı bir sabıt bacağın kinematik eşdeğeri

Şekil 3.5' te görülen Sewart Platformunun her bir üst köşe noktaları için m_1, m_2 ve m_3 yarıçapı ve O_1, O_2 ve O_3 merkezli daireler üzerinde hareket ediyormuş gibi düşünebilir. Bu dairelerin merkezleri ile üst bağlantı noktaları arasındaki vektörler bu yarıçaplar üzerindedir ve her bir yarıçapı ait birim vektörler ω_1, ω_2 ve ω_3 olarak ifade edilmiştir. Bu değişkenlerin ve vektörlerin yerleşimi Şekil 3.6' dakı gibidir.



Şekil 3.6. Vektör yerleşimi



Şekil 3.7. Vektörün kenar uzunluklar

$$a = r_1 + r_2 \tag{3.13}$$

$$a^2 + (r_1 + r_2)^2 = r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \tag{3.14}$$

$$2ar_1 = a^2 - r_2^2 + r_1^2 \tag{3.15}$$

Geometriden;

$$m_1^2 = L_3^2 - r_1^2 = L_4^2 - r_2^2 \tag{3.16}$$

$$2ar_1 = a^2 - r_2^2 + r_1^2 + m_1^2 - m_1^2 = a^2 + \left(m_1^2 + r_1^2\right) - \left(m_1^2 + r_2^2\right) \tag{3.17}$$

Düzenlenirse;

$$r_1 = \frac{\left(a^2 + L_3^2 - L_4^2\right)}{2a}, \qquad r_2 = a - r_1, \qquad m_1 = \left(L_3^2 - r_1^2\right)^{1/2} \tag{3.18}$$

Aynı şekilde;

$$S_1 = \frac{\left(b^2 + L_2^2 - L_1^2\right)}{2b}, \qquad S_2 = b - s_1, \qquad m_2 = \left(L_2^2 - S_1^2\right)^{1/2} \tag{3.19}$$

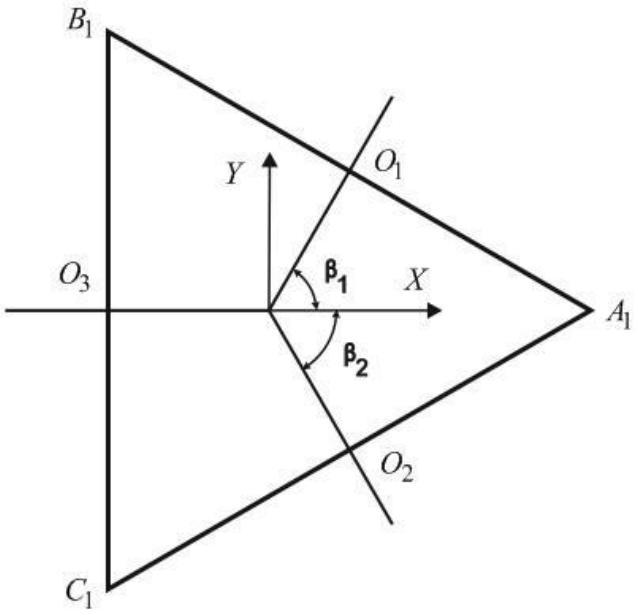
$$t_1 = \frac{\left(c^2 + L_6^2 - L_5^2\right)}{2c}, \qquad t_2 = c - t_1, \qquad t_3 = \left(L_6^2 - t_1^2\right)^{1/2} \tag{3.20}$$

Çözümde kolaylık sağlanması açısından, Şekil3.5' de gösterilen O_1, O_2 ve O_3 noktalarına ait konum vektörlerinin içinde tanımlanacağı koordinat sisteminin XY düzlemi, sabit platform düzlemi ile çakışık olarak seçilsin. Bu koordinat sisteminin orijini herhangi bir noktada seçilebilir. Şekil3.5' de sabit platformn taban açıları gösterilmiştir. O_1P_1, O_2P_2 ve O_3P_3 doğrultularındaki birim vektörlerin ω_1, ω_2 ve ω_3 sırasıyla $A_1B_1P_1, A_1C_1P_2$ ve $B_1C_1P_3$ düzlemerinin XY düzlemiyle yaptıkları eğim açıları Φ1, Φ2 ve Φ3'ü olsun. Bu durumda O1,O2 ve O3 noktalarını vektörel olarak tanımlanacak olursa;

$$O_1 = A_1 + \frac{r_1(B_1 - A_1)}{|B_1 - A_1|} \tag{3.21}$$

$$O_2 = A_1 + \frac{S_1(C_1 - A_1)}{|C_1 - A_1|} \tag{3.22}$$

$$O_3 = C_1 + \frac{t_1(B_1 - C_1)}{|B_1 - C_1|} \tag{3.23}$$



Şekil 3.7. Koordinat sisteminin tanımı ve alt platkanın taban açıları

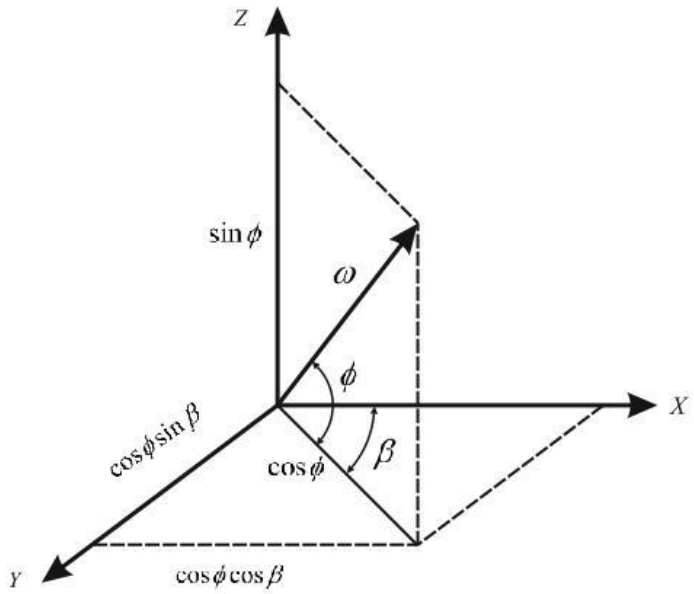
Bu durumda sabit platformun B_1A_1, C_1A_1 ve C_1B_1 kenarlarına çizilen dik doğruların X-ekseni ile yaptıgı açılar;

$$\beta_1 = \sin^{-1}\left[\frac{\{(B_1 - A_1)\,xk\}\cdot j}{|(B_1 - A_1)\,xk|}\right] \tag{3.24}$$

$$\beta_2 = \sin^{-1}\left[\frac{\{(A_1 - C_1)\,xk\}\cdot j}{|(A_1 - C_1)\,xk|}\right] \tag{3.25}$$

$$\beta_3 = \sin^{-1}\left[\frac{\{(C_1 - B_1)\,xk\}\cdot j}{|(C_1 - B_1)\,xk|}\right] \tag{3.26}$$

Şekil 3.8' de ω_i vektörlerinin tanımları ve şekil 3.5' de ω_i vektörlerinin açık ifadeleri tösterilmiştir. Bu durumda ω_1, ω_2 ve ω_3 vektörleri için;



Şekil 3.8. Vektörlerinin tanımları

$$\omega_i = \cos\beta_i \cos\phi_i i + \sin\beta_i \cos\phi_i j + \sin\phi_i k \qquad i = 1,2,3 \tag{3.27}$$

İfadeleri yazılabilir. Artık üst platforma ait P_1, P_2 ve P_3 noktalarının konun vektörlerini yazabilriz;

$$P_i = O_i + m_i\omega_i \qquad i = 1,2,3 \tag{3.28}$$

Üst platform rijit bir cisim olduğundan konum vektörleri;

$$|P_1 - P_2|^2 = b_1^2 \tag{3.29}$$

$$|P_2 - P_3|^2 = b_2^2 \tag{3.30}$$

$$|P_1 - P_3|^2 = b_3^2 \tag{3.31}$$

Kısıtlarını sağlamak zorundadır. burada b_1, b_2 ve b_3 üst platformun kenar uzunluklarıdır;

Bundan sorna problemin çözumu için iki yol takip edilebilir. Bunlardan birincisi değişken dönüşümü (Bezout Metodu) değiri ise sayısal yöntemler kullanarak çözmektedir. Bu çalışmada birinci yöntem ele alınacaktır. Bezout metodunda elde var olan 1 den fazla değişkene sahip polinomun değişkenleri aynı şekilde bilinen diğer polinomlara sokulmasıyla yeni bir polinom oluşturulur. Bu durumda elde edilen polinumun derecesi iki kat artar. Birinci yöntemde elde edilen üç değişkenli nonlineer denlem sistemi değişken dönüşümleriyle tek değişkenli 16 dereceden bir denkleme dönüştürülür. Bu durumda platform için olası 16 konum çıkacaktır. Bu konum bilgilerinden en fazla 12 tanesi gerçek konum bilgisi olacaktır (Deniel Lazard-1994).

Bu konumlardan alt platformun alt tarafında olanlar ve imajiner değere sahip olanlar elimine edilir.

3.3.1. 3X3 Artı 1 sabıt bacak ile SPM düz kinematik problemin bezout metodu ile çözümü

Denklem sisteminin çözümü için (3.28) denklemlerindeki P_1, P_2 ve P_3 vektörlerini (3.29)-(3.31) denklemlerinde yerine koyalım;

$$\begin{aligned}&\left((O_1)_x-(O_2)_x+m_1\cos\beta_1\cos\phi_1-m_2\cos\beta_2\cos\phi_2\right)^2+\\&\left((O_1)_y-(O_2)_y+m_1\sin\beta_1\cos\phi_1-m_2\sin\beta_2\cos\phi_2\right)^2+\\&\left(m_1\sin\phi_1-m_2\sin\phi_2\right)=b_1^2\end{aligned}\tag{3.32}$$

$$\begin{aligned}&\left((O_2)_x-(O_3)_x+m_2\cos\beta_2\cos\phi_2-m_3\cos\beta_3\cos\phi_3\right)^2+\\&\left((O_2)_y-(O_3)_y+m_2\sin\beta_2\cos\phi_2-m_3\sin\beta_3\cos\phi_3\right)^2+\\&\left(m_2\sin\phi_2-m_3\sin\phi_3\right)=b_2^2\end{aligned}\tag{3.33}$$

$$\begin{aligned}&\left((O_3)_x-(O_1)_x+m_3\cos\beta_3\cos\phi_3-m_1\cos\beta_1\cos\phi_1\right)^2+\\&\left((O_3)_y-(O_1)_y+m_3\sin\beta_3\cos\phi_3-m_1\sin\beta_1\cos\phi_1\right)^2+\\&\left(m_3\sin\phi_3-m_1\sin\phi_1\right)=b_3^2\end{aligned}\tag{3.34}$$

(3.32)-(3.34) denklemlerini basitleştirirek;

$$D_1\cos\phi_1+D_2\cos\phi_2+D_3\cos\phi_1\cos\phi_1+D_4\sin\phi_1\sin\phi_2+D_5=0\tag{3.35}$$

$$E_1\cos\phi_2+E_2\cos\phi_3+E_3\cos\phi_2\cos\phi_3+E_4\sin\phi_2\sin\phi_3+E_5=0\tag{3.36}$$

$$F_1\cos\phi_3+F_2\cos\phi_1+F_3\cos\phi_3\cos\phi_1+F_4\sin\phi_3\sin\phi_1+F_5=0\tag{3.37}$$

D_i, E_i ve F_i açık ifadeleri EK-2 de gösterlmiştir. $i=1,2...5$

Denklemlerini elde ederiz. (3.35)-(3.37) denklermlerinde.

$$x_i=\tan\left(\frac{\phi_i}{2}\right)\qquad i=1,2,3\tag{3.38}$$

Olmak üzere,

Dönüşümler yapılırsa aşağıdaki denlemler elde edilir;

$$\left(G_1x_1^2+G_2\right)x_2^2+\left(G_3x_1\right)x_2+\left(G_4x_1^2+G_5\right)=0\tag{3.39}$$

$$\left(H_1x_3^2+H_4\right)x_2^2+\left(H_3x_3\right)x_2+\left(H_4x_3^2+H_5\right)=0\tag{3.40}$$

$$\left(I_1x_1^2+I_4\right)x_3^2+\left(I_3x_1\right)x_3+\left(I_2x_1^2+I_5\right)=0 \tag{3.41}$$

G_i, H_i ve I_i açık ifadeleri EK-2 de gösterilmiştir. $i=1,2...5$

Bezout metodu kullanılarak (3.39) ve (3.41) denklemlerinden x_2 elmine edilirse;

$$\begin{vmatrix} \begin{vmatrix} G_1x_1^2+\mathrm{G}_2 & G_4x_1^2+G_5 \\ H_1x_3^2+\mathrm{H}_4 & \mathrm{H}_2x_3^2+H_5 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} H_3x_3 & G_3x_1 \\ H_1x_3^2+\mathrm{H}_4 & \mathrm{G}_1x_1^2+G_5 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} G_3x_1 & G_4x_1^2+G_5 \\ H_3x_3 & \mathrm{H}_2x_3^2+H_5 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} G_1x_1^2+\mathrm{G}_2 & G_4x_1^2+G_5 \\ H_1x_3^2+\mathrm{H}_4 & \mathrm{H}_2x_3^2+H_5 \end{vmatrix} \end{vmatrix}=0 \tag{3.42}$$

Denklemi elde edilir. Buradaki determinant hespalanıp sadeleştirilirse;

$$J_1x_3^4+J_2x_3^3+J_4x_3+J_5=0 \tag{3.43}$$

$$J_1=K_1x_1^4+K_2x_1^2+K_3 \tag{3.44}$$

$$J_2=K_4x_1^3+K_5x_1 \tag{3.45}$$

$$J_3=K_6x_1^4+K_7x_1^2+K_8 \tag{3.46}$$

$$J_4=K_9x_1^3+K_{10}x_1 \tag{3.47}$$

$$J_5=K_{11}x_1^4+K_{12}x_1^2+K_{13} \tag{3.48}$$

K_i açık ifaderleri EK-3 te gösterilmiştir. $i=1,2...13$

Denklermi elde edilir. Buradaki J_i lere ait açık ifadeler yukarıda gösterilmiştir. Buradaki K katsayıları mekanizma geometrisine, harketli platformun köşelerinin koordinatlarına ve eklem dönme açılarına bağlıdır. Yukarıda verilen (3.41) ve (3.48) denklemleri kullanarak x_i elimine edilebilir. Elde edilen denklem;

$$\begin{vmatrix} J_1M_3-J_3M_1 & J_2M_3-J_4M_1-J_3M_2 & J_5M_1-J_4M_2 & -J_5M_2 \\ J_1M_2-J_2M_1 & J_1M_3-J_3M_1 & -J_4M_1 & -J_5M_1 \\ \mathrm{M}_1 & \mathrm{M}_2 & \mathrm{M}_3 & 0 \\ 0 & \mathrm{M}_1 & \mathrm{M}_2 & \mathrm{M}_3 \end{vmatrix}=0 \tag{3.49}$$

Şeklinde ifade edilebilir. Buradaki M_i (3.49) denklemindeki x_3 terimlerinin katsayılarıdır;

$$M_1=I_1x_1^2+I_4 \qquad M_2=I_3x_1 \qquad M_3=I_2x_1^2+I_5 \tag{3.50}$$

(3.49) deki 16. Dereceden denklem çözülerek x_1 için çözüm bulunur. Bu çözümlerden imajiner olanlar ve negatif değere sahip olanlar elimine edilir. Bulunan x_1 ler (3.41) ve

(3.48) denklemlerinde yerine konarak her bir x_1 değeri için iki adet x_2 ve iki adet x_3 değeri elde edilir. Bulunan x_2 ve x_3 değerleri (3.40) denkleminde yerine konularak doğrulukları araştırılır. Bulunan x ifadelerinden ϕ_3 açıları oradan da w vektörleri elde edilir. Bu sayede hareketli plaftormun köşe noktalarının koordinatları bulunur. Bulunan P_i noktalarından üst platformun ağırlık merkezinin konumu olan G bulunmuş olur;

$$G = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \tag{3.51}$$

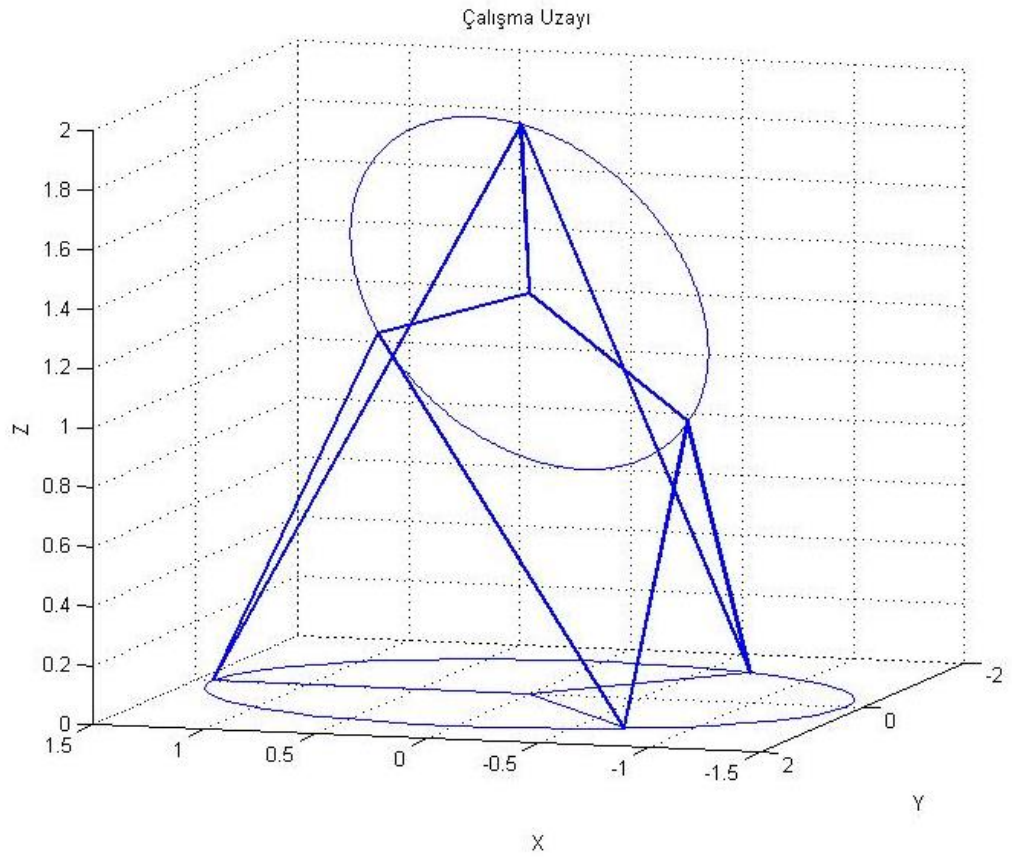
Rijit bir cisim üst platformun köşe noktalarının yine üst platformunun eksen takımına göre konumları bilinmektedir p_i. Bu durumda (3.9) deki rotasyon matrisi p_i, P_i üst platformun köşe noktalarının sırasıyla üst platformun eksen takımına ve referans eksen takımına göre olan konumları, G öteleme vektörü kullanılarak (3.12) deki denklem sisteminin açık ifadesi olan 9 adet denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımlarından 4 tanesi çözülerek rotasyon matrisindeki referans eksen takımı etrafındaki üst platformun dönme açıları bulunmuş olur. Böylece düz kinematik analizin esas amacına ulaşılmış olur.

3.4. Mekanizmanın Çalışma Uzayı

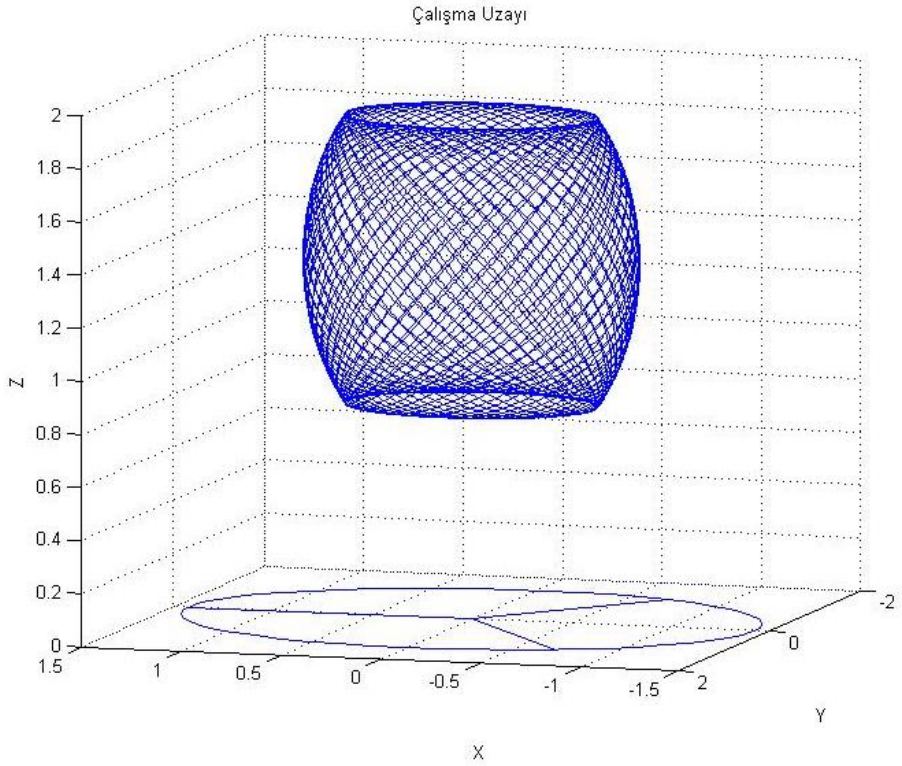
Çalışma uzayı, hareketli platformun ağırlık merkezinin varabileceği yer olarak tanımlanır. Platform hareketini belirleyen unsurlar ise bağlantı noktaları ve bacak boylarıdır. Hareketi sınırlayan bazı durumlar vardır. Bunlar geometrik ve kinematik sınırlamalar olarak adlandırılır. Geometrik sınırlamalar sabit ve hareketli platformun yarıçapları , platformların merkezleri arasındaki uzaklık ve bağlantı yerleridir. Kinematik sınırlamalar ise bağlantı elemanlarının yapacağı maksimum ve minimum hareket limitleri, bacak hareketlerinde sınırlamalar ve bacakların birbirleri ile çarpışmasıdır. Paralel mekanizmalarda çalışma uzayı seri mekanizmalara göre daha sınırlıdır.

Bu çalışmada ters kinematik yöntemle çalışma uzayı analizi yapılmıştır. Üst platformun yarçapı 0,4125 metre, alt platformun yarçapı ise 0,7125 metredir, ayrıca alt platformun merkez noktasından üst platformun merkez noktası uzunluğu 1,135 metre dir. Hareketler merkezde bulunan sabit bacaktan dolayı sınırlanmıştır. Hareketli platformda hareket merkez sabit kalmak koşuluyla X,Y koordinat sisteminde yer değiştirmektedir.

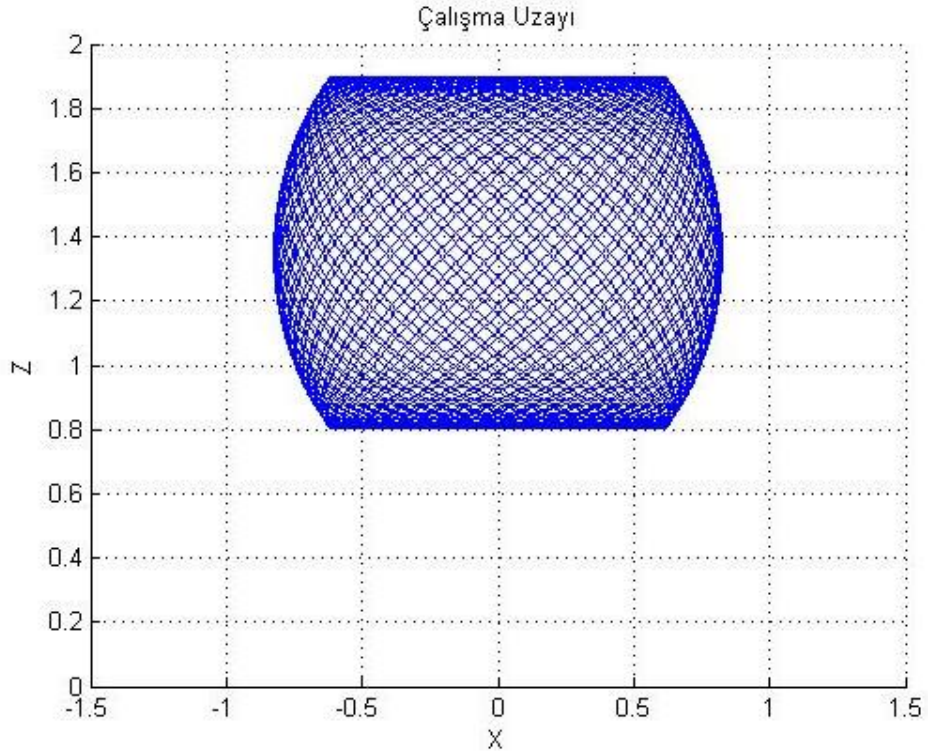
Şekil 3.9'te üst platform X ve Y eksenlerde 30 derecede döndürülmüş olup, döndürme esnasında üst platformun merkezi alt platformun merkezine sabit şeklinde durmaktadır. Mafsal uzunluğu aynı mesafede kalmaktadır, böylece ayakların uzunluğu değişmektedir. Şekil 3.10 ve 3.11' göre üst platform Z eksen etrafında istenen adette tam dönüş halkası oluşturmaktadır ve bu halkalar Z eksende 0 dereceden 360 dereceye kadar bölmektedir. Sonuç olarak elde edilmiş uzay mekanizmanın çalışma uzayını X ve Y eksenlerde 30 derecede göstermektedir. Harekete ait çalışma kodları EK-4' te sunulmuştur.



Şekil 3.9. Hareketli üst platform X ve Y eksenlerde 30° de



Şekil 3. 10. Üç eksen hareket uzayı



Şekil 3.11. İki eksen hareket uzayı

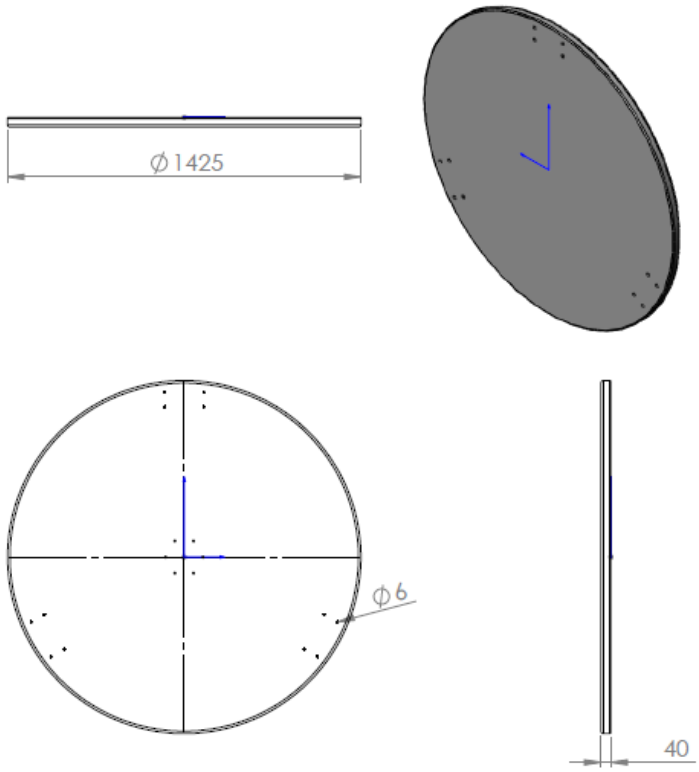
4. MEKANİK TASARIM VE DOĞRULAMA

4.1. SolidWorks Çalışmaları

Manipölatürün 3D modeli SolidWorks programında tasarlanmıştır. 3D modeli tasarlamada ana amaç .STL dosyasının oluşturulmasıdır. Elde edilen dosya Matlab programda Simmecahnics simülatörü kullanarak gerçek zamanlı simülasyon için kullanılmıştır. 3D kısmında tüm ölçüm birimi mm'dir.

4.1.1. Sabit platformu

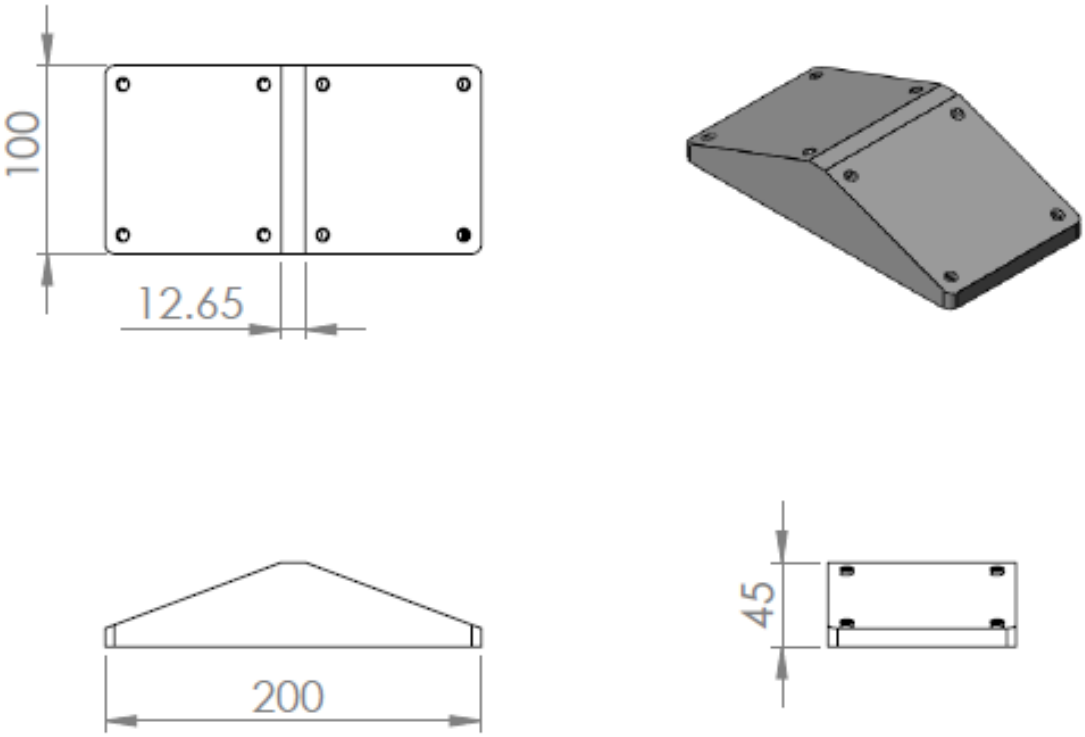
Sabit platform manipölatürün alt kısmında durağan şekilde bulunan kısmı olup tüm diğer ekipmanlar bunun üstüne yerleştirilmiştir. Sabit platfromun çapı 1425mm ve kalınlığı 40 mm'dır. 120 derece açıda 3 adet kama Sabit platformun bağlantı yüzeyinde bulunmaktadır. Şekil 4.1' de alt platformun Solid work programında hazırlanan görseli verilmiştir.



Şekil 4.1. Sabit platformun 3D modeli

4.1.2. Bacak bağlantı arayüzü

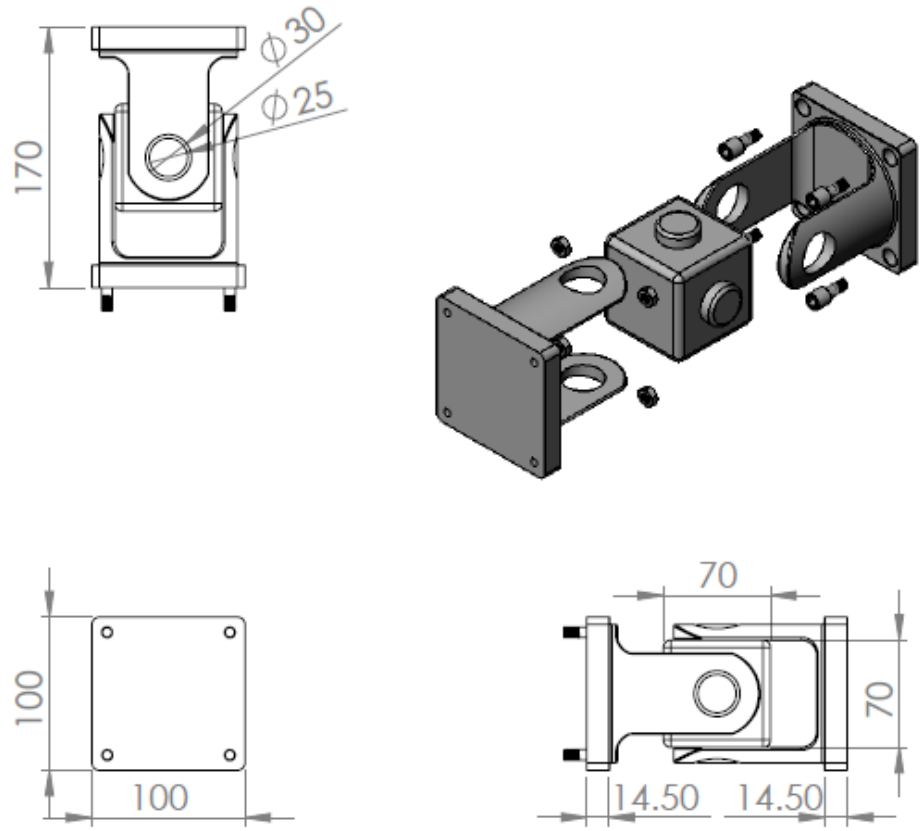
Bu parça iki universal bağlantı noktasının sabit platforma aynı noktada sabitlenmesi için tasarlanmıştır. Boyutu şekil 4.2’ de gösterilmektedir. Şekil 4.2’ de verilen bağlantı arayüzü üç adet sabit platformunda ve 3 adet hareketli platformunda kullanılmaktadır.



Şekil 4.2. Bacak bağlantı arayüzü

4.1.3. Hareket eklem noktası

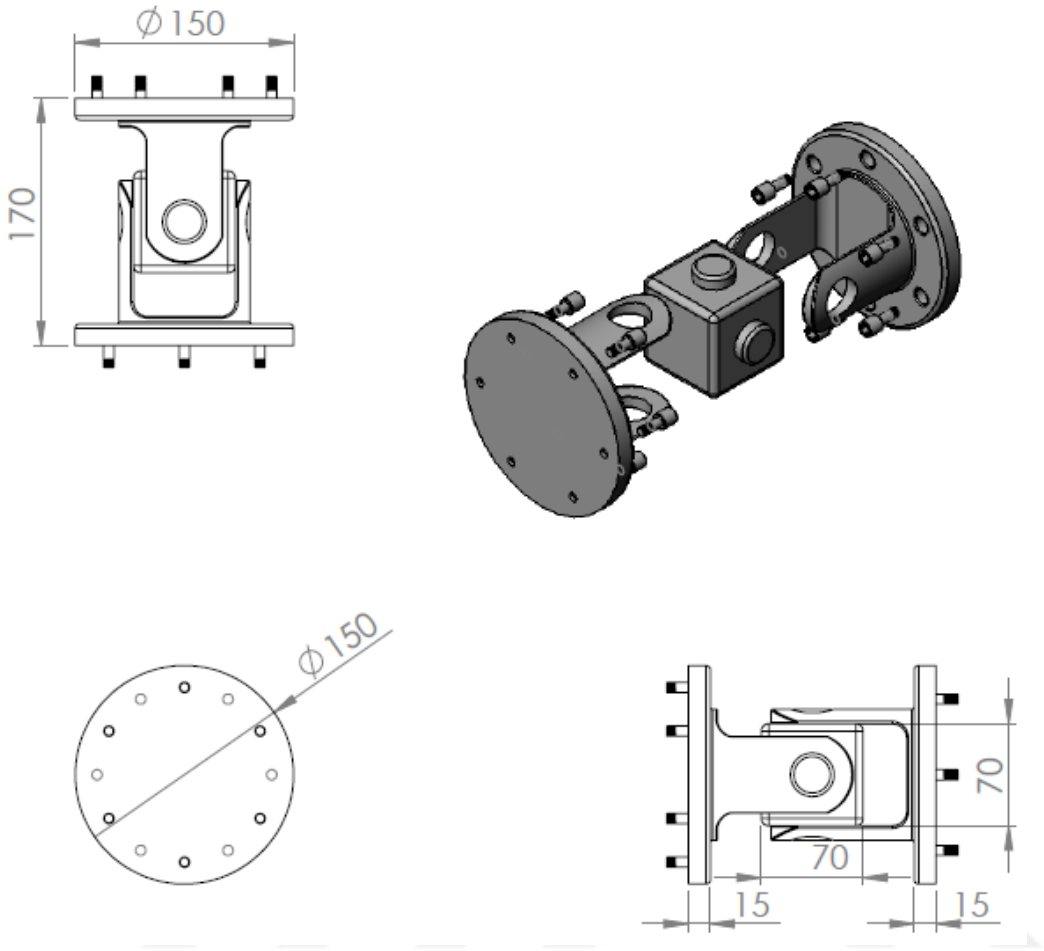
Hareket eklem noktası silindirin bacak bağlantı arayüzüne sabitlenmesi için tasarlanmıştır. Somun ve vidalar ile bağlantı gerçekleştirilerek hareketli masfal elde edilmiştir. Her hareketli ayak için kullanılmıştır. Sistemde sabit platformda 6 ve hareketli platformda 6 olmak üzere toplam 12 adet hareket eklem noktası kullanılmıştır. Şekil 4.3’ de hareketli bacakların platformlara bağlantı noktasında eklem bağlantı elemanının görseli verilmiştir.



Şekil 4.3. Hareket eklem noktası

4.1.4. Sabit bacak hareket eklem noktası

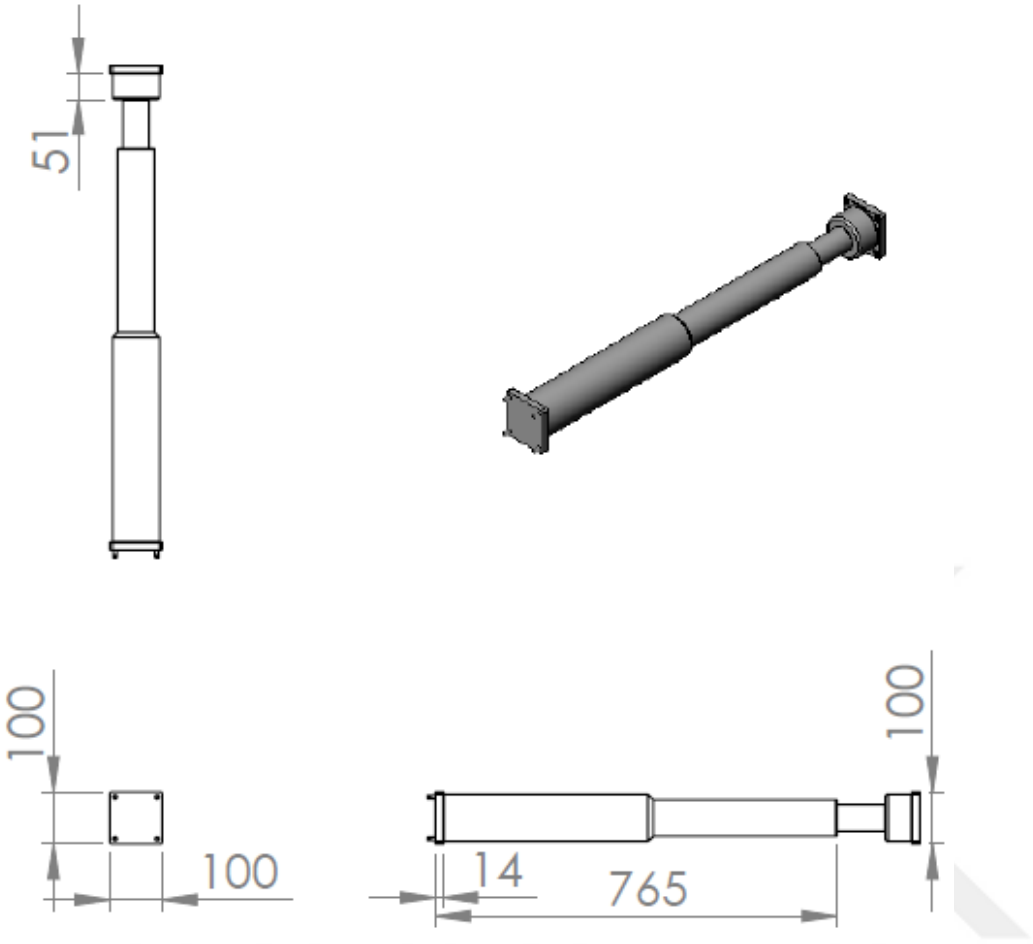
Sabit bacağın hareketli platforma bağlantısı sırasında Şekil 4.4' te verilen hareket eklem bağlantı elemanı kullanılmıştır. Bu bağlantı ile hareketli üst platform her yönlü hareketi sağlanmıştır. Sabit bacağın alt kısmı sabit platforma doğrudan bağlanmış olup hareketsizdir. Bu tip hareketli noktadan sadece bir tane kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Sabit bacak ile hareketli platform arasında kullanılan eklem noktası

4.1.5. Silindir

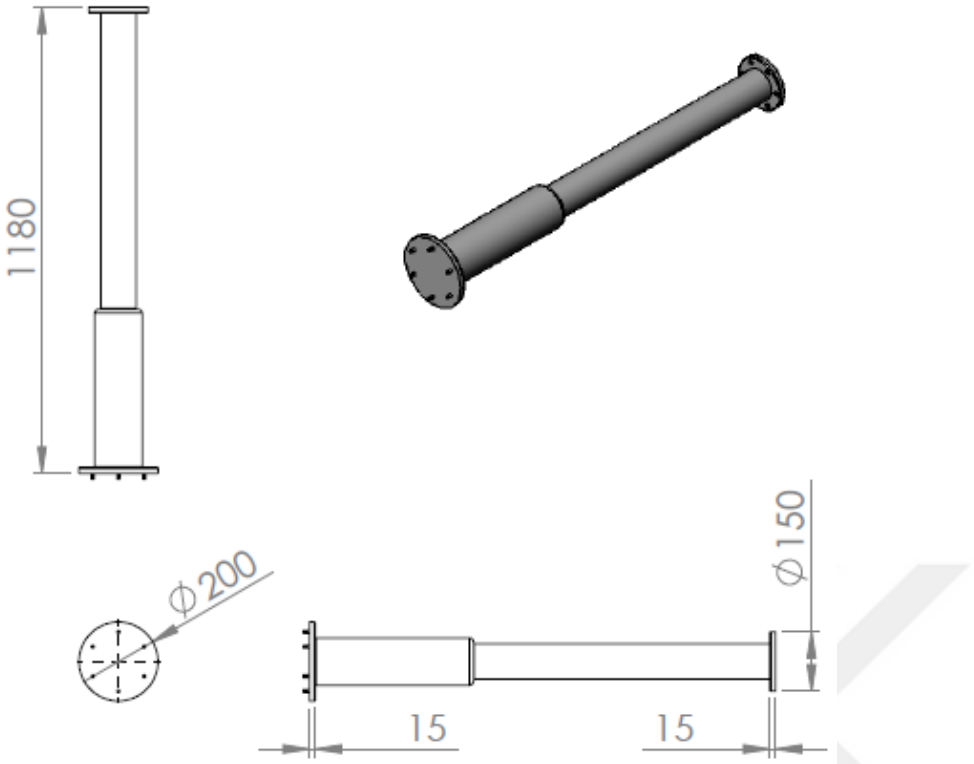
Silindir önemli parçalardan birisi olup hareketin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Şekil 4.5' de boyutları verilmiş olup alt ve üst platform arasındaki hareketi silindirin strok boyu sınırlamaktadır. Strok boyu 1350'mm dir. Silindir her iki platforma bağlantı noktası ile bağlanmaktadır. Bu çalışmada paralel manipulatörde 6 adet silindir kulanılmıştır.



Şekil 4.5. Silindirin 3D ebatları

4.1.6. Sabit bacak

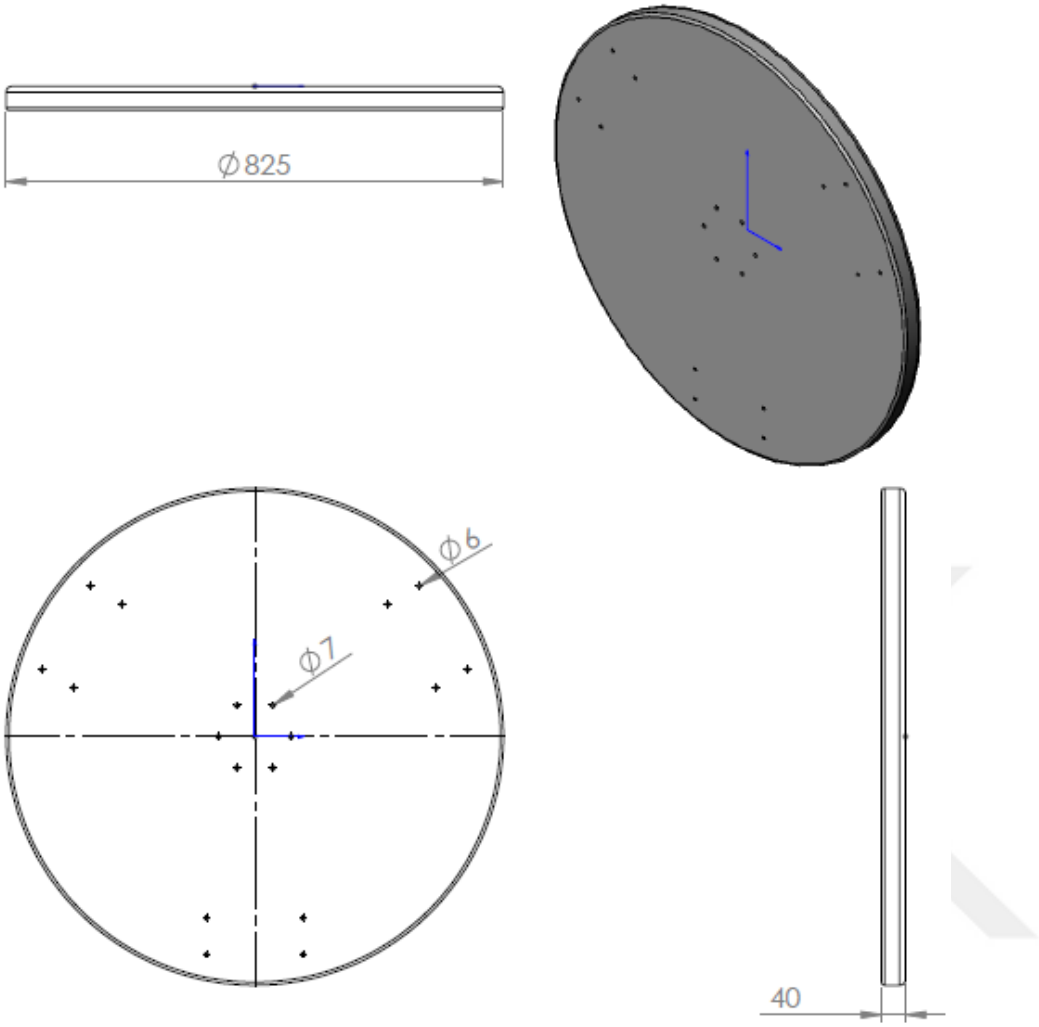
Sabit bacağın boyutu şekil 4.6’ da verilmiştir. Bir tarafı sabit platformun merkezi ve diğer tarafı hareketli platformun bağlantı noktasına monte edilmektedir. Sabit bacağın kullanılma amacı üstteki platformunda fazla ağırlık taşınması ihtiyacıdır. Bu çalışmanın en önemli özelliği manipülatöre sabit bacak eklemesidir. Bu eklenti ise manipülatörde kinmatik ve dinamik denklemleri ve çalışma uzayını değiştirmektedir. Sabit bacak da diğer parçalar gibi sonumlar ile monte edilmektedir.



Şekil 4.6. Sabit bacağın 3D ebatları

4.1.7. Hareketli platformu

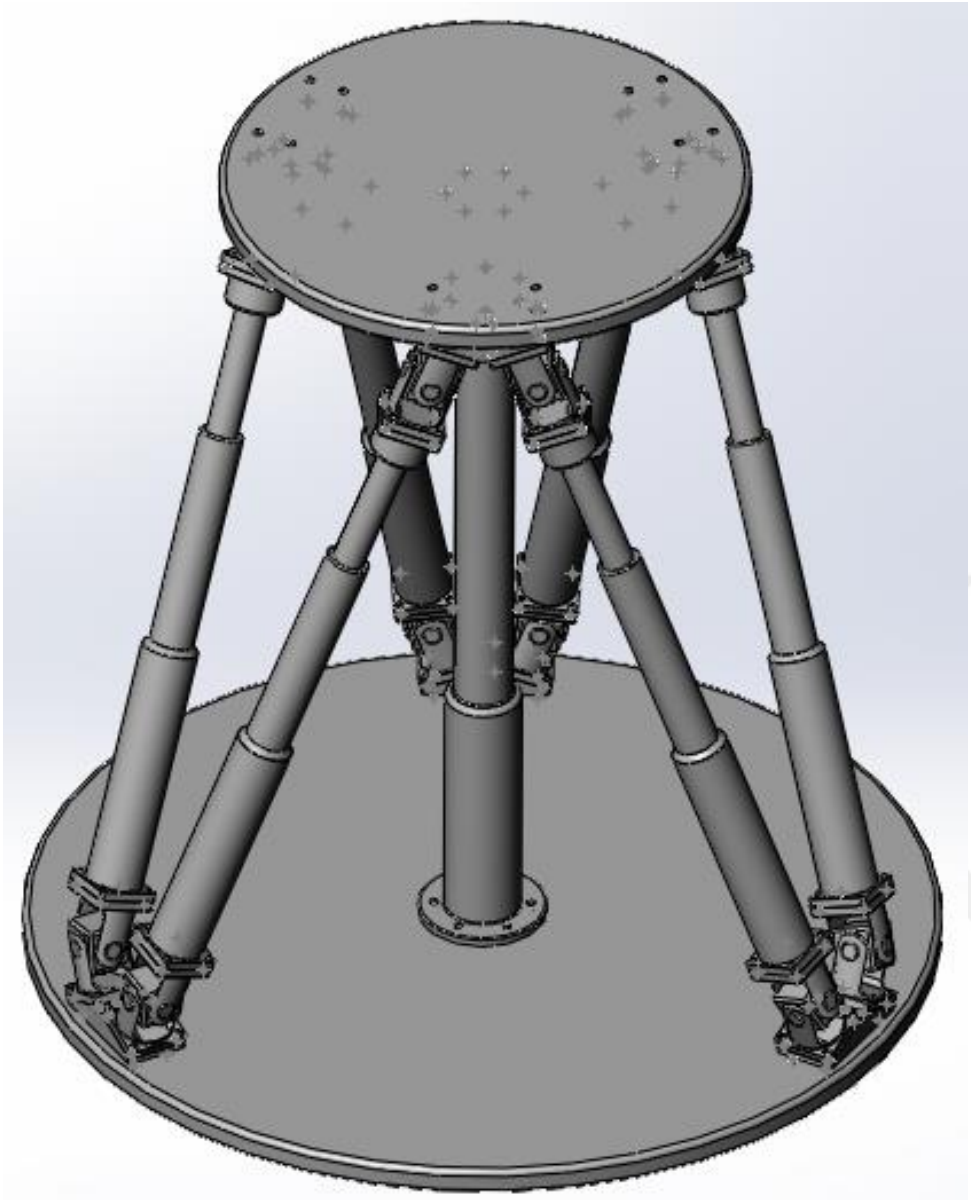
Harekatli platformun çapı 825mm ve kalınlığı 40 mm'dir. Şekil 4.7'de verildiği üzere üç noktada bağlantı noktası ve merkezde sabit bacağın bağlantı noktası verilmiştir.



Şekil 4.7. Hareketli platformun 3D ebatları

4.2. Altı DOF Stewart Platformu bir Sabit Bacaklı 3D modeli

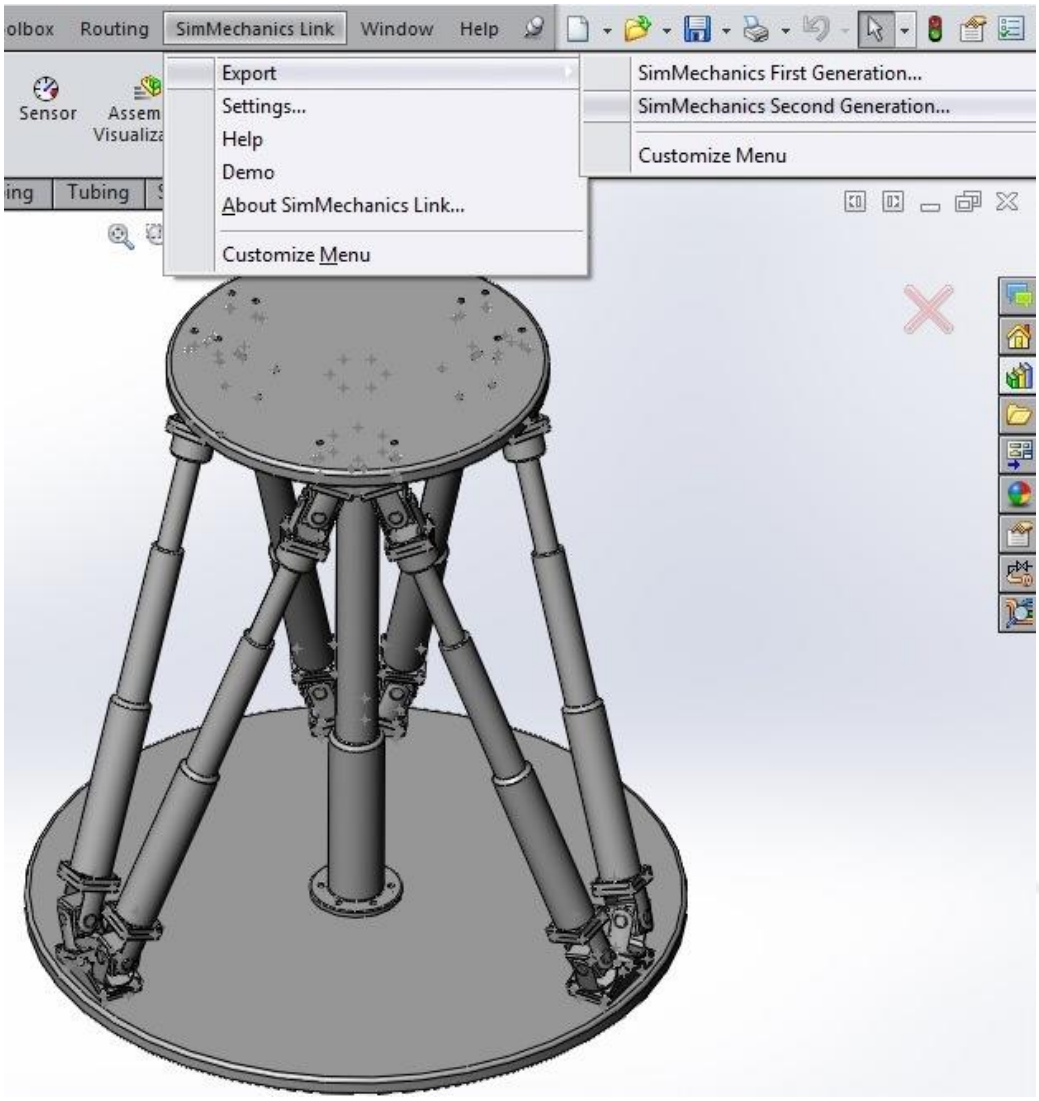
SolidWorks 3D boyutlu tasarım da kullanılmaktadır. Bu çalışmada SolidWorks programı ile 3 boyutlu Stewart platformu tasarlanmıştır. Yukarıda açıklanan parçaları monte edikten sonra en son Stewart platformun Şekil 4.8 de verilen yapı elde edilmiştir. Bu modelde 6 hareketli ve 1 sabit bacak yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 4.8. Stewart platformunun 3D ebatları

4.3. SolidWork'tan SimMechanichs'a Aktarım

Bir dosyanın SolidWorks'tan Matlab'a aktarılmasından önce bazı program araçlarının bilgisayarda kurulması gerekmektedir. Bilgisayarda SimMechanics linkinin SolidWorks de kurulmuş olması gerekmektedir. SolidWorks'ta add-in kısmında SimMechanics Link'i eklenerek proje aktarılır. Projenin SolidWorks' tan SimMechanics aktarımı sırasında Şekil 4.9'da belirtilen üst linkte "export" komutu tıklanarak "SimMechanics Second Generation" komutu aktif edilerek transfer gerçekleştirilir. Bu sayede Stewart platformun hareketine ait kodlar Matlab' a aktarılmaktadır.



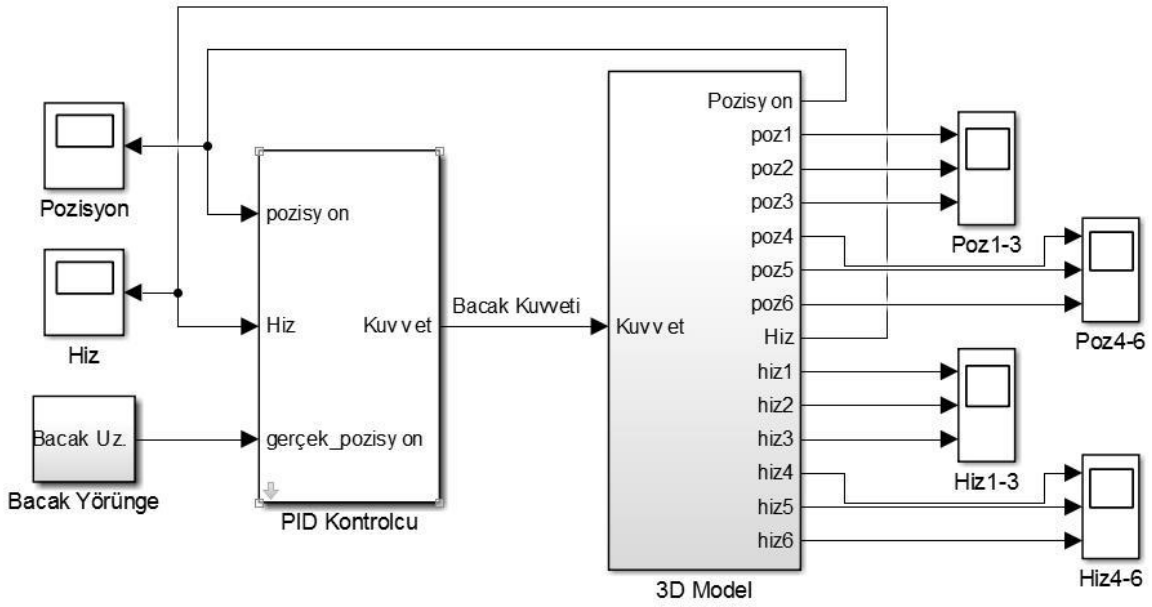
Şekil 4.9. SolidWorks'ta stewart platformu

CAD export prosedürü, bir SimMechnics Import XML dosya ve bir STL dosyalar dizisi oluşturmaktadır. XML dosyası montaj yapısı ve her partını tanımlama parametrelerini kapsamaktadır. STL dosyaları her parçanın 3D geometrisini tanımlamaktadır. Export prosedürü tamamladıktan sonra SimMechanics Import XML dosyasını SimMechanics'a göndermektedir.

4.4. Matlab da Model Çalışmaları

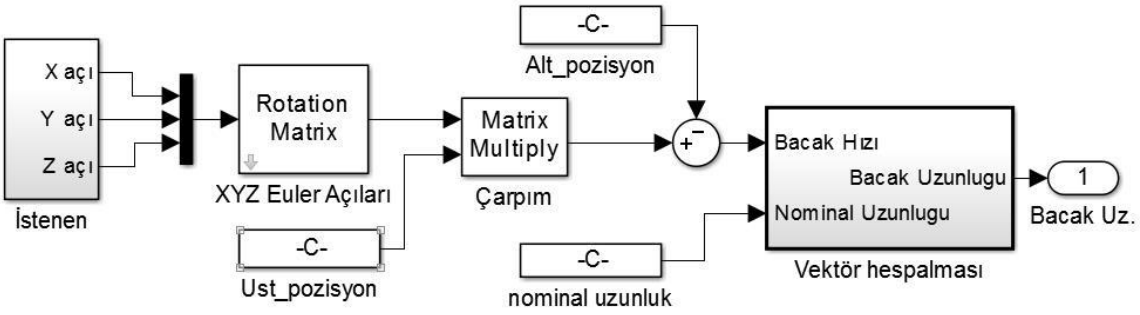
Paralel manipülatör SolidWork programında mekanik tasarımı yapıldıktan sonra mekanik sistemin kodları benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere SimMechanics aktarılmıştır.

Solidwork programından sistemin 3D modeli oluşturulmuş olup diğer komutlar Matlab da hazırlanmıştır. Sistemin genel görünüşü Şekil 4.10 da verilmiştir. Stewart platformu olarak ta ifade edilen paralel manipülatörde hareketli platformun pozisyonu, hızı ve bacak yörüngesi giriş değişkenleridir. Çıkış değişkenleri ise pozisyon bilgisi ve hız bilgisi takip edilmektedir. EK1' de verilen ilgili kodlar girildiğinde herhangi bir konum için bacak boyları hesaplanmaktadır. Pozisyon, hız ve bacak yörünge vektörleri kullanılarak PID denetleyici ile bacak kuvvetleri hesaplanmaktadır.



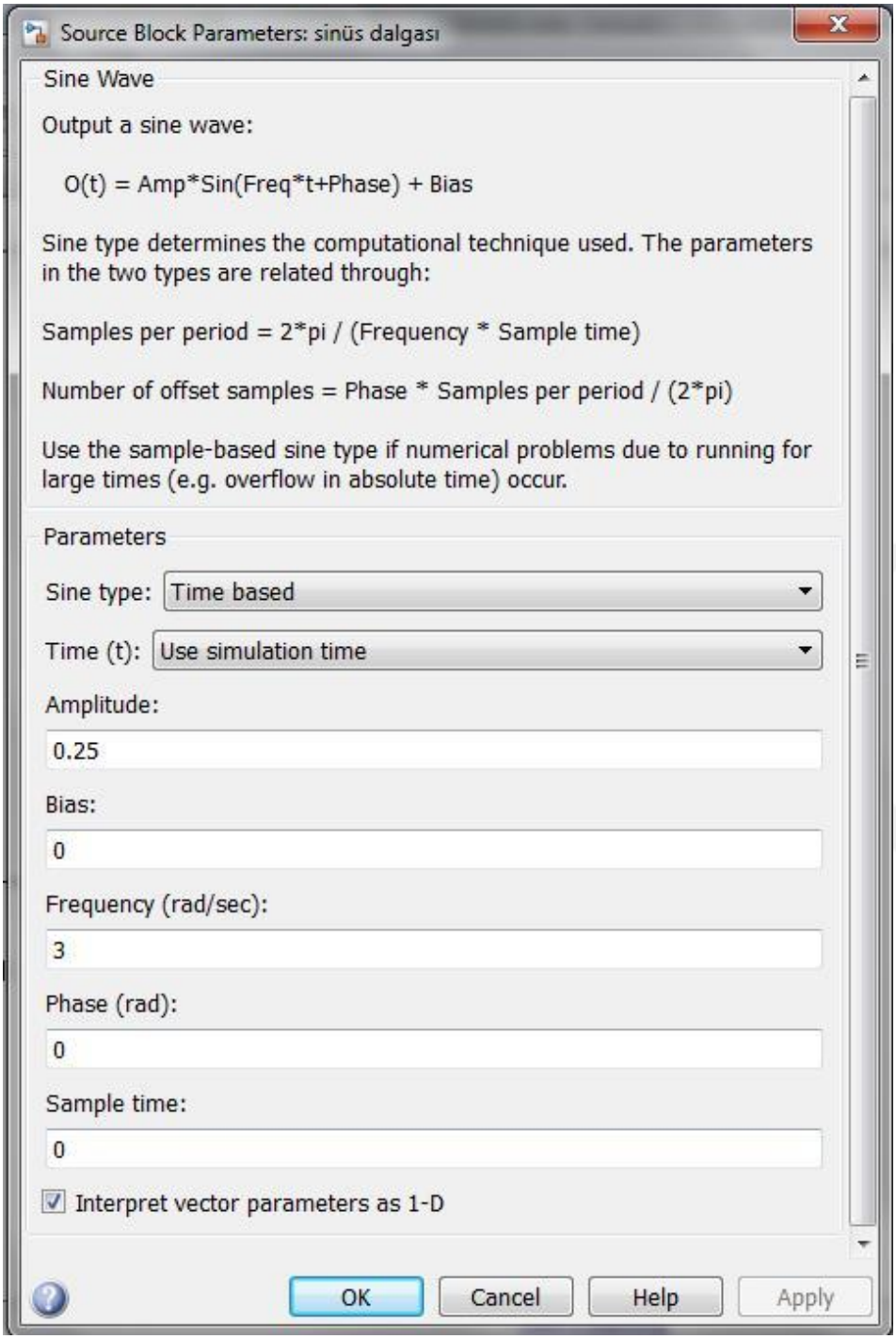
Şekil 4.10. Paralel manipülatör modeli

Şekil 4.10 da verilen bacak yörüngesi giriş değişkeninin iç detayı Şekil 4.11' de verilmiştir. Bacak yörüngesinde değişkenler X,Y ve Z istenen konum açılarıdır. Merkezde sabit bacak bulunması sebebiyle Z düzleninde hareket sınırlanmıştır. X, Y ve Z düzlemindeki konuma ait açı bilgisi dönüşüm matrisinde hesaplanarak hareketli platformda bağlantı noktalarının koordinatları ile çarpıldıktan sonra gerçek koordinat bilgilerinden farkını alarak yeni konum için bacak hızları bulunmaktadır. Bacak boylarının mevcut son hali diğer giriş değişkeni olarak kullanılarak bacak uzunlukları vektörü bulunmaktadır. Bacak uzunlukları vektörü hesaplanarak yeni konuma gitmek için referans değer üretilmektedir.



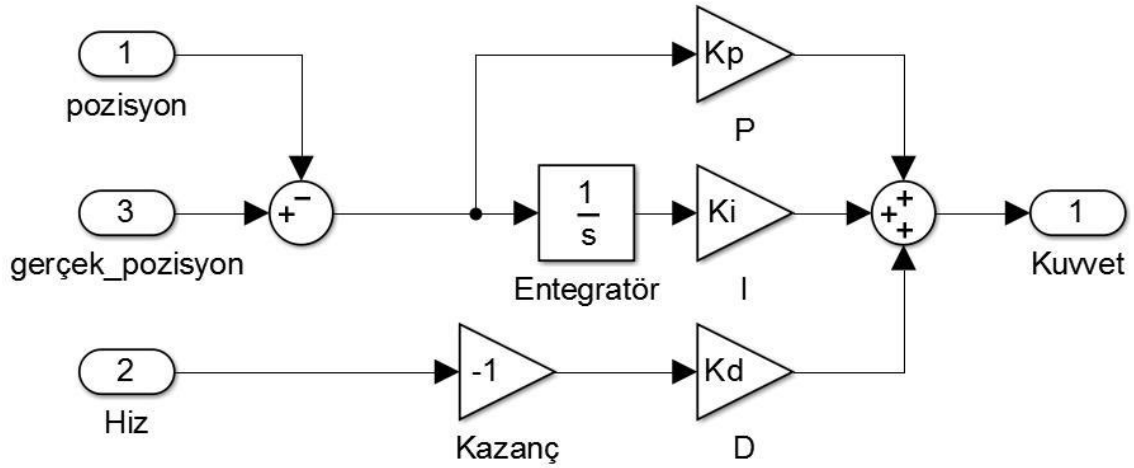
Şekil 4.11. Bacak uzunlukları vektörü

Pozisyon girişi için referans olarak 360 derece konum bilgisi kullanmak için sinüs sinyal referans alınmıştır. Sinüsoidal sinyal x, y ve z düzlenimde değişken olarak kullanılarak tam bir tur içerisinde hareketli platformun konum alması sağlanmıştır. Hareket sınırları konularak sabit bacaktan dolayı hareketli platformun sadece merkezde hareket etmesi sağlanmıştır. Matlab da sinüs sinyal üretecine ait ayar penceresi Şekil 4.12 de verilmiştir.
Sinüs sinyalde genlik ve frekans değiştirilerek mekanik sistemin hızlı veya yavaş hareket etmesi ayarlanmaktadır. Genliği (Amplitude) değiştirilerek hareket büyüklüğü, frekans değiştirilerek hareketin hızı referans olarak değiştirilmektedir. Hareketin hiç durmaksızın devam etmesi için sinyal sürekliliği gerekmektedir. Referans sinyal durdurulursa son konumunda sistem kalmaktadır.



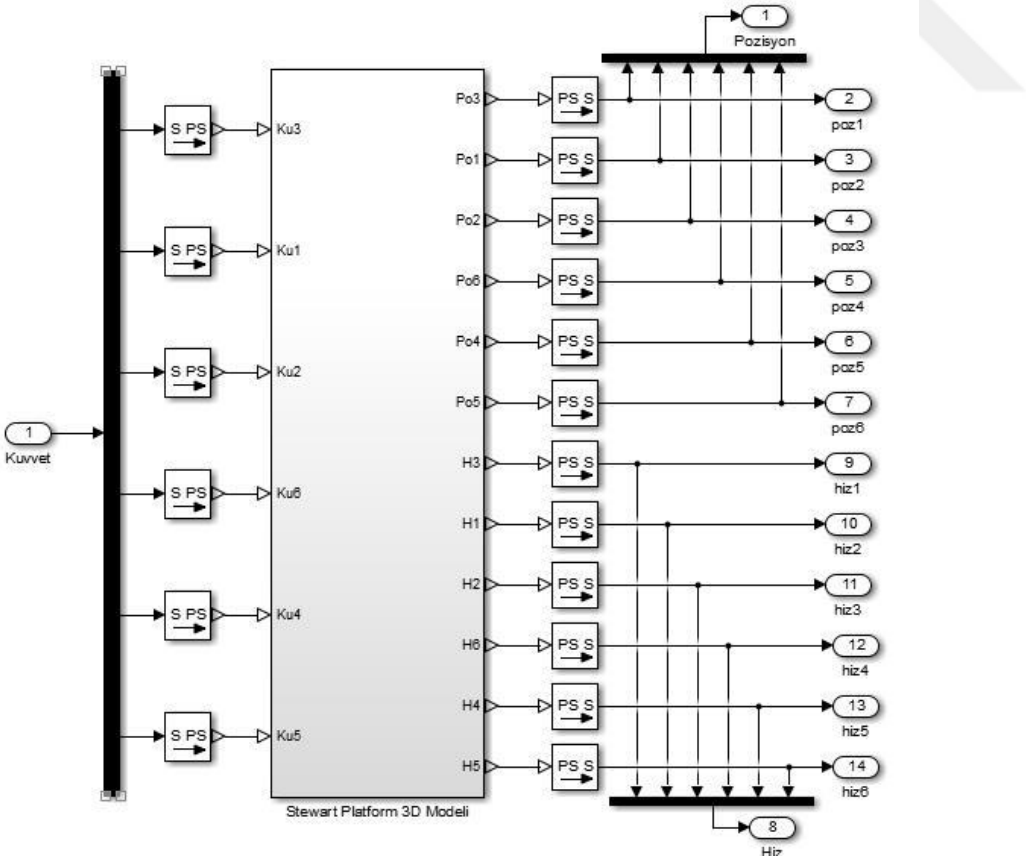
Şekil 4.12. Sinüs sinyal formu

Referans konuma ait bilgi hesaplandıktan sonra gerçek konum bilgisi farkı alınarak istenilen konuma sistemin gitmesi PID denetleyici ile kontrol edilmektedir. Denetleyicide Matlab modeli esas alınmıştır. Şekil 4.13 de Matlab' da kullanılan PID modeli verilmiştir.



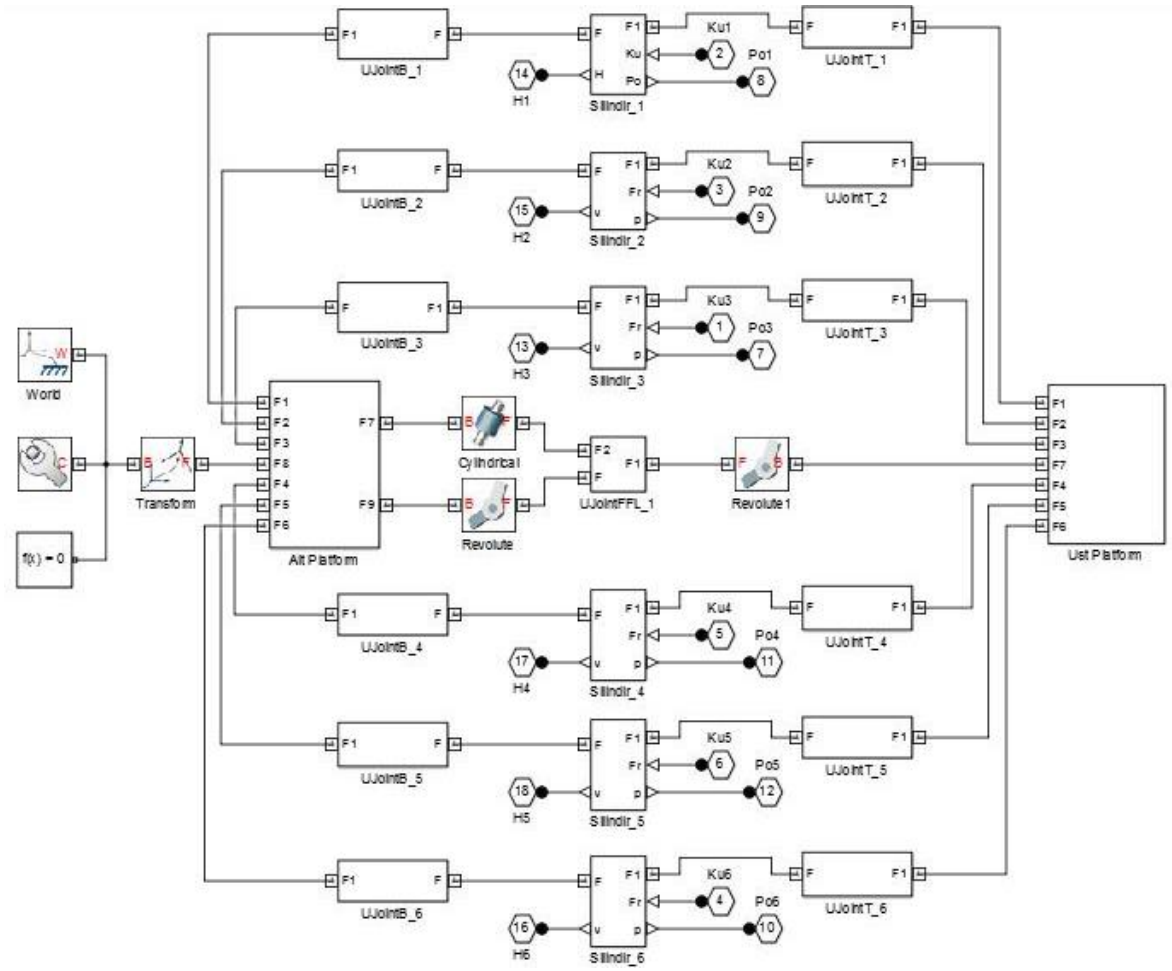
Şekil 4.13. PID denetleyici

Paralel manipülatörün (Stewart platformun) üç boyutlu modeli Şekil 4.14 te verilmiştir. Modelde giriş değişkeni kuvvet çıkış değişkeni ise her ayağın pozisyon ve hız değeridir. Platformun üç boyutlu (3D) modeli kullanılarak çıkış değişkenleri bulunmaktadır.



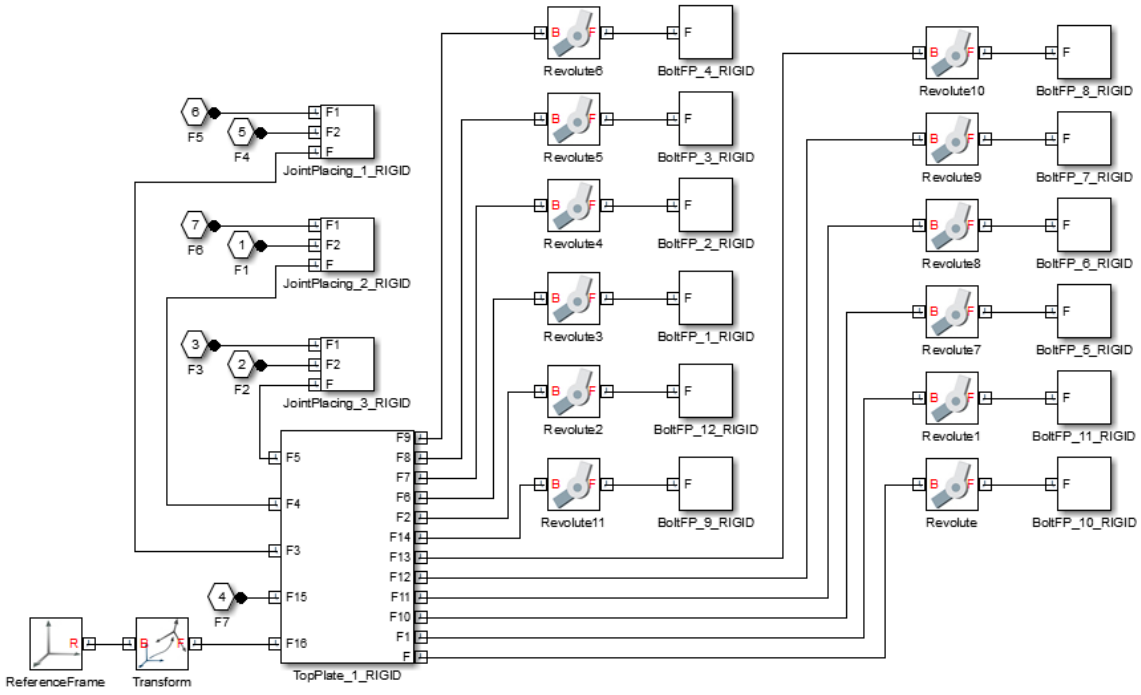
Şekil 4.14. Paralel manipülatör (Stewart platform) 3 boyutlu modeli

Paralel manipülatörün 3D modeli sabit ve hareketli platform bağlantı noktaları ve silindirlerin modellenmesinden oluşmaktadır. Taban da bulunan sabit platform ve üst tarafta bulunan hareketli platform arasındaki bağlar kullanılarak hareket sağlanmaktadır. Şekil 4.15 de mekanik sistemin tüm bileşenleri verilmiş olup referans değere göre hareket sağlanmaktadır. Alt ve üst bağlantı noktaları ve silindirler her bacak için ayrı ayrı ifade edilmiş olup, bacak hareketleri silindir devre elemanı kullanılarak modellenmiştir.



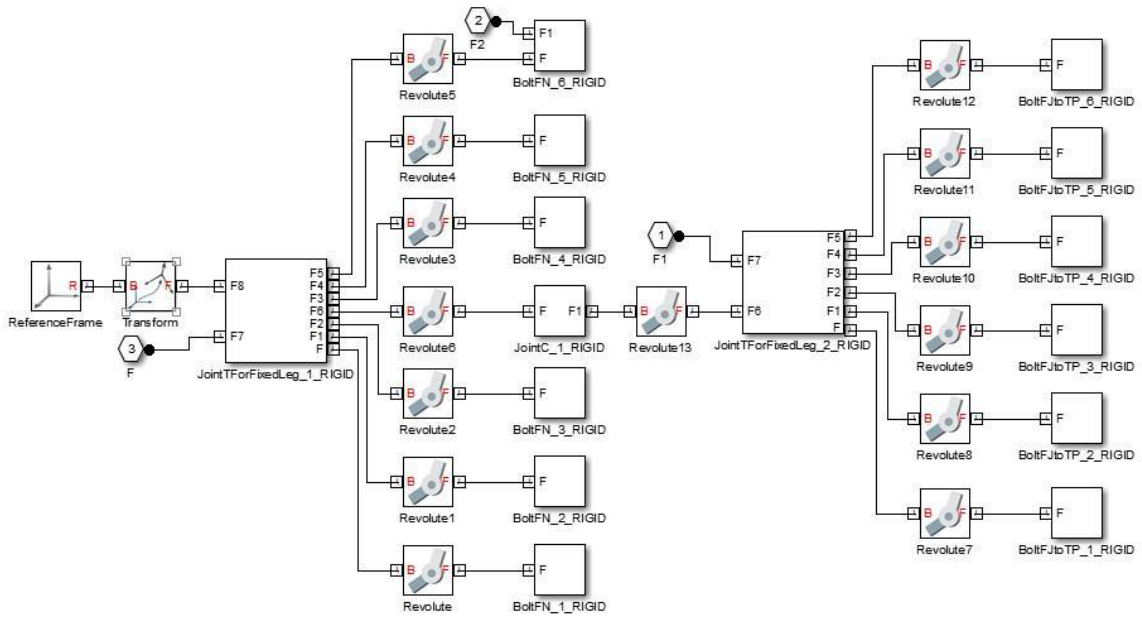
Şekil 4.15. Paralel manipülatörün mekanik modeli

Şekil4.15 de verilen hareketli üst platformun açık devre şeması Şekil 4.16 da verilmiştir. Referans düzlemde x,y ve z değerleri transformasyon veya dönüşüm matrisi kullanılarak elde edilen referans kuvvet değerine göre yeni konuma gidilirken gerekli hız ve pozisyon değerlerini üretmektedir.



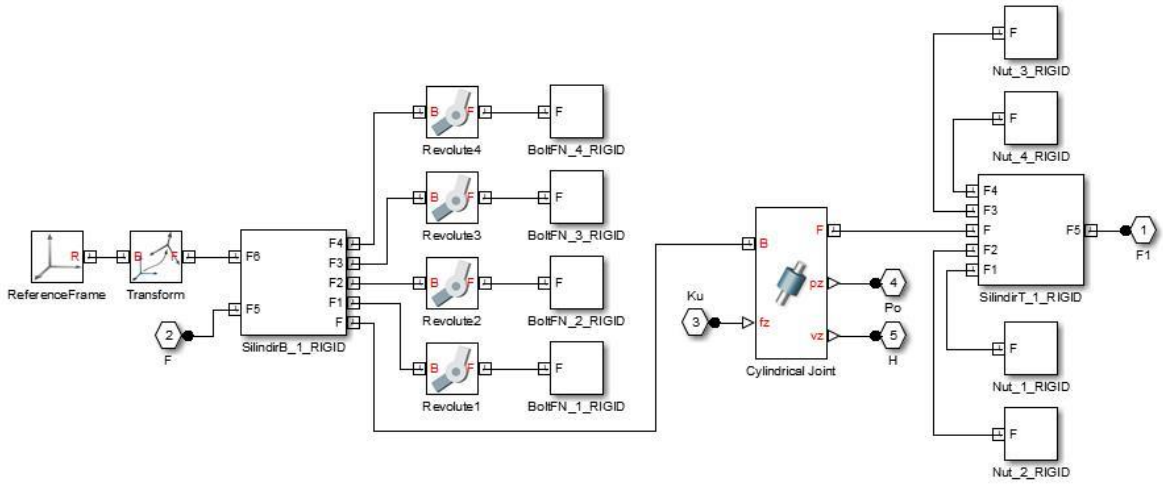
Şekil 4.16. Hareketli üst platform modeli

Üst platformda 6 adet hareketli bacak bulunmaktadır. Her hareket noktası üst platformda ifade edilirken Şekil 4.17 de verilen modele sahiptir. Bağlantı noktası 4 ayrı noktadan sabitlenmesi sebebiyle her nokta için uygulanan kuvvet hesaplanmaktadır.



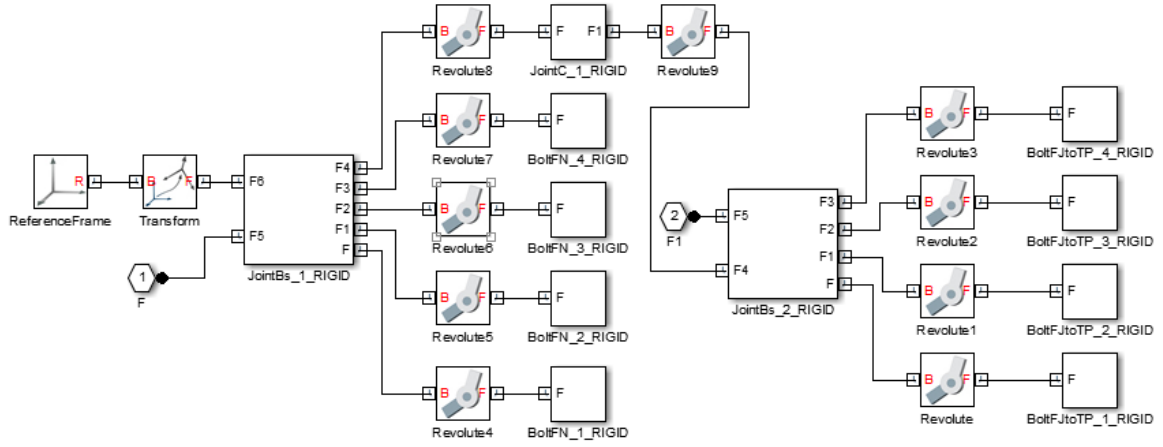
Şekil 4.17. Hareketli üst platform bağlantı noktası modeli

Paralel mekanizmada kullanılan silindirin modeli Şekil 4.18 de verilmiştir. Silindirde uygulanan kuvvete karşılık hız ve pozisyon bilgisi üretilmektedir. İstenen konuma gidilmesini sağlayan gerekli kuvvet değeri hesaplanarak modelde yeni konum için hesaplama yapılmıştır. Silindirlerin üst ve alt bağlantı noktası modelde ayrıca modellenmiştir.



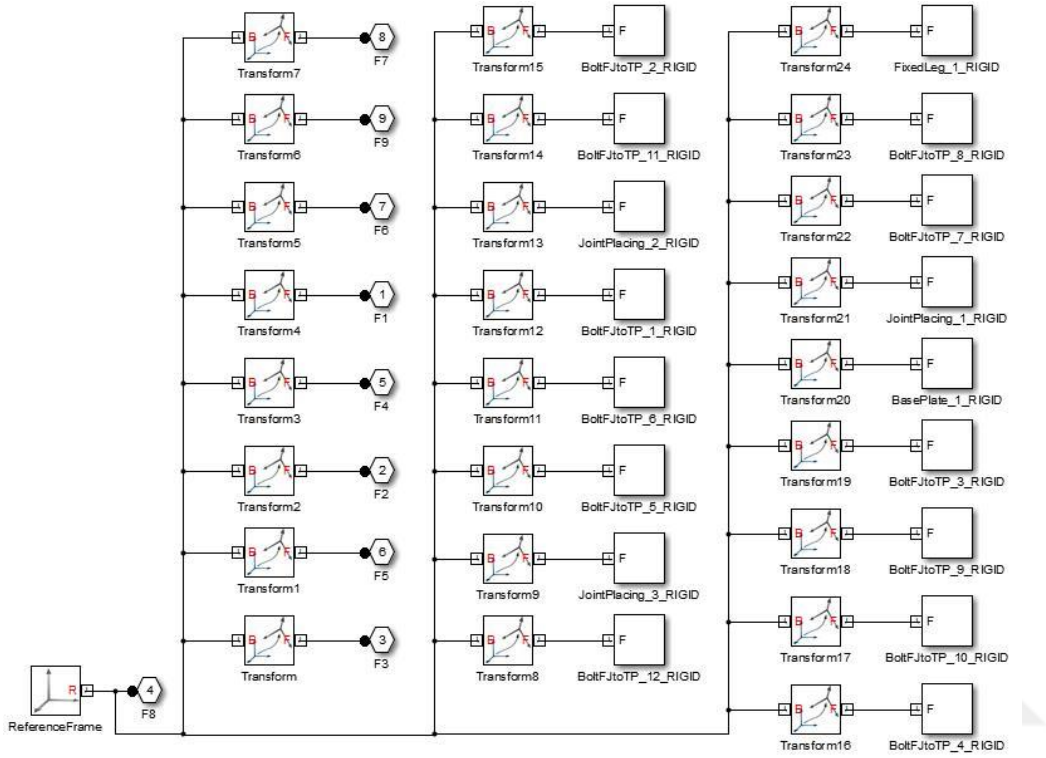
Şekil 4.18. Silindir modeli

Silindirin sabit alt platforma bağlantı noktasına ait modeli Şekil 4.19 da verilmiştir. Benzer şekilde Şekil 4.17 ise üst bağlantı noktası modelidir.



Şekil 4.19. Alt platform bağlantı noktası modeli

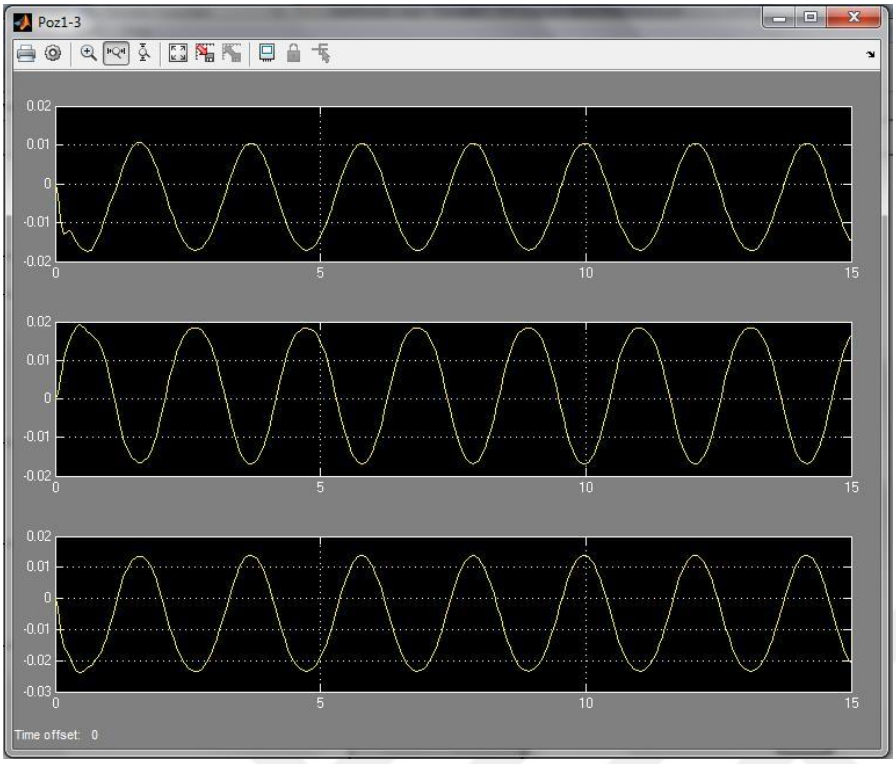
Alt platform sabit olması sebebiyle modeli ayrıca çıkartılmıştır. Silindirler bağlantı noktası kullanılarak alt platforma sabitlenmiştir. Matlab da her noktanın modeli çıkarılarak paralel manipülatörün modellenmesi tamamlanmıştır.



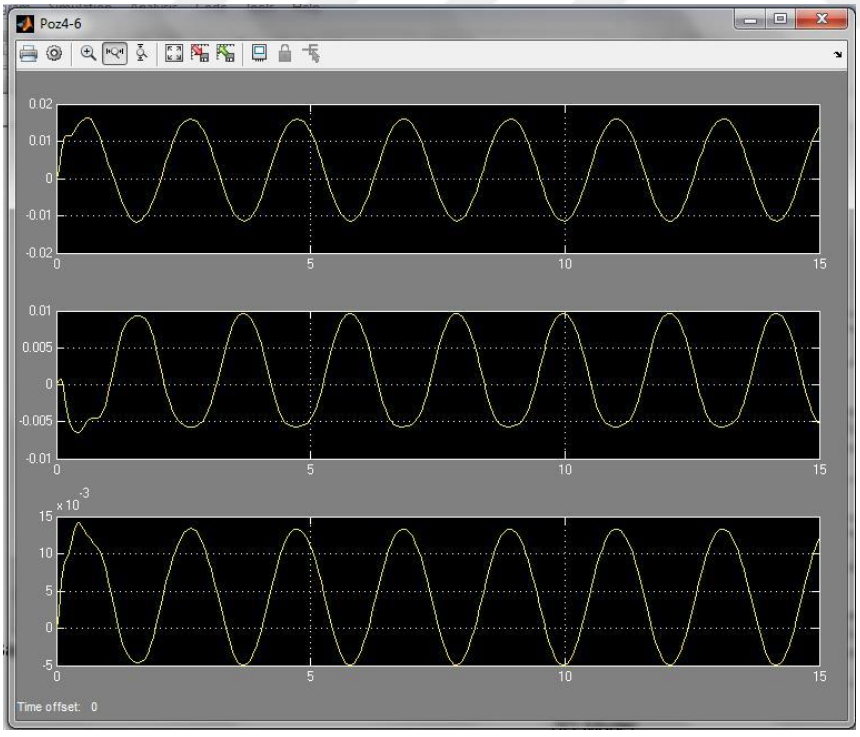
Şekil 4.20. Sabit alt platform modeli

4.5. Matlab da Benzetim Çalışmaları

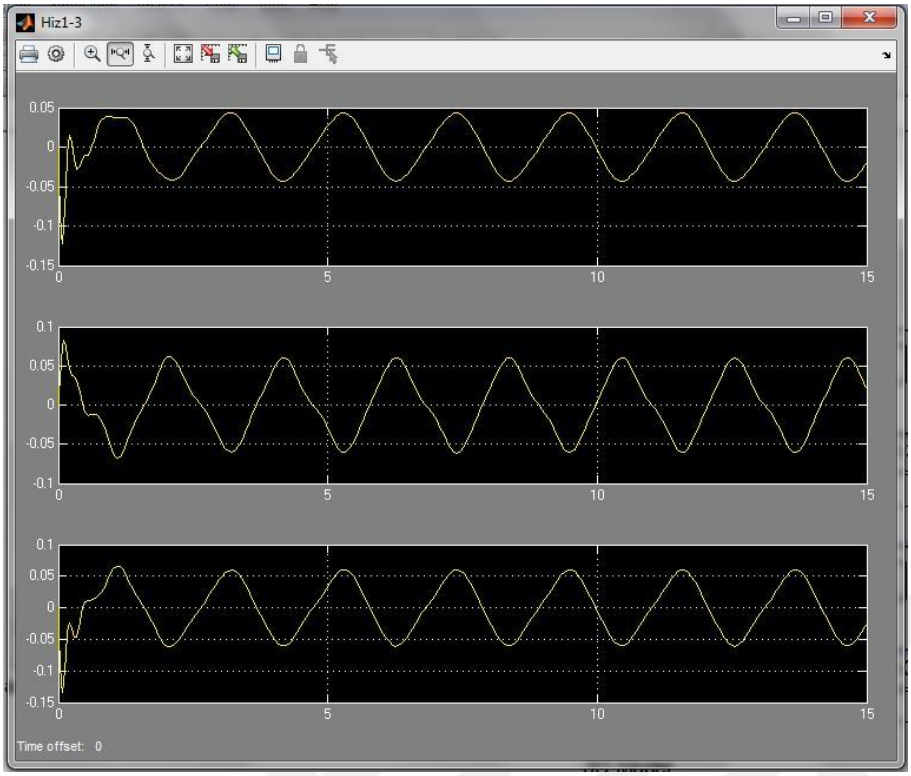
Paralel manipülatörde her ayakta bulunan silindir uygulanan kuvvete bağlı olarak hız ve konum almaktadır. Kullanım alanı gereksinimi doğrultusunda sabit konum veya istenen konumlar arasında hareket sağlanmıştır. Referans giriş sinyali yunuslama hareketi gerektiğinde manipülatörün takip yeteneği incelenmiştir. Denetleyici olarak PID kullanılmıştır. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22' de kapalı döngü PID denetleyici ile silindirlerin konum değişimleri verilmiştir. Şekillerde her grafik bir bacak pozisyonu göstermektedir. Pozitif ve negatif yönlü referans dönüş işleminde bacak hareket boylarıda istenen hareket formunu almıştır. İleri yönlü ve geri yönlü hareket için sinüs referans girilmiştir. Bu uygulamada dairesel hareket gerçekleştirilmemiştir. Merkez noktadan sabit olması sebebiyle üst hareketli platform merkezde sabit kalmıştır. Benzer şekilde Şekil4.23 ve Şekil4.24 de altı bacağa ait hız bilgileri verilmiştir.



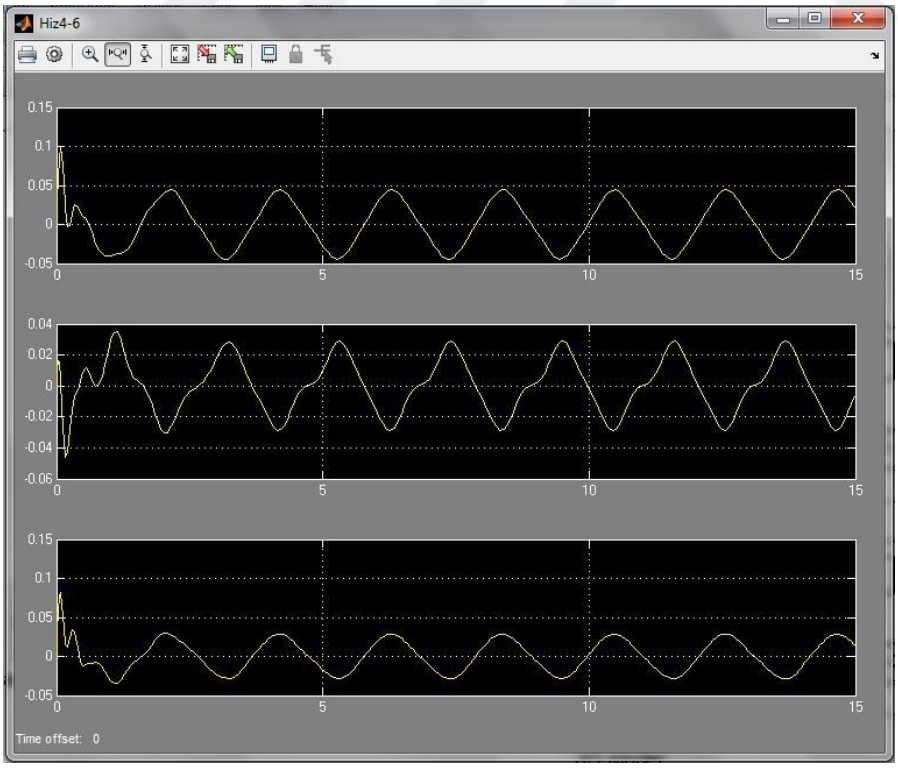
Şekil 4.21. Pozisyon grafikleri, bacak 1-3



Şekil 4.22. Pozisyon grafikleri, bacak 4-6

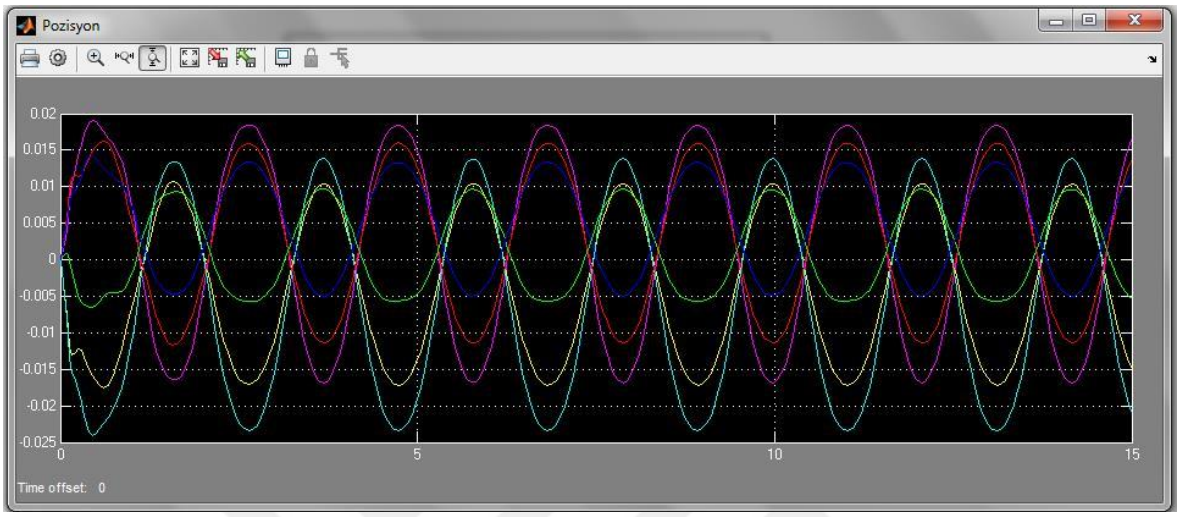


Şekil 4.23. Hız grafikleri, bacak 1-3



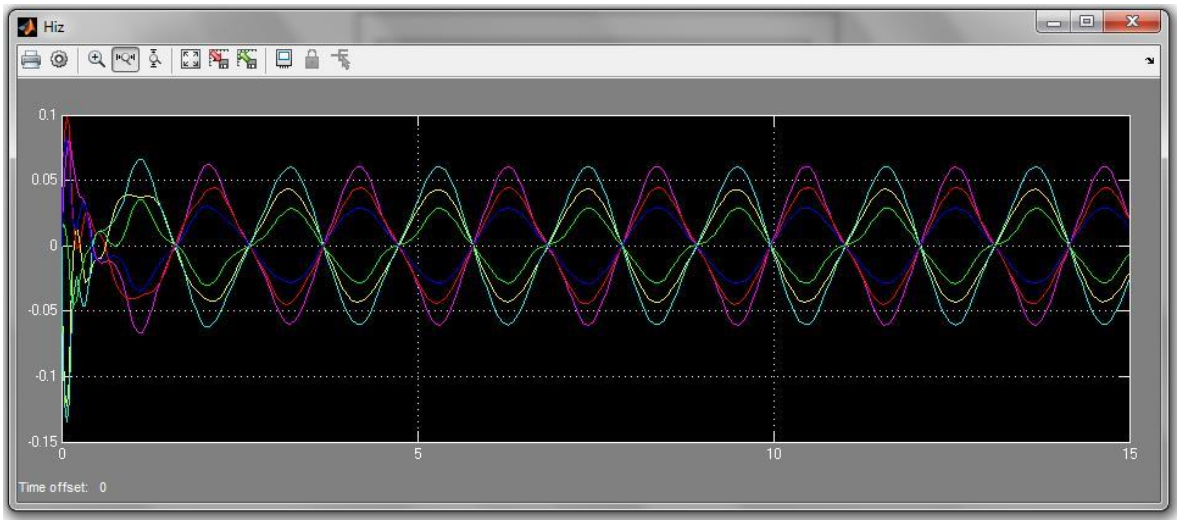
Şekil 4.24. Hız grafikleri, bacak 4-6

Yunuslama harekette aynı doğrultuda ilei ve geri yönlü hareketler gerçekleştirildiği için Şekil 4.25'te verilen tüm bacakların pozisyonu değişimi tek bir grafikte verilmiştir. Burada da her bir graf bir bacak pozisyonu anlatmaktadır.



Şekil 4.25. Tüm bacak pozisyon grafikleri

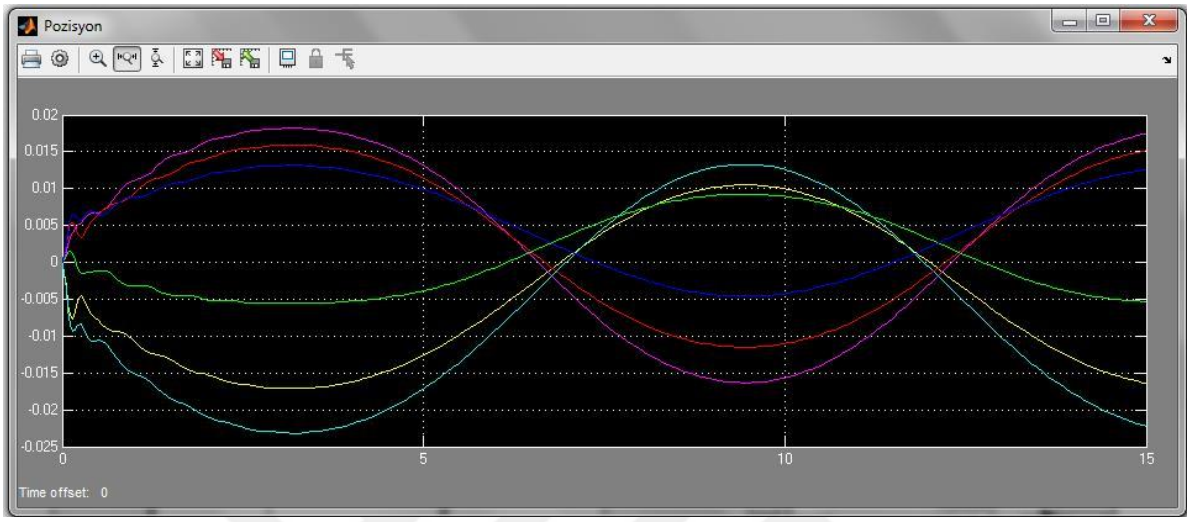
Platformun üst platformunun merkezde sabit kalmak kaydıyla ileri ve aynı eksende geri yönlü hareketinde Şekil 4.26 tüm bacakların hiz değişimi verilmiştir.



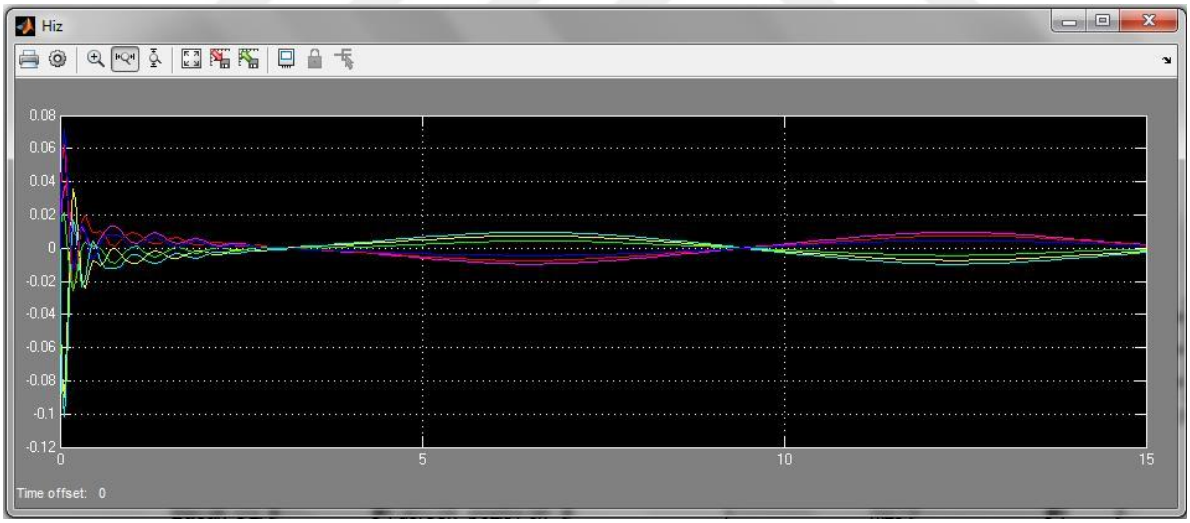
Şekil 4.26. Tüm bacak hiz grafikleri

Hareket yönüne göre iç silindirler daha az hareket ederken dış silindirler daha fazla hareket etmektedir. Silindirlerin denetleyici kullanılarak ilk harekete başlama anındaki konum

değişimleri Şekil 4.25 de, hızları ise Şekil 4.26 da verilmiştir. İlk hareket anında bir önceki konum değeri dikkate alınarak hataya bağlı olarak PID denetleyici yeni yönelmeye uygun çıkış vermektedir. Bu benzetim çalışmasında giriş frekansı 0.5 Hz alınmıştır.

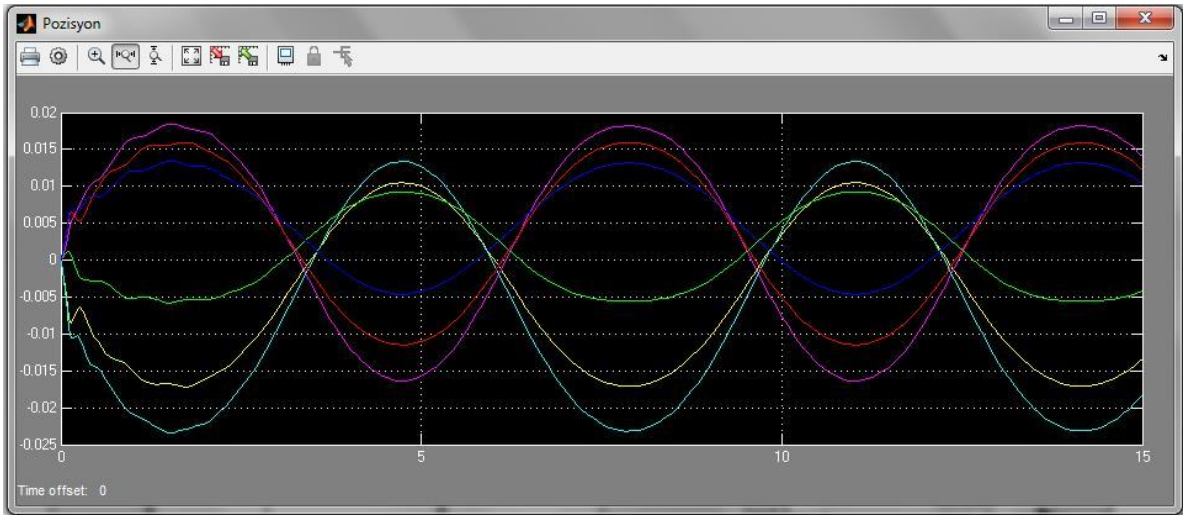


Şekil 4.27. Silindirlerin 0.5 Hz de pozisyon değişimleri

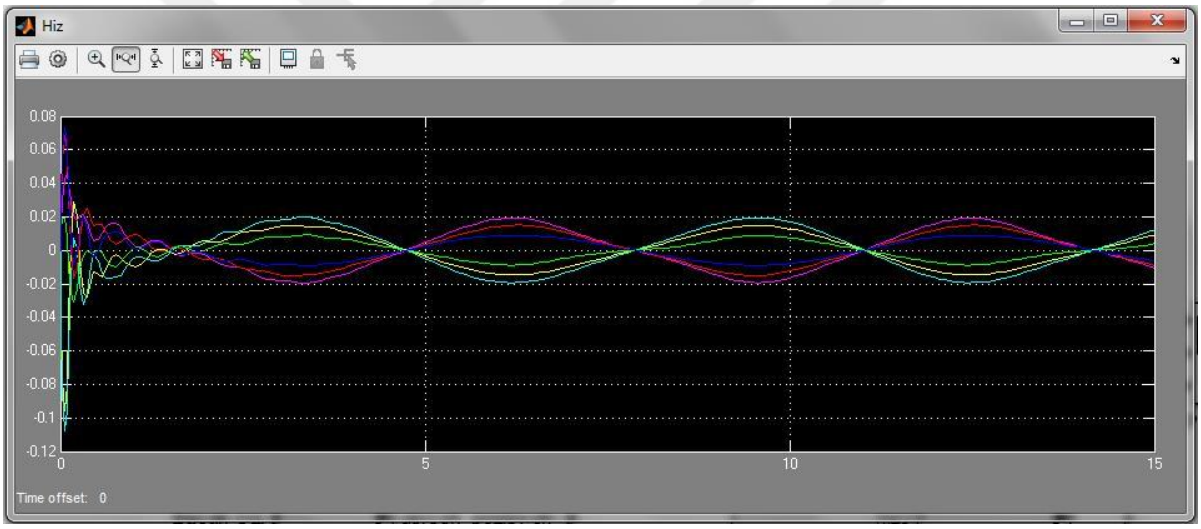


Şekil 4.28. Silindirlerin 0.5 Hz de hız değişimleri

Silindirlerin Denetleyici kullanılarak hareketini hızlandırmak için giriş frekansı değiştirilmiştir. 1Hz de konum değişimleri Şekil4.27 de, hızları ise Şekil4.28 de verilmiştir. İlk hareket anında bir önceki konum değeri dikkate alınarak hataya bağlı olarak PID denetleyici yeni yönelmeye uygun çıkış vermektedir.

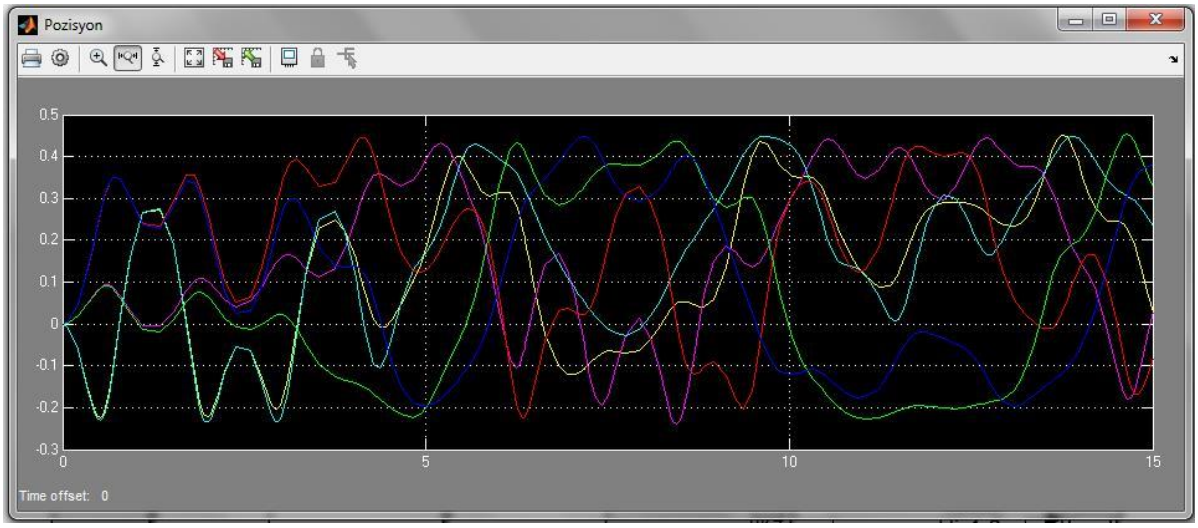


Şekil 4.29. Silindirlerin 1 Hz de pozisyon değişimleri

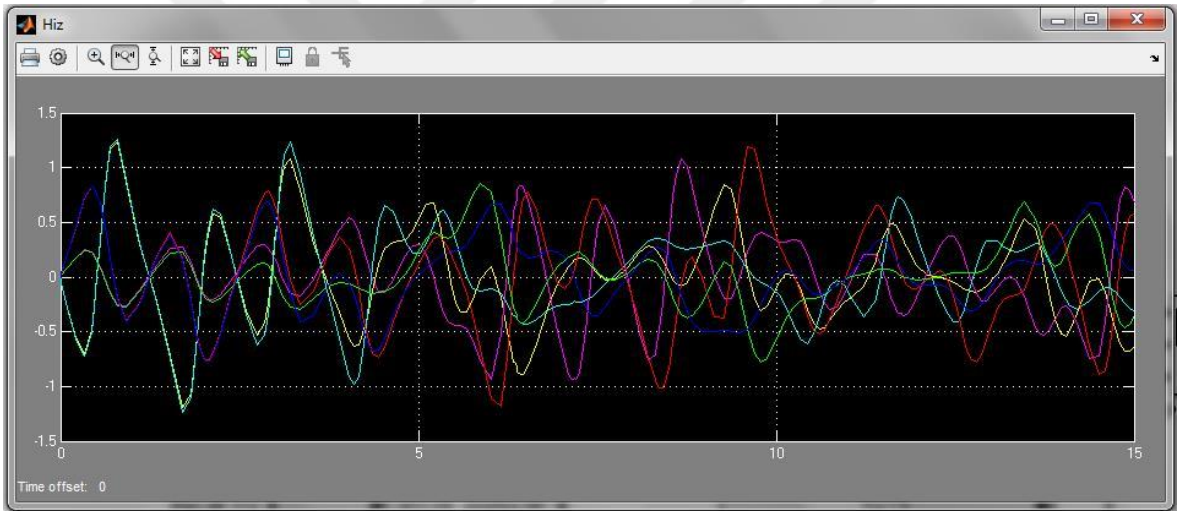


Şekil 4.30. Silindirlerin 1 Hz de hız değişimleri

Silindirlerin denetleyici kullanılmadan pozisyon ve hız bilgileri incelendiğinde 0.5 Hz de konum değişimleri Şekil4.29 da, hızları ise Şekil 4.30 da verilmiştir. Denetleyici kullanılmaması durumunda pozisyon ve hız bilgileri karışmıştır. Denetimsiz bir çalışma ortaya çıkmıştır. Açık çevrim kontrolde hata büyümekte ve kararsız çalışmaktadır.



Şekil 4.31. Silindirlerin 0.5 Hz de denetleyici olmaksızın pozisyon değişimleri



Şekil 4.32. Silindirlerin 0.5 Hz de denetleyici olmaksızın hız değişimleri

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında 6 serbestlik dereceli paralel manipülatör e ait ters ve düz kinematik analiz gerçekleştirilmiştir. Literatürde Stewart platform olarak ta ifade edilen paralel manipülatöründen farklı olarak bu çalışmada sabit ve hareketli platformlar arasında sabit bacak eklenmiştir. Sabit bacak eklemede amaç platformun taşıyacağı ağırlıktan kaynaklanmaktadır. Yük ağırlığı sabit ayak üzerine bindirilerek diğer altı ayakta bulunan silindirlerin hareket ettirilmesi ile konum ve hız değişimleri sağlanmıştır. Denetleyici olarak PID kullanılmıştır.

Paralel manipülatörün mekanik tasarımı SolidWork te gerçekleştirilmiştir. SolidWork te elde edilen 3 boyutlu (3D) model Simmechanic' e aktarılmıştır. Matlab programının bir aracı olan simmechanic kullanılarak Matlab ara yüzünde platformun modeli çıkartılmış ve referans değerlere göre silindirlerin pozisyon ve hız değişimleri analiz edilmiştir. Model çıkartılırken sabit ve hareketli platform, bağlantı noktaları ve silindirler ayrı ayrı modellenmiştir. Ters kinematik denklemler kullanılarak hareketli platformun konumları incelenmiştir. Düz kinematik denklemler kullanılarak istenen pozisyon için silindir boylarının ne kadar olması gerektiği hesaplanmıştır. X, Y ve Z düzlemlerine ait dönüşüm matrisleri kullanılarak serbest uzayda hareket kabiliyetleri incelenmiştir. Merkezde sabit bacak bulunması sebebiyle hareketli platformun merkezde kalması sağlanmıştır.

Modeli ve analizi gerçekleştirilen sistem mobil lançer uygulaması için örneklenmiştir. Savunma sanayi ihtiyaçları doğrultusunda hareket farklılığı sağlanmıştır. Dönüşüm matrisleri kullanılarak gerçek bir sistem üzerinde uygulamalar gerçekleştirilebilir. Sabit bacak eklenmesi ile manipülatörde ağır yükler için hareket kolaylığı sağlamaktadır. Sabit bacaktan dolayı hareket uzayı kısıtlanmış olmasına rağmen, yük ve atış sistemlerinin gereksinimlerini karşılamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Bingul, Z. Ve Karahan, O. (2012). *Dynamic Modeling and Simulation of Stewart Platform, Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*. In Tech Open. 19-42.

2. Zhiyong, Q. and Zhengmao, Y., (2011) *Kinematics analysis of certain Novel 3-DOF parallel manipulator*, IEEE.

3. Lunng, W. T. (2002). *Kinematic analysis of 3-DOF position mechanisms for use in hybrid kinematic machines*, Journal of Mechanical Design, 124, 245-253.

4. Yangmin, L. and Qingsong, X. (2006, July). *Kinematic analysis and design of a new 3-DOF translational parallel manipulator*, Journal of Mechanical Design, 128, 729-737.

5. Sameer, J. and Lung, W. T. (2003, April). *A comparison study of two 3-DOF parallel manipulators one with three and the other with four supporting legs*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 19 (2), 200-209.

6. Sameer, A. J. and Lung, W. T. (2002, June). *Jacobian analysis of limited-DOF parallel manipulator*, Transactions of the ASME, 254 (124), 254-258.

7. Dan, Z. and Jianhe, L. (2011). *Kinematic analysis of a novel 3-DOF actuation redundant parallel manipulator using artificial intelligence approach*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27, 157–163.

8. Zhen, G. and Dan, Z. (2011). *Performance mapping and motion simulation of a 4UPS+PU redundantly actuated parallel manipulator*, Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, 1-10.

9. Huiping, S., Tingli, Y. and Lv, Z. M. (2005, March). *Synthesis and structure analysis of kinematic structures of 6-dof parallel robotic mechanisms*, Mechanism and Machine Theory, 40, 1164–1180.

10. Feng, G., Weimin, L., Xianchao, Z., Zhenlin, J. and Hui, Z. (2002, April) *New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF*, Mechanism and Machine Theory, 37, 1395–1411.

11. Yangian, W. and Clement, G. (2005, October) *Design of reactionless 3-DOF and 6-DOF parallel manipulators using parallelepiped mechanisms*, IEEE transactions on robotics, 21(5), 821-833.

12. Chifu, Y., Qitao, H., Jingfeng, H., Hongzhou, J. and Junwei, H. (2009) *Model-based ontrol for 6-DOF parallel manipulator*, International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 81-84.

13. Doik, K., Wankyun, C. and Younil, Y. (1999, May) *Singularity analysis of 6-DOF manipulators with the analytical representation of the determinant*, Proceedings of the 1999 IEEE intemational Conference on Robotics & Automation Detroit, Michigan, 889-894.

14. Chiew, Y. S., Abdul Jalil, M. K. and Hussein, M. (2008, July) *Kinematic modeling of driving simulator motion platform, Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications* Multimedia University, Cyberjaya, Malaysia, 30-34.

15. Wwnjia, C. and Jiang, Z. (2010) *Kinematics and simulation of a 6-leg, 4-DOF parallel manipulator*, International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 903-906.

16. Chifu, Y., Jingfeng, H., Hongzhou, J. and Junwei, H. (2008) *Modeling and simulation of 6-DOF parallel manipulator based on PID control with gravity compensation in simulink ADAMS*, International Workshop on Modelling, Simulation and Optimization, 391-395.

17. Onur, A. (2005). Modeling and Real-Time Control System Implementation for a Stewart Platform. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Ankara.

18. Sarper, G. (2006). *Design and Construction of a Six Degree of Freedom Platform*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Ankara.

19. Özer, U. (2006). *Design and Control of Stewart Platform*. Yüksek Lisans Tezi, Sabancı Üniversitesi, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Istanbul.

20. Ahemt, Ü. (2007). *Farkli Yapıdaki Stewart Platform Mekanizmalarının Düz ve Ters Kinematik Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

21. Yıldız, İ. (2007). *3x3 Kuvvet Geri Beslemeli bir Stewart Platformunun Kinematik Analizi, Bağ-grafik Modellenmesi ve Simülasyonu*.Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

22. Hilmi, K. (2007). *Deneysel Bir Stewart Platformunun Kontrol Ve Simulasyon Programlanmasi.* Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

23. Selçuk, C. (2007). *Uzaysal Hareket Eden Araçlara Kumanda Etmek Maksadiyla Bir İnsan Makine Arayüzü Olarak 3-3 Stewart Gough Platformun Çalişma Uzayi Merkezli Tasarımı*.Yüksek Lisans Tezi, Deniz Harp Okulu, Deniz Bilimleri ve Mühendisliği Enstitüsü, İstanbul.

24. Burak, U. (2009). *Stewart Platformu Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

25. Alper, G. (2010*). İnsan-Makine Arayüzü Olarak 3x3 Stewart Platformunun Empedans Kuvvet Kontrolü*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

26. Selçık, K. (2012). *Medikal Amaçlı Haptik Güdümlü Empedans Kuvvet Kontrollü Stewart Platformun'nun Geliştirmesi ve Kontrolü*. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Ensititüsü, Kocaeli.

27. Serdar, A. (2013). *Stewart Platform Mekanizması Çalişma Uzayi Analizi*. Doktora Tezi, Hava Harp Okulu, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Ensititüsü, İstanbul.

28. Alpaslan, B. (2013). *Stewart Platform Benzetim ve Eniyileme Yazılımının Gerçekleştirilmesi*. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Ensititüsü, Kocaeli.

29. Elmas, A., Hüseyin, A., Sait, Y. ve İbrahim, Ö. (2005, Ocak). *Paralel Mekanizmaların Kinematiği, Dinamiği Ve Çalışma Uzayı*. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 19-36.

30. Rasim, A. D., Ulaş, Y., Hakan, Ç., Suat, D. ve Tuna, B. (2011, Ekim). *3 Serbestlik Derecesine Sahip Bir Hareket Taklitçisinin Mafsal Uzayı Eniyilemesi ve Çözüm Analizi.* VI. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi. 539-552, İzmir.

31. Halil, Ş., Hira, K. ve Levent, M. (2007, Haziran). *Bir Hegzapod Uygulamasında Bilgisayar Tabanlı Hareket Kontrolü.* 13. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, 241-251.

32. Internet: Mekanizma Tekniği 1 URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.google.com.tr%2Furl%3Fsa%3Dt%26rct%3Dj%26q%3D%26esrc%3Ds%26source%3Dweb%26cd%3D1%26cad%3Drja%26uact%3D8%26ved%3D0ahUKEwjWuuW9xJPMAhXia5oKHdgLAfYQFggaMAA%26url%3Dhttp%253A%252F%252Fwww.yildiz.edu.tr%252F%7Ecdemir%252Fmektek1_rev1.pdf%26usg%3DAFQjCNHRHYuvuelgTl3SoWMlNd9n8lGIcw%26bvm%3Dbv.119745492%2Cd.bGs&date=2016-04-16 Son Erişim Tarihi: 16.04.2016.

33. Internet: Mekanizmaların Kinematik Analizi. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.muhendisizbiz.net%2Fuploadlar%2F92%2Fmekinematik.pdf&date=2016-04-18 Son Erişim Tarihi: 18.04.2016.

34. Internet: A Stewart Platform based Flight Simulotor. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.mfg.mtu.edu%2Fcyberman%2Fmachtool%2Fmachtool%2Faltstruc%2Fres5.html&date=2016-04-18 Son Erişim Tarihi: 18.04.2016.

35. Internet: KUKA Robotics.and Automation. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kukarobotics.com%2Fusa%2Fen%2F&date=2016-04-16 Son Erişim Tarihi: 16.04.2016.

36. Internet: New Generation of Hexapods Deliver Sub-Micron Resolution for Ultra-Precision Application. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ecnmag.com%2Farticle%2F2011%2F05%2Fnew-generation-hexapods-deliver-sub-micron-resolution-ultra-precision-applications&date=2016-04-16 Son Erişim Tarihi: 16.04.2016.

37. Patel, Y. D. and George, P. M. (2012, August). *Parallel Manipulators Applications* - A Survey. Scientific Research, 57-64.

38. Internet: The da Vinci Surgical System. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.davincisurgery.com%2Fda-vinci-general-surgery%2Fda-vinci-surgical-system%2F&date=2016-04-16 Son Erişim Tarihi: 16.04.2016.

39. Gonzalez, H., Dutra, M. S., and Lengerke, O. (2011, June). *Direct and Inverse Kinematics of Stewart Platform Applied to Offshore Cargo Transfer Simulation*. 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México.

40. Internet: Analysis and Synthesis of Parallel Robot for Medical Applications. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.columbia.edu%2Fcu%2Fmece%2Farma%2Fpeople%2Fnabil_simaan%2Fms_research.shtml&date=2016-04-18 Son Erişim Tarihi:18.04.2016.

41. Internet: 11 Food 3D Printers to Feed the Future URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2F3dprintingindustry.com%2F2014%2F11%2F09%2F11-food-3d-printers%2F&date=2016-04-16 Son Erişim Tarihi: 16.04.2016.

42. Internet: Optimum calibaration of a parallel kinematic manipulator using digital indicatiors.URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fhtml.rhhz.net%2FAIM%2Fhtml%2F101.htm&date=2016-04-18 Son Erişim Tarihi: 18.04.2016.

43. Internet: Mekanizmaların Kinematik Analizi.URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.muhendisizbiz.net%2Fuploadlar%2F92%2Fmekinematik.pdf&date=2016-04-16 Son Erişim Tarihi: 16.04.2016.

EKLER

EK-1. Ters kinematik sayısal örnek

```
% Saysal Örnek Tez
clc
clear all

% Ofset açılarının tanımlanması
EpsilonB=120;
EpsilonA=0;

% Alt platform bağlantı noktalarının X ekseni ile yapacağı açıları
Beta1=(1*180/3)-(EpsilonB/2);
Beta3=(3*180/3)-(EpsilonB/2);
Beta5=(5*180/3)-(EpsilonB/2);
Beta2=(Beta1+EpsilonB);
Beta4=(Beta3+EpsilonB);
Beta6=(Beta5+EpsilonB);

% Üst platform bağlantı noktalarının X ekseni ile yapacağı açıları
Alfa1=(1*180/3)-(EpsilonA/2);
Alfa3=(3*180/3)-(EpsilonA/2);
Alfa5=(5*180/3)-(EpsilonA/2);
Alfa2=Alfa1+EpsilonA;
Alfa4=Alfa3+EpsilonA;
Alfa6=Alfa5+EpsilonA;

ra=0.5;%Üst platform yarıçapı
rb=1;   %Alt platform yarıçapı

% Üst platform bağlantı noktalarının pozisyonları
a1=[ra*cosd(Alfa1);ra*sind(Alfa1);0];
a2=[ra*cosd(Alfa3);ra*sind(Alfa3);0];
a3=[ra*cosd(Alfa2);ra*sind(Alfa2);0];
a4=[ra*cosd(Alfa4);ra*sind(Alfa4);0];
a5=[ra*cosd(Alfa5);ra*sind(Alfa5);0];
a6=[ra*cosd(Alfa6);ra*sind(Alfa6);0];

% Alt platform bağlantı noktalarının pozisyonları
b1=[rb*cosd(Beta1);rb*sind(Beta1);0];
b2=[rb*cosd(Beta2);rb*sind(Beta2);0];
b3=[rb*cosd(Beta3);rb*sind(Beta3);0];
b4=[rb*cosd(Beta4);rb*sind(Beta4);0];
b5=[rb*cosd(Beta5);rb*sind(Beta5);0];
b6=[rb*cosd(Beta6);rb*sind(Beta6);0];


% X, Y ve Z esksenlerde açıları
ax=30; % X eksende
ay=30; % Y eksende
az=0;   % Z eksende
```

EK-1. (devam) Ters kinematik sayısal örnek

```
% Öteleme vektoru [X; Y; Z]
p=[0;0;2];


% Rotasyon matrisi
R=[(cosd(ay)*cosd(az)) (cosd(az)*sind(ay)*sind(ax)+sind(az)*cosd(ax)) -
cosd(ax)*sind(ay)*cosd(az)+sind(ax)*sind(az);
-(sind(az)*cosd(ay)) -sind(ax)*sind(ay)*sind(az)+cosd(ax)*cosd(az)
sind(ay)*sind(az)*cosd(ax)+cosd(az)*sind(ax);
(sind(ay)) -cosd(ay)*sind(ax) (cosd(ax)*cosd(ay))];

% Bacak vektörü
S1=p+R*b1-a1
S2=p+R*b2-a2
S3=p+R*b3-a3
S4=p+R*b4-a4
S5=p+R*b5-a5
S6=p+R*b6-a6

L1=norm(S1)
L2=norm(S2)
L3=norm(S3)
L4=norm(S4)
L5=norm(S5)
L6=norm(S6)

% Bacak uzunluklarının gerçek değeri
L1 = 2.297m
L2 = 2.202m
L3 = 2.400m
L4 = 2.202m
L5 = 2.634m
L6 = 2.725m
```

EK-2. D_i , E_i , F_i ve G_i , H_i , I_i açık ifadeleri

$$D_1 = 2m_1 \cos\beta_1 \left\{(O_1)_x - (O_2)_x\right\} + 2m_1 \sin\beta_1 \left\{(O_1)_y - (O_2)_y\right\}$$

$$D_2 = -2m_2 \cos\beta_2 \left\{(O_1)_x - (O_2)_x\right\} + 2m_2 \sin\beta_2 \left\{(O_1)_y - (O_2)_y\right\}$$

$$D_3 = -2m_2 m_1 \cos(\beta_1 - \beta_2)$$

$$D_4 = -2m_2 m_1$$

$$D_5 = \left\{(O_1)_x - (O_2)_x\right\}^2 + \left\{(O_1)_y - (O_2)_y\right\}^2 + m_1^2 + m_2^2 - b_1^2$$

$$E_1 = 2m_1 \cos\beta_2 \left\{(O_2)_x - (O_3)_x\right\} + 2m_2 \sin\beta_2 \left\{(O_2)_y - (O_3)_y\right\}$$

$$E_2 = -2m_3 \cos\beta_3 \left\{(O_2)_x - (O_3)_x\right\} + 2m_3 \sin\beta_3 \left\{(O_2)_y - (O_3)_y\right\}$$

$$E_3 = -2m_2 m_3 \cos(\beta_2 - \beta_3)$$

$$E_4 = -2m_2 m_3$$

$$E_5 = \left\{(O_2)_x - (O_3)_x\right\}^2 + \left\{(O_2)_y - (O_3)_y\right\}^2 + m_2^2 + m_3^2 - b_2^2$$

$$F_1 = 2m_3 \cos\beta_3 \left\{(O_3)_x - (O_1)_x\right\} + 2m_3 \sin\beta_3 \left\{(O_3)_y - (O_1)_y\right\}$$

$$F_2 = -2m_1 \cos\beta_1 \left\{(O_3)_x - (O1)_x\right\} - 2m_1 \sin\beta_1 \left\{(O_3)_y - (O_1)_y\right\}$$

$$F_3 = -2m_2 m_1 \cos(\beta_3 - \beta_1)$$

$$F_4 = -2m_3 m_1$$

$$F_5 = \left\{(O_3)_x - (O_1)_x\right\}^2 + \left\{(O_3)_y - (O_1)_y\right\}^2 + m_3^2 + m_1^2 - b_3^2$$

G_i , H_i ve I_i açık ifadeleri

EK-2. (devam) D_i , E_i , F_i ve G_i , H_i , I_i açık ifadeleri

$$G_1 = -D_1 - D_2 + D_3 + D_5$$
$$G_2 = D_1 - D_2 - D_3 + D_5$$
$$G_3 = 4D_4$$
$$G_4 = -D_1 + D_2 - D_3 + D_5$$
$$G_5 = D_1 + D_2 + D_3 + D_5$$

$$H_1 = -E_1 - E_2 + E_3 + E_5$$
$$H_2 = E_1 - E_2 - E_3 + E_5$$
$$H_3 = 4E_4$$
$$H_4 = -E_1 + E_2 - E_3 + E_5$$
$$H_5 = E_1 + E_2 + E_3 + E_5$$

$$I_1 = -F_1 - F_2 + F_3 + F_5$$
$$I_2 = F_1 - F_2 - F_3 + F_5$$
$$I_3 = 4F_4$$
$$I_4 = -F_1 + F_2 - F_3 + F_5$$
$$I_5 = F_1 + F_2 + F_3 + F_5$$

EK-3. K_i açık ifadeleri

$$K_1 = \left(H_2G_1 - G_4H_1\right)^2$$
$$K_2 = 2\left(H_2G_1 - G_4H_1\right)\left(H_2G_2 - G_5H_1\right) + H_1H_2G_3^2$$
$$K_3 = \left(H_2G_2 - G_5H_1\right)^2$$
$$K_4 = -G_1G_3H_2H_3 - H_1H_3G_3G_4$$
$$K_5 = -G_2G_3H_2H_3 - H_1H_3G_3G_5$$
$$K_6 = 2\left(H_2G_1 - G_1H_4\right)\left(H_5G_1 - G_4H_4\right) + H_3^2G_1G_4$$
$$K_7 = 2\left(H_2G_1 - G_1H_4\right)\left(G_2H_1 - G_5H_4\right) + 2\left(H_2G_2 - G_5H_1\right)\left(H_5G_1 - G_4H_4\right)$$
$$+H_3^2G_1G_5 + H_3^2G_2G_4 + G_3^2H_1H_5 + G_3^2H_2H_4$$

$$K_8 = 2\left(H_2G_2 - G_5H_1\right)\left(H_5G_2 - G_5H_4\right) + H_3^2G_2G_5$$
$$K_9 = -H_3H_4G_3G_4 - H_3H_5G_1G_3$$
$$K_{10} = -H_3H_4G_3G_5 - H_3H_5G_2G_3$$
$$K_{11} = \left(H_5G_1 - H_4G_4\right)^2$$
$$K_{12} = 2\left(G_1H_5 - H_4G_4\right)\left(G_2H_5 - H_5G_4\right) + H_4H_5G_3^2$$
$$K_{13} = \left(G_2H_5 - H_4G_5\right)^2$$

EK-4. Çalışma uzayı kodları

```
% Çalışma Uzayı
clear all
clc
% Ofset açılarının tanımlanması
EpsilonB=120;
EpsilonA=0;

% Alt platform bağlantı noktalarının X ekseni ile yapacağı açıları
Beta1=(1*180/3)-(EpsilonB/2);
Beta3=(3*180/3)-(EpsilonB/2);
Beta5=(5*180/3)-(EpsilonB/2);
Beta2=(Beta1+EpsilonB);
Beta4=(Beta3+EpsilonB);
Beta6=(Beta5+EpsilonB);

% Üst platform bağlantı noktalarının X ekseni ile yapacağı açıları
Alfa1=(1*180/3)-(EpsilonA/2);
Alfa0360=linspace(0,2*180, 500);
Alfa3=(3*180/3)-(EpsilonA/2);
Alfa5=(5*180/3)-(EpsilonA/2);
Alfa2=Alfa1+EpsilonA;
Alfa4=Alfa3+EpsilonA;
Alfa6=Alfa5+EpsilonA;

ra=0.825;   %Üst platformun çapı
rb=1.425;   %Alt platformun çapı

% Üst platform bağlantı noktalarının pozisyonları
a1=[ra*cosd(Alfa1);ra*sind(Alfa1);0];
a2=[ra*cosd(Alfa3);ra*sind(Alfa3);0];
a3=[ra*cosd(Alfa2);ra*sind(Alfa2);0];
a4=[ra*cosd(Alfa4);ra*sind(Alfa4);0];
a5=[ra*cosd(Alfa5);ra*sind(Alfa5);0];
a6=[ra*cosd(Alfa6);ra*sind(Alfa6);0];
a0360=[ra.*cosd(Alfa0360);ra.*sind(Alfa0360);zeros(size(Alfa0360))];

% Alt platform bağlantı noktalarının pozisyonları
b1=[rb*cosd(Beta1);rb*sind(Beta1);0];
b2=[rb*cosd(Beta2);rb*sind(Beta2);0];
b3=[rb*cosd(Beta3);rb*sind(Beta3);0];
b4=[rb*cosd(Beta4);rb*sind(Beta4);0];
b5=[rb*cosd(Beta5);rb*sind(Beta5);0];
b6=[rb*cosd(Beta6);rb*sind(Beta6);0];

dtetha = 50; % Halke sayısı

% X, Y ve Z esksenlerde açıları
tethax = 30:(30+30)/dtetha:30;  % X eksende = 30 derece.
```

EK-4. (devam) Çalışma uzayı kodları

```
tethay = 30:(30+30)/dtetha:30;  % Y eksende = 30 derece.
tethaz = 0:(0+360)/dtetha:360;  % Z eksende = 360 derece

for k=1:length(tethaz)
   az=tethaz(k);
   for k=1:length(tethax)
   ax=tethax(k);
   for k=1:length(tethay)
ay=tethay(k);

%Rotasyon matrisi
R=[(cosd(ay)*cosd(az)) (cosd(az)*sind(ay)*sind(ax)+sind(az)*cosd(ax)) -
cosd(ax)*sind(ay)*cosd(az)+sind(ax)*sin(az);
-(sind(az)*cosd(ay)) -sind(ax)*sind(ay)*sind(az)+cosd(ax)*cosd(az)
sind(ay)*sind(az)*cosd(ax)+cosd(az)*sind(ax);
(sind(ay)) -cosd(ay)*sind(ax) (cosd(ax)*cosd(ay))];

%Öteleme vektörü [X; Y; Z]
t=[0;0;1.350];

% R ile a'nın çarpımına eşitir.
q1=R*a1;
q2=R*a2;
q3=R*a3;
q4=R*a4;
q5=R*a5;
q6=R*a6;
q0360=R*a0360;
for jj =1:length(q0360)
l0360(:, jj)=q0360(:, jj)+t-b1;
end

%Bacak uzunluğu vektör şeklinde
l1=q1+t-b1;
l2=q2+t-b2;
l3=q3+t-b3;
l4=q4+t-b4;
l5=q5+t-b5;
l6=q6+t-b6;

L1=l1'*l1;
L2=l2'*l2;
L3=l3'*l3;
L4=l4'*l4;
L5=l5'*l5;
L6=l6'*l6;

%Bacak uzunlun gerçek değeri
```

EK-4. (devam) Çalışma uzayı kodları

```
S1=sqrt(L1);
S2=sqrt(L2);
S3=sqrt(L3);
S4=sqrt(L4);
S5=sqrt(L5);
S6=sqrt(L6);

hold on

if k==1
   % Üst platformun çizgisi
   plot3(rb+l0360(1, :), l0360(2, :), l0360(3, :))
   Bs = [b1'; b2'; b3'; b4'; b5'; b6'];
   Ls = [l1'; l2'; l3'; l4'; l5'; l6'];

   for i=1:length(Bs(:, 1))
      DATA(1, :) = [0 0 0];
      DATA(2, :) = Bs(i, :);
      hold on
      %base
%       Alt platformun vektörleri
      plot3(DATA(:, 1), DATA(:, 2), DATA(:, 3));
      DATA(1, :) = Bs(i, :);
      DATA(2, :) = Bs(i, :)+Ls(i, :);
      hold on

%       Alt Platformun çizgisi
      r=rb;
      x=0;
      y=0;
      ang=0:0.12:2*pi;
      xp=r*cos(ang);
      yp=r*sin(ang);
      plot(x+xp,y+yp);


%       Bacakların çizgisi
%         plot3(DATA(:, 1), DATA(:, 2), DATA(:, 3), 'LineWidth',2);
      DATA(1, :) =t;
      DATA(2, :) = Bs(i, :)+Ls(i, :);
      hold on
%       Üst platformun vektörleri
%       plot3(DATA(:, 1), DATA(:, 2), DATA(:, 3), 'LineWidth',2);

      title ('Çalışma Uzayı')
      xlabel ('X')
      ylabel ('Y')
      zlabel ('Z')
```

EK-4. (devam) Çalışma uzayı kodları

```
        grid on
        az = 197;
        el = 9;
        view(az, el);

    end
    else
    end
    end
    end
end
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı	: SADEQI, Mohammad Juma
Uyruğu	: Afganistan
Doğum tarihi ve yeri	: 10.02.1984, Kabil
Medeni hali	: Bekar
e-mail	: sadeqi.232@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi	Devam Ediyor
Lisans	Kabul PolyTechnic University	2009
Lise	Sayied Ismail Balkhi High School	2004

Dil

Farsça, Türkçe, İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Yüzme, Fitness, Dil öğrenme, Gezme....



GAZİ GELECEKTİR...