

T.C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUSAL MOTOR SİSTEMİ ÜZERİNE 6 SERBESTLİK
DERECESİNE SAHİP PLATFORM TASARIMININ YAPILARAK
UYGULANMASI VE YAZILIMIN ENİYİLEŞTİRİLMESİ**

VOLKAN ÖZTÜRK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. BEDRİ YÜKSEL

İSTANBUL, 2019

Volkan ÖZTÜRK tarafından hazırlanan “Doğrusal Motor Sistemi Üzerine 6 Serbestlik Derecesine Sahip Platform Tasarımının Yapılarak Uygulanması ve Yazılımın Eniyileştirilmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İstanbul Gelişim Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Bedri YÜKSEL

Mekatronik Mühendisliği, İstanbul Gelişim Üniversitesi

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

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ümit ALKAN

Bilgisayar Mühendisliği, İstanbul Gelişim Üniversitesi

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

Üye: Doç. Dr. Mustafa Emre AYDEMİR

Elektrik Elektronik Mühendisliği, İstanbul Esenyurt Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi:/...../.....

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

.....
Dr. Öğr. Üyesi Ümit ALKAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- 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 çalışmada 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.

Volkan ÖZTÜRK

...../...../.....

DOĞRUSAL MOTOR SİSTEMİ ÜZERİNE 6 SERBESTLİK DERESESİNE SAHİP
PLATFORM TASARIMININ YAPILARAK UYGULANMASI VE YAZILIMIN
ENİYİLEŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Volkan ÖZTÜRK

GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2019

ÖZET

Günümüzde askeri, cerrahi ve endüstriyel birçok alanda paralel mekanizmalar için kullanım alanları artmaktadır. Paralel mekanizmalar, iki rijit cisim arasında bulunan ve en az iki açık kinematik zincir ile birbirine bağlanmış yapılardır. Stewart Platform Mekanizması (SPM)'da buna verilebilecek ve 6 serbeslik derecesine sahip en iyi örnektir. SPM için literatürde en sık karşılaşılan yapı; sabit alt ve hareketli üst plaka arasında boyları değiştirilebilen bağlantı kollarından oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında ise bağlantı kollarının uzunlukları sabit olmakla birlikte kolların alt mafsal kısımlarının zemine paralel doğrusal hareket sağlandığı bir model üzerinde çalışmalar yapılmış ve çalışma uzayı incelenmiştir. Bu model fikri üzerine tip sentezlemesi yapılarak, tekillik endeksi hesaplamalarına göre istenmeyen durumların arındırılması ile tasarımsal sistem gereklilikleri belirlenmiştir.

Çalışmanın gerçekleştirilmesine ilk adım olarak Matlab ortamında 6x3 tipi platform iskeleti oluşturulmuş ve bu iskelet yapıdaki temel ölçülendirmeler, 3B katı model tasarımında kullanılıp üç boyutlu yazıcıda metrik olarak gerçek boyutta üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen parça tasarımları bir bütün haline getirilerek tez çalışması amacına uygun platform mekanizması oluşturulmuştur. Çalışmada platform yapısı için çalışma uzayı analizleri gerçekleştirilerek ters kinematik denklemler ile geometrik çözümleme yöntemleri kullanılarak platform için çözüm kümesi oluşturulmuştur. Kinematik hesaplama süreci gömülü elektronik kontrol sistemi üzerine aktarmıştır. Kontrol algoritmaları geliştirilerek yazılımsal eniyileme sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında platform kontrolü için kontrol kolu ve açı sensöründen alınan verilerden faydalanılmıştır. Sistemin çalışma durumu eş zamanlı olarak LCD panel ile gösterilmiştir. Zemindeki doğrusal hareket yapan motor sistemlerinin kontrolleri bağımsız olarak ayrı ayrı mikrodeneteyiciler ile yapılmış ve bu işlem ile paralel iş bölümü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışma içerisinde güçlü bir istatistiksel tahminleme metodu olan kalman filtresinden faydalanılarak açı sensörüne ait ölçüm verisinin temizlenmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : 6 Serbestlik Derecesi, Stewart Platform Mekanizması, Paralel Robot Mekanizmaları, Kalman Filtresi

Sayfa Adedi : 157

Danışman : Prof. Dr. Bedri YÜKSEL

APPLYING THE PLATFORM WITH 6 DOF LEVEL BY DESIGNING IT ON TO A LINEAR MOTOR SYSTEM AND ENHANCE ITS SOFTWARE

(M. Sc. Thesis)

Volkan ÖZTÜRK

GELISIM UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2019

ABSTRACT

Nowadays, in a lot of fields -as military, surgical and industrial- parallel mechanisms usage is increasing. Parallel mechanisms are the structures located between two rigid bodies and linked with at least two open kinematic chains. Stewart Platform Mechanism (SPM) with 6 degrees of freedom is the best example of this mean. For SPM, mostly seen structures are connection arms with the adjustable length between the fixed lower bed and movable upper plate in literature. In this thesis, with fixed length arms, studies have been made on a model that provides linear movement by the lower joint of arms that placed parallel to the ground and its working-space has been examined. By type synthesising on this model idea and removing undesirable outcomes according to singularity index calculations, schematic system necessities have been determined.

As the first step, 6x3 type platform structure has been created on the Matlab environment and the main measurements on this structure have been printed as a metric full-sized product on a 3D solid model design by 3D printer. Proper platform mechanism has been created for the thesis's purpose by assembling the produced parts of the design. The solution set for the platform structure has been gathered by using kinematic equations, geometric and working-space analysis. Kinematic calculation process transferred to the embedded electronic control system. Control algorithms have been developed and optimized on software.

In this thesis study, control stick and, data obtained from the angular sensor has been used. System running conditions are shown simultaneously on an LCD panel. Controls of the motor systems which makes linear movements relative to the ground have been built with microcontrollers which are independent. With this process, parallel work-share has been made. Besides, a powerful statistical estimation method, the Kalman filter has been used to clear the data gathered from angular sensor measurements.

Key Words : 6 Degree of Freedom, Stewart Platform Mechanism, Parallel Robot Mechanism, Kalman Filter

Page Number : 157

Supervisor : Prof. Dr. Bedri YÜKSEL

TEŐEKKÖR

Tez alıŐması boyunca gsterdiği destek ve ynlendirmeleriyle alıŐmamın tamamlanmasında büyük emeği olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Bedri YÜKSEL'e, tez çalışması boyunca bilgi, birikim ve pozitif enerjisini eksik etmeyen değerli hocam Dr. ÖĞr. Üyesi. Ümit ALKAN'a, çalıŐmalarım boyunca yardımını esirgemeyen Yük. Müh. Muhammet ÖZER'e ve Blg. Müh. Ömer ŐAHİN'e, tez ile ilgili birçok konuda tartıŐma imkânı bulduğum çalışma arkadaŐım Y. Altay DÖNMEZ'e en içten dileklerle Őükranlarımı ve teŐekkürlerimi sunarım.

Bu alıŐma süresince desteklerini esirgemeyen tüm çalışma arkadaŐlarıma, hocalarıma destekleri ve sağladıkları huzurlu çalışma ortamı için teŐekkr ederim.

Beni bugünlere getiren ve hiçbir zaman hakkını deyemeyeğim anneme bu süreçte göstermiŐ olduğu sabır, anlayıŐ ve verdiği destek için sonsuz sayĐı, sevgi ve teŐekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR.....	VI
İÇİNDEKİLER	VII
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	XI
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XVII
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar	5
2.2. Stewart Platform Mekanizması	7
2.2.1. Platform tasarımına göre manipülasyon sistemleri	9
2.2.1.1. Seri model manipülasyon sistemleri.....	10
2.2.1.2. Paralel model manipülasyon sistemleri	10
2.2.1.3. Hibrit model manipülasyon sistemleri.....	11
2.2.2. Seri ve Paralel model manipülasyon sistemleri karşılaştırılması.....	12
2.2.3. Stewart platform mekanizmasının farklı yapı tasarımlarında incelenmesi.....	16
2.2.4. Stewart manipülatör sistemlerinin günümüzde kullanım alanları.....	17
2.3. Robot Manipülatörlerin Kontrolü	19

2.3.1. Geometrik eniyileme	21
2.3.2. Robot sistemlerinde mobilite	23
2.4. Çalışma Uzayı	23
2.4.1. Kısıtlı çalışma uzayına sahip mekanizmalar	29
2.4.2. Çalışma uzayında yörünge takip planlaması	30
2.4.3. Çalışma uzayında değişken uzayı metodu	30
2.4.3.1. Stewart platform mekanizmasında değişken uzayı	31
2.5. Haptik Mekanizmalar	32
3. KİNEMATİK HESAPLAMALAR.....	34
3.1. Sistemde Serbestlik Derecesi	35
3.2. Stewart Platform Mekanizmasının Kinematik Hesaplamaları	36
3.2.1. Ters kinematik hesaplama.....	37
3.2.2. Düz kinematik hesaplama	51
3.2.2.1. Düz kinematikte analitik yöntem.....	52
3.3. Sistemdeki Doğrusal ve Açısal Hareketler	52
4. SİSTEMİN MEKANİK TASARIMININ MODELLENMESİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.....	54
4.1. Benzetim Yolu İle Sistem Gerekliliklerinin Belirlenmesi	55
4.2. Doğrusal Motor Sisteminin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi.....	56
4.3. Üst Taşıyıcı Platformun Tasarımı	61
4.4. Mafsal ve Bağlayıcı Kol Tasarımı	64

5. GÜÇ SİSTEMLERİ VE GÖMÜLÜ ELEKTRONİK KONTROL MEKANİZMALARI.....	68
5.1. Mikrodenetleyici (MCU) Kontrolü	70
5.1.1. Paralel haberleşme süreci (I ² C).....	74
5.2. Açık Sensörü ve Bağlantısı	76
5.3. Sınır Anahtarları ve Bağlantısı.....	79
5.4. Step Motorlar	81
5.4.1. Step motorun sürücü entegresi ile kontrolü	86
5.4.1.1. Mikro adımlama teorisi hassas hareket süreci.....	87
5.5. Kullanıcı Arabirimi Bağlantısı.....	89
5.6. Kontrol Kolu ve Bağlantıları.....	91
5.7. Güç Kaynağı ile Sistemin Beslemesi	92
6. YAZILIMSAL KONTROL SÜRECİ.....	94
6.1. Sistemin Benzetiminin Gerçekleştirilmesi.....	97
6.2. Doğrusal Motor Sistemi Kontrolü.....	97
6.2.1. Doğrusal motor sisteminin çalışma döngüsü ve kontrol algoritması.....	98
6.2.2. Doğrusal motor sisteminde konum bazlı hesaplama.....	101
6.2.3. Step motorların geri beslemeli hız kontrolünün gerçekleştirilmesi	102
6.3. Açık Sensörü ile Kontrol.....	105
6.3.1. Kalman filtresi ile sinyalin işlenmesi.....	106
6.4. Kontrol Kolu ile Platformun Yönetimi	111

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	116
KAYNAKLAR	120
EKLER.....	125
EK-1. Matlab’de çalışma uzayı analizi kodu [calismaUzayiAnaliz.m].....	124
EK-2. Arduino’da Master I ² C haberleşme kodu [I ² C_Baglanti.ino]	127
EK-3. Arduino'da Slave I ² C haberleşme kodu [I ² C_Baglanti_nano.ino]	128
EK-4. Arduino'da kalman filtresi ile açı sensörü verisi temizleme kodu [Kalman_Filtresi.ino].....	129
EK-5. Arduino'da motor hız hesaplama kodu [Hiz_hesapla.ino]	131
EK-6. Tez çalışması kapsamında yapılan prototip sistemin genel görünümü, kontrol kolu ve LCD ekran fotoğrafları.....	132
ÖZGEÇMİŞ	135

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Seri ve paralel manipülatör sistemlerin karşılaştırılması.....	13
Çizelge 2.2. Robot ve insanın karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması	19
Çizelge 2.3. x, y ve z eksenleri için çalışma uzayının doğrusal uç noktaları.....	27
Çizelge 3.1. Mafsal tipine göre pasif serbestlik derecesi durumları	36
Çizelge 3.2. Ters ve düz kinematik için girdi çıktı parametreleri.....	37
Çizelge 3.3. Hareketli platform ile yapılan açısal ve doğrusal hareketlere ait kısıtlar ...	53
Çizelge 5.1. Arduino Mega ve Arduino Nano özellikleri.....	73
Çizelge 5.2. Arduino Mega ve Arduino Nano denetleyicilerin iletişim için pin bağlantıları	75
Çizelge 5.3. MMA845X açı ve ivme ölçüm sensörünün teknik özellikleri.....	78
Çizelge 5.4. Step motor bobin enerji sırasına göre yön tayini	83
Çizelge 5.5. Mikrostep modu seçimi için pin bağlantı kombinasyonları	89
Çizelge 5.6. LCD panelin teknik bilgileri.....	89
Çizelge 5.7. 400 Watt besleme kaynağı hakkında teknik bilgiler.....	93
Çizelge 6.1. Kalman filtresinde kullanılan parametreler ve açıklamaları.....	107
Çizelge 6.2. 20 adet örnek veri için kalman filtresi ile detaylı hesaplanmış çıktı tablosu	110
Çizelge 6.3. Kontrol koluna ait tuşlar ve prototip sistemdeki görevleri	113

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. General Motors tarafından geliştirilen Unimate adlı robot.....	3
Şekil 2.1. Stewart platoform için 6x6, 6x3 ve 3x3 bağ tipinde mekanizmalar	9
Şekil 2.2. 6 eksenli manipülatör (solda) ve 4 eksenli scara manipülatör (sağda)	10
Şekil 2.3. Delta paralel manipilatörü	11
Şekil 2.4. Tıbbi amaçlar için önerilen yeni hibrit model manipilatör [24]	12
Şekil 2.5. Seri manipülatör sistemi yapısına örnek gösterim.....	13
Şekil 2.6. Paralel manipülatör sistemi yapısına örnek gösterim	14
Şekil 2.7. 6x3 tipinde stewart platform mekanizmasında bağ yapısı.....	16
Şekil 2.8. Havelsan'nın THY için ürettiği bir uçuş simülatörü	17
Şekil 2.9. Platformun çalışma uzayı perspektif nokta bulutu (2mm nokta aralığına göre)	27
Şekil 2.10. Platformun çalışma uzayı x-y nokta bulutu (2mm nokta aralığına göre)	28
Şekil 2.11. Platformun çalışma uzayı x-z nokta bulutu (2mm nokta aralığına göre)	28
Şekil 2.12. Platformun çalışma uzayı y-z nokta bulutu (2mm nokta aralığına göre)	29
Şekil 2.13. Platform mekanizması için sistem karakteristiğini belirleyen değişkenlerin geometrik gösterimi.....	32
Şekil 2.14. Haptik sistemlerin çalışma yapısı	33
Şekil 3.1. Ters kinematik hesaplamasının başlangıç parametresi olan PM koordinat sistemi gösterimi	37
Şekil 3.2. Platformun görünümü ve gerekli ölçülendirmeleri.....	38

Şekil	Sayfa
Şekil 3.3. Platformun tek köşesine ait i. mafsalsın P_i konum vektörü	39
Şekil 3.4. Hareketli platformun A, B ve C köşeleri	40
Şekil 3.5. Hareketli platformun A, B ve C köşelerinin açısal konumları	40
Şekil 3.6. Hareketli platform üzerinde bulunan mafsal bağlantı noktalarının konum vektörleri	41
Şekil 3.7. Sistemde kullanılan doğrusal motor sisteminin 3B görünümü ve motor açıklığı	43
Şekil 3.8. İkili raylı motor sistemlerinin zemine konumlandırmasının kapalı görünümü	44
Şekil 3.9. İkili raylı motor sistemlerinin zemine konumlandırılmış halinin 3B görünümü	44
Şekil 3.10. İkili raylı motor sisteminde bulunan vektörler ve geometrik ölçülendirmeler	45
Şekil 3.11. İkili raylı motor sisteminin yerleşiminin açık gösterimi ve ölçülendirmesi	46
Şekil 3.12. Ters kinematik hesaplamada geometrik çözümlene yöntemi için platformda bulunan üçgenler	48
Şekil 3.13. B_1 noktasının doğrusal motor sisteminin hareket eksenine dik uzaklığının gösterimi	49
Şekil 3.14. Noktanın doğruya olan uzaklığının genel gösterimi ve formülü	50
Şekil 3.15. Hareketli platformun çalışma uzayında gerçekleştirdiği açısal ve doğrusal hareketler	53
Şekil 4.1. Matlab ile ters kinematiğe uygun hazırlanan sistemin temel iskelet modeli ..	54
Şekil 4.2. Çalışma kapsamında yapılan prototip cihazın 3B ve gerçek görünümü	55

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Doğrusal motor sisteminin 3B modeli ve parçaların isimleri	56
Şekil 4.4. Motor yatağı parçasına ait 3B model ve kaba ölçüleri	57
Şekil 4.5. Motor yatağı parçasının diğer parçalar ile patlatılmış montaj görünümü.....	58
Şekil 4.6. Sonlandırıcı destek parçasına ait 3B model ve kaba ölçüleri	58
Şekil 4.7. Sonlandırıcı destek parçasının diğer parçalar ile patlatılmış montaj görünümü	59
Şekil 4.8. Taşıyıcı parçaya ait 3B model ve kaba ölçüleri.....	60
Şekil 4.9. Taşıyıcı parçanın diğer parçalar ile patlatılmış montaj görünümü	60
Şekil 4.10. Taşıyıcı platformun 3B modeli ve parçaların isimleri.....	61
Şekil 4.11. Ara bağlayıcı parçaya ait 3B model ve kaba ölçüleri	62
Şekil 4.12. Ara bağlayıcı parçanın diğer parçalar ile patlatılmış montaj görünümü	62
Şekil 4.13. İkili mafsal köşesi parçasına ait 3B model ve kaba ölçüleri.....	63
Şekil 4.14. İkili mafsal köşesinin diğer parçalar ile patlatılmış montaj görünümü	63
Şekil 4.15. Hareketli üst plaka ve kaba ölçüleri.....	64
Şekil 4.16. Tez çalışması için tasarlanan ve kullanılan mafsala ait farklı açılardaki 3B görünüm	65
Şekil 4.17. Çalışmada kullanılan mafsal modeline ait sınır açıların çizelge gösterimi	66
Şekil 4.18. Mafsal sistemi ve bağlantı kolunun patlatılmış montaj görünümü.....	67
Şekil 5.1. Sistemin genel elektronik denetim bileşenleri ve kontrol süreci.....	69
Şekil 5.2. Mikrodenetleyicinin genel yapısının şematik gösterimi.....	71
Şekil 5.3. Arduino Nano 328p ve Arduino Mega 2560 gömülü denetleyici kartları.....	73

Şekil	Sayfa
Şekil 5.4. Master ve Slave cihazların I ² C protokolü ile iletişimi.....	74
Şekil 5.5. Sistemde master ve slave denetleyicilerin bağlantı şeması	75
Şekil 5.6. MMA845X açı sensörünün pinleri ve genel görünümü	76
Şekil 5.7. Sistemdeki sabit alt zeminin 3B görünümü.....	77
Şekil 5.8. Denetleyici kart ile MMA845X açı sensörünün bağlantıları.....	78
Şekil 5.9. Sınır anahtarı ve şematik gösterimi	79
Şekil 5.10 Sınır anahtarının doğrusal motor sistemi üzerindeki konumu.....	80
Şekil 5.11. Gömülü kart ile sınır anahtarının bağlantısı	80
Şekil 5.12. 17HS4801 model nema 17 step motor ve iç görünümü	81
Şekil 5.13. 17HS4801 model nema 17 step motorun teknik çizimi.....	82
Şekil 5.14. Step motor bobin yapısı için şematik gösterim.....	82
Şekil 5.15. Sabit mıknatıslı step motorların adım hareketleri.....	83
Şekil 5.16. Değişken relüktanslı step motorların yapısı	84
Şekil 5.17. Hibrit model step motorun yapısı ve kesit görünümü	85
Şekil 5.18. Doğrusal step motora örnek gösterim.....	85
Şekil 5.19. A4988 step motor sürücüsü ve pin yapısı.....	86
Şekil 5.20. A4988 sürücü kartının denetleyici, motor ve besleme için şematik bağlantısı	87
Şekil 5.21. CNC Shield 'ın bağlantıları ve mikrostep pinleri	88
Şekil 5.22. LCD ekranın arayüz tasarımı ve arduino ile bağlantı şeması	90
Şekil 5.23. PS2 pin yapısında kolun doğrudan Arduino Mega ile bağlantıları.....	92

Şekil	Sayfa
Şekil 5.24. Güç kaynağının görünümü ve PS-ON pini ile çalıştırılması	93
Şekil 6.1. Bell laboratuvarlarında geliştirilen ilk transistör (1947)	94
Şekil 6.2. Genel çalışma sürecine ait akış diyagramı.....	95
Şekil 6.3. Çalışma döngüsü içerisindeki yazılımsal katmanlar.....	96
Şekil 6.4. Slave cihazın doğrusal motor sistemi kontrolüne ait çalışma döngüsü	100
Şekil 6.5. Doğrusal motor sistemi için hız hesaplama algoritması	104
Şekil 6.6. Kalman filtresinin altyapısı.....	107
Şekil 6.7. Kalman filtresinin k iterasyonuna ait çalışma döngüsü.....	109
Şekil 6.8. 20 adet örnek veri için kalman filtresi girdi ve çıktı grafiği.....	111
Şekil 6.9. Prototip sistem denetiminde kullanılan kontrol kolu ve tuş bilgileri.....	112

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
\vec{A}_i	i . motora ait A noktasının konum vektörü
\vec{B}_i	i . motora ait B noktasının konum vektörü
\vec{BS}_i	i . doğrusal motor sisteminin başlangıç konum vektörü
$BS\delta_i$	i . raylı motor sistemi başlangıcının O merkezine göre net açısı
$BS\theta$	Doğrusal motor sistemi başlangıcının kendi eksenine göre O merkezine doğru yaptığı açı
\vec{BT}_i	i . doğrusal motor sisteminin bitiş konum vektörü
$BT\delta_i$	i . raylı motor sistemi bitişinin O merkezine göre net açısı
$BT\theta$	Doğrusal motor sistemi bitişinin kendi eksenine göre O merkezine doğru yaptığı açı
\vec{C}_i	i . motora ait C noktasının konum vektörü
d_i	P_i mafsalının düşey izdüşümünün i . motor sisteminin eksenine olan dik uzaklığı
\vec{D}_i	i . motora ait D noktasının konum vektörü
d_{maf}	İkili mafsal köşesinde mafsallar arasındaki mesafe
d_{mot}	İkili paralel doğrusal motor sistemi arasındaki mesafe
d_p	Platform merkezinden ikili mafsal köşesine olan yarıçap
δ_{6x1}	Doğrusal motor sistemlerinin O merkezine göre konum bilgisini içeren matris
δ_i	i . doğrusal motor sisteminin O merkezine göre konumlandırması
f_i	Eklemlerin serbestlik derecesi
f_p	Pasif serbestlik derecesi sayısı
h_i	Platformun i . köşesinin yüksekliği
i	Sistemdeki özdeş yapıların kaçınıcı olduğu indisi
j	Eklemlerin sayısı

Simgeler**Açıklamalar**

k	Kalman filtresinde geçerli iterasyon
K_k	Geçerli iterasyona ait kalman kazancı.
L	Bağlantı kollarının uzunluğu
n	Kinematik bağ sayısı
O	Sabit alt plakaya ait eksen takımının merkezi
\vec{P}_i	Platformun i . köşe noktasının konum vektörü
P_k	Geçerli iterasyona ait hata kovaryansı.
P_{k-1}	Bir önceki iterasyona ait hata kovaryansı.
\vec{PD}	Hareketli platform için öteleme vektörü
PD_x	x ekseninde yapılan doğrusal hareket
PD_y	y ekseninde yapılan doğrusal hareket
PD_z	z ekseninde yapılan doğrusal hareket
PM	Hareketli üst plakaya ait eksen takımının merkezi
R	Kalman katsayısı
r_{BS}	Doğrusal motor sisteminin başlangıç noktasının O merkezine göre yarıçapı
r_{BT}	Doğrusal motor sisteminin bitiş noktasının O merkezine göre yarıçapı
r_p	Platform mafsallarının PM merkezine göre yarıçapı
STP	Step motorun bir tam adım ile yaptığı dönme açısı
V_i	i . doğrusal motor sisteminin hızı
V_{max}	Doğrusal motor sistemine gönderilebilecek maksimum hız parametresi
x	Eksen takımı üzerindeki x ekseni
X_i	Geçerli zaman diliminde i . doğrusal motor sisteminin mevcut konumdan hedef konuma olan yol uzunluğu
X_k	Geçerli iterasyona ait kalman tahmini.
X_{k-1}	Bir önceki iterasyona ait kalman tahmini.
X_{max}	Geçerli zaman diliminde hedef en uzak doğrusal motor yol uzunluğu
y	Eksen takımı üzerindeki y ekseni
z	Eksen takımı üzerindeki z ekseni

Simgeler	Açıklamalar
Z_k	Geçerli iterasyona ait işlenmemiş ölçüm verisi
α	x ekseninde yapılan açısal hareket
β	y ekseninde yapılan açısal hareket
$\varepsilon_{6 \times 1}$	Platform mafsallarının PM merkezine göre konum bilgisini içeren matris
ε_i	Platformun i . köşesinin PM merkezine göre yaptığı açı
θ	z ekseninde yapılan açısal hareket
λ	Belirlenmiş çalışma uzayındaki serbestlik derecesi
μ_i	i . sistemin geometrik çözümlemede L kolunun bulunduğu bölge için düşey düzlemdeki sapma açısı
σ_i	i . sistemin geometrik çözümlemede L kolunun genel sistem için düşey düzlemdeki sapma açısı
φ	Platformun mafsalının mafsal köşesine göre PM 'de yaptığı açı
ω_d	Doğrusal motor sisteminin hareket mesafesi
ω_i	i . doğrusal motorun hesaplanmış açıklık mesafesi
ω_{min}	Doğrusal motor sisteminin O merkezine göre başlangıç mesafesi
ωM_i	i . doğrusal motorun gerçek zamanlı açıklık mesafesi

Kısaltmalar	Açıklamalar
3B	Üç Boyutlu
6DOF	6 serbestlik derecesi
A	Amper
ALU	İşlemcide aritmetik mantık birimi
bit	Bilgisayarda en küçük bellek boyutu
CAD	Bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design)
CCW	Motorda saat yönünün tersi yönde dönüş
cm	Santimetre
CNC	Bilgisayar destekli kontrol
CPU	İşlemci (Merkezi işlem birimi)
CW	Motorda saat yönünde dönüş

Kısaltmalar	Açıklamalar
DC	Doğru akım
EEPROM	Elektrik sinyali ile yazılıp silinebilen bellek
g	gram
GND	Toprak hattı
Hz	Hertz
I²C	Çift yönlü haberleşme protokolü (Yarı eşzamanlı)
IDE	Tümleşik kod geliştirme ortamı
İRMS	İkili raylı motor sistemi
KB	Kilobayt
kΩ	Kiloohm
LCD	Sıvı kristal ekran
mA	Miliamper
MCU	Mikrodenetleyici
MHz	Mega Hertz
mm	Milimetre
MS1	Mikro Step 1
MS2	Mikro Step 2
MS3	Mikro Step 3
N	Manyetik alanda N kutubu
N/cm	Tork birimi (Newton / Santimetre)
PPR	Düzlemsel paralel sistemler (Prismatic Prismatic Revolute)
PRR	Paralel zincir manipülatörü (Prismatic Revolute Revolute)
PWM	Darbe genlik modülasyonu
RAM	Rastgele erişilebilir bellek
ROM	Sadece okunabilir bellek
RPR	Düzlemsel Paralel Robotlar (Revelute Prismatic Revelute)
RRR	Küresel paralel manipülatör (Revolute Revolute Revolute)
S	Manyetik alanda S kutubu
SCL	Seri haberleşmede saat sinyali hattı
SD	Serbestlik derecesi
SDA	Seri haberleşmede veri hattı
SMD	Yüzeye monte devre elemanı

Kısaltmalar**Açıklamalar****SRAM**

Statik rastgele erişilebilir bellek

THY

Türk Hava Yolları

V

Volt

vb.

ve benzeri

vd.

ve diğerleri

W

Watt



1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile robotik sistemlerin kullanılmadığı alan neredeyse yok denecek kadar az durumdadır. Özellikle askeri alanda, endüstriyel alanda ve eğlence sektörü gibi birçok yerde robotik sistemlerin kullanımına dahada önem verilmektedir. İnsanların yaptığı mükerrer veya tehlikeli işlemlerde, o işleri yerine getirmeyi amaçlayan robot tasarımlarının yapılarak kullanımı; iş yükünün azaltılması, zamandan kazanç ve ortada bir tehlike var ise o tehlikenin risklerinin azaltılması gibi birçok avantaj sağlamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında bir çeşit robot olan paralel mekanizmalar için yeni bir tasarımsal yaklaşım ile 6 serbestlik derecesine sahip bir modelin prototipi gerçekleştirilmesi ve çalışma uzayının incelenmesi amaçlanmıştır.

Paralel mekanizmalar genel olarak paralel manipülatörler olarak da adlandırılmaktadır. Bir nesneyi taşınmak, hareket ettirmek ve başka bir yere monte etmek gibi işlevler manipülasyon olarak tanımlanmaktadır. Tez kapsamında yapılan platform çalışmasında bir çeşit manipülasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Burada gerçekleşen manipülasyon işlemleri bütününe genel bir terim olarak manipülatör denmektedir. Manipülatör sistemlerinde bulunan hareketli yapıya sahip bağlantı kollarının eklemlere mafsal yardımıyla bağlanması ile rijit yapı oluşur. Bu rijit yapıların sayısı sistemin serbestlik derecesini vermektedir. Bağlantı derecesi en fazla iki olan manipülatör sistemlerine basit kinematik zincir denmektedir. Manipülatör sistemlerinde bulunan bağlantı kollarının iskelet ve bağlantı biçimi açık döngülü ve kapalı döngülü kinematik zincir yapısını oluşturmaktadır [1, 2].

Manipülatör sistemleri genel yapısına ve çalışma alanlarına göre üretilmiş üç farklı yapıda karşımıza çıkmaktadırlar. Bunlar çok sık kullanılan seri manipülatör, paralel manipülatör ve çok yaygın olarak kullanılmayan hibrit manipülatör sistemleridir. Hibrit manipülatör sistemleri fazla kullanılmaması bu manipülatör sistemini nerede kullanabiliriz şeklinde araştırmalara yönlendirmektedir. Ayrıca çalışma uzayının işlevselliği açısından üzerindeki araştırmalar yoğunlaşmaktadır. Hibrit manipülatör sistemleri açık zincir ve kapalı zincir sistemlerden oluşmaktadır. Paralel yapıdaki manipülatörlerin çözüm matrisi benzeri hesaplama gerçekleştirdiği söylenebilir. Bu yaklaşımlarla paralel manipülatör sistem yapısında kapalı kinematik zincir ve seri manipülatör sistem yapısında da açık kinematik zincir hesaplama tanımlamaları yapılmaktadır. Hibrit manipülatör modeli sayesinde paralel

manipülatör sistemlerindeki kısıtlı çalışma uzayı dezavantajı sistem içerisindeki seri yapının avantaja çevrilmesi ile ortadan kaldırılmıştır. Bu durum hibrit manipülatör modeli üzerinde daha çok çalışma etkisi yaratmıştır [3].

Paralel manipülatör sistemleri, sabit ve hareketli platformlar arasında en az iki bağlantı kolu olmasıyla sağlanmaktadır. Bu tip paralel manipülatör sistemlerinin ilk örneklerinden olan Dr. Eric Gogh'un geliştirmiş olduğu Stewart-Gough ya da Stewart Platformudur. Eric Gogh'un geliştirdiği platform mekanizmaları endüstriyel birçok sektörde kullanılmıştır. Özellikle otomobil sektöründe ve uçak simülatörlerinde kullanılmıştır [4].

Günümüzde mekatronik ve robotik bölümlerin medikal sistemler üzerine ilgileri gün geçtikçe artmaktadır. Medikal sistemlerin gelişimi cerrahi uygulamalarda robotik sistemlerin kullanımının arttığını göstermektedir. Burada tek başına işlev gören robotik cerrah fikrinin yanı sıra insan olan cerrahın kontrolünde gerçekleşen robotik cerrahi müdahaleler de bu sistemlerin kullanımına örnek olarak gösterilebilir. Buna bağlı olarak medikal sistemler robotikleştirilirken, cerrah yerine bir robotun aynı işi yapması, geliştirilen medikal robotik sistemle birlikte cerrahi uygulamada yeni tedavi seçeneklerinin sisteme entegre edilmesini doğurur.

Robot sistemleri, General Motors firması arge çalışması sonucunda insan hayatına 1958 yılında kaynak işlemlerinde insan yerini alması ve kalıp makinelerinin işlevselliğini arttırmak amaçlı geliştirilmiştir. İlk robot, General Motors firması tarafından Unimate adını alan robottur (Şekil 1.1.). Daha sonrasında yetkili firma, Unimate ismini verdikleri robotu 1961 yılında bir sanayi sistemine adapte etmişlerdir. Robot fabrika sistemlerinde başarılı olmasının ardından yaygın hale gelmiş olup günümüze bir ışık tutmuştur [5].



Şekil 1.1. General Motors tarafından geliştirilen Unimate adlı robot

İnsanların özellikle endüstriyel alanında yaptığı işlerde istenen ürün veya hizmete göre yapılacak işlemlerin karmaşıklığı artmaktadır. Mükerrer yani tekrarlı işlemlerde manipülatörlerin fonksiyönelliğinden faydalanmak yapılan işi oldukça verimli bir süreçten geçmesini sağlar. Robotların hassasiyet ve süreklilik özellikleri sürekli olarak öne çıkmaktadır. Öne çıkan bu özellikler ile endüstri, medikal, uzay ve matematik bilimlerinde kullanımı oldukça artmıştır. Bununla birlikte robotik sistemlerin gittikçe insanların yerini aldığı görülmektedir. Özellikle son yıllarda robotların medikal çalışmalarda kullanımına yönelik ilginin gittikçe arttığı bilinmektedir. Robot endüstrisinin düşük maliyetli olması, operasyonel üstünlükleri ve yüksek performans özellikleri burada etkin bir rol oynamaktadır. Robotlar bu avantajlar dışında güvenlik, kontrol edilme, hareket işlev kısıtlılığı ve bakım-onarım gibi dezavantajlara sahiptir. Robotik sistemlerin her ne kadar dezavantajları olsa da avantajları daha fazla olması talebi arttırmaktadır [6]. Yapılan birçok bilimsel çalışma ve araştırma sonucunda robotikte yaşanan eksiklikler için yenilikçi çözümler üretilmektedir ve bu dezavantajlar giderilmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

Günümüzde tasarlanan paralel mekanizmaların temeli 20. yüzyılın ortalarında D. Stewart tarafından atılmıştır. İlk olarak uçuş simülatörü amaçlı üretilen platform zamanla; eğlence makinalarında, cerrahi robotlarda, endüstriyel alanda ve askeri projelerde kullanımı artmıştır. Akabinde yapılan çalışmalar birçok alanda bilimsel araştırmalara konu olmuştur. Yapılan araştırmalar ile mevcut sistem tipleri için yeni kullanım alanlarının keşfi sağlanır ve diğer yönden yapılan araştırmalar ile farklı sistem tipleri geliştirilerek aynı işlemin verimliliği üzerinde birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Tez çalışmasında bu mekanizmaların kullanım alanlarından bahsedilmiştir.

Bu tez çalışmasında 6 serbestlik derecesine sahip bir platform, benzetim yöntemlerinden faydalanılarak özgün çalışma sağlayan bir model tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Literatürde bilinen Stewart platformu mekanizmasından farklı olarak hareket kaynağı olan eyleyicilerin kol uzunluklarının değişimine göre değil, zemine göre doğrusal hareket yapması ile yenilikçi bir platform modeli gerçekleştirilmiştir. Modelde altı bağlantı kolu bulunmaktadır. Bağlantı kollarının bir ucu (alt bağlantı kısmı) raylı doğrusal hareket sağlayan mafsal yatağına, diğer ucu ise hareketli üst platforma bağlıdır. Buradaki doğrusal hareket step motorlardaki dairesel hareketinin vidalı mil ile doğrusal harekete çevrilmesi ile oluşmaktadır. Her doğrusal motor sistemi için 59N/cm torca sahip toplamda altı adet step motor kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında, literatürdeki diğer 6 serbestlik derecesine sahip platformlardan farklı yapıda özgün tasarıma sahip platform tasarlanarak prototip sisteme aktarılmıştır. Yapılan bu sistemin modellenmesi, benzetimi ve çalışma uzayı analizleri gerçekleştirilmiştir. Modellenen sisteme göre çalışma uzayı ve hareketleri incelenmiştir. Tez çalışmasındaki prototip sistemde zeminde sabit olarak bulunan ve vidalı mil sistemleri ile doğrusal hareket sağlayan altı adet step motor tahrikli sistem bulunmaktadır. Doğrusal hareketi sağlayan motorların her biri birbiri ile bağımsız olarak belli bir kinematik hesaba göre çalışmaktadır. Bu çalışmada bağlantı kollarının bağlı olduğu mafsal yatağı zemine bağlı motor sistemi üzerinde bulunmaktadır. Bu sistem üzerindeki step motorun çevirdiği vidalı mile göre ray üzerinde ileri geri hareket sağlanır. Raylı sistemdeki bu hareketler, hareketli platformun çalışma uzayı içerisinde istenilen konuma gelmesini sağlamaktadır. Bu doğrusal hareketi

sağlayan raylı motor sistemleri, platformda özelleştirilmiş hareketleri yapabilmek için farklı kinematik hesaplamalara göre konumlandırılır. Sistemin çalışma uzayı içerisinde yaptığı tüm öteleme ve dönme hareketleri için geometrik çözümler yapılarak ters kinematik hesaplamaları yapılmıştır.

Çalışma kapsamında sistemde kullanılan master yapıdaki mikrodenetleyicinin yavaş kaldığı gözlemlendiği için paralel iş bölümü gerçekleştirilerek sistemdeki tüm eyleyiciler farklı denetleyiciler tarafından kontrolü sağlanmıştır. Kurulan algoritma ile I²C protokolünden faydalanarak tüm denetleyiciler tek işlemi paralel işleme alması sağlanmıştır. Bu sayede sistemdeki hız sorununa çözüm üretilmiştir.

Bu çalışmada raylı doğrusal hareket yatağında 6 step motor ve 6 mil kullanılmıştır. Vidalı mil, toplamda 160mm hareket sınırlarına sahip, hassas ve konumlandırma yapılabilen sistemin temel çalışma yapısını oluşturmaktadır. Vidalı mil step motorla tahrik edilerek eyleyici görevi görmektedir. Burada sistem yapısına entegre edilmiş step motorlar, vidalı millere uyguladıkları tahrik sonucu doğrusal hareketini sağlayarak hareketli üst platforma bağlı tablayı açısal ve doğrusal olarak hareket ettirmektedirler. Sistem prototipi üzerinde yapılan hareketlerden gözlemlenen gerçek veriler ile sistem kinematiğine etki edecek hesaplamalar ve hata ayıklamaları yazılımsal olarak gerçekleştirilerek eniyileme sağlanmıştır. Sistemin Matlab ile ters kinematiğe uygun iskelet modeli oluşturularak çalışma uzayı incelenmiştir. Prototip sistemin gerçekleştirilmesi için gerçek boyutta ölçülendirmelere sahip mekanik tasarımlar SketchUp 3B tasarım programında gerçekleştirilerek 3B yazıcı ile basımı gerçekleştirilmiştir. Sistem kurulumu gerçekleştirilerek kinematik hesaplamaların yapıldığı gömülü yazılım hazırlanarak prototip çalışması tamamlanmıştır.

2.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Mühendislikte birçok probleme çözüm üretilirken en önemli basamakların benzetim ve modelleme olduğu söylenebilir. Endüstrideki üretim uygulamalarında maliyet ve üretim zamanının daha verimli olabilmesi için modelleme ve benzetim yöntemleri kullanılır. Robot bilimi benzetim yöntemini özellikle seri robotlar sistemlerinde kullanmaktadır. Seri robot sistemlerinde kullanılan benzetim yönteminin en iyi örnekleri Robotica, RoboSim olarak gösterilebilir [7, 8]. Seri manipülatörler için literatürde oldukça çok benzetim yöntemi

geliştirilmiştir. Paralel manipülatörlerde ise seri manipülatörlere göre benzetim yöntemlerinin kullanılması oldukça azdır. Merlet 3-RPR (revolute–prismatic–revolute) yani Düzlemsel Paralel Robotlar olarak tanımlanan paralel manipülatörleri, C programlama dili ile kinematik hesaplamalarını analiz etmiştir.

Küçük, araştırmalarını düzlemsel paralel manipülatör sistemleri üzerinde yoğunlaştırmıştır [9]. Bu araştırmaları MATLAB programlama dilinde grafiksel yapıda interaktif bir tasarlama ve benzetim sistemi yapısına sahip SIDEPA algoritmasını geliştirmiştir. Bu SIDEPA algoritma yazılımı ile ters kinematik, ileri kinematik, tekillik ve çalışma uzayı analizlerini RPR (revolute–prismatic–revolute) düzlemsel paralel robotlar, RRR (revolute–revolute–revolute) küresel paralel manipülatör, PRR (prismatic–revolute–revolute) paralel zincir manipülatörü, PPR (prismatic–prismatic–revolute) düzlemsel paralel sistemler için kinematik hesaplamalar gerçekleştirilir. Bu algoritma sayesinde paralel manipülatörler sistem iskeleti formunda çizgiler halinde gösterilirler.

Gosselin, üç serbestlik derecesine sahip dönel ve prizmatik eyleyicilerden oluşmuş küresel paralel manipülatörlere yönelik; çalışma uzayı, ileri kinematik, ters kinematik, tekillik, benzetim ve tasarımları kullanılmıştır. Bu yazılım sayesinde grafik modellemesi gösterilmekte ve de interaktif olarak kinematik hesaplamalar yapılabilmektedir.

Wang genel Stewart platform sistemleri geliştirmiş olduğu yazılımla kinematik hesaplamaları, tekillik ve çalışma uzayı analizini sağlamıştır. Wang ve Ding, Visual C++ programlama dilinde geliştirdikleri yazılımı Stewart mekanizmalarına uyarlayarak kontrol arabirimi oluşturulmuştur. Wang çizgi, üçgen, dörtgen, beşgen, altıgen olacak şekilde sabit ve hareketli platformlara sistemlerinde düzlemsel geometrik şekiller temel alınarak Genel Stewart Platformu sistemi çalışmaları yapmıştır. Yazılımda ayrıca yörünge planlaması, çalışma uzayı, kabiliyet, tekillik planlamaları yapılmaktadır [10, 11].

Merlet, paralel manipülatör sistemleri üzerine kapsamlı bir kitap hazırlamış ve yapmış olduğu incelemeleri detaylı bir şekilde anlatmıştır. Dasgupta ve Marut Hyun Java, Stewart platform sistemleri ile alakalı literatür araştırması yaparak çözüme zor ulaşan sorunları ele almıştır. Bu araştırmaların devamında insan hayatında ağır yükler ve hassas olayların bulunduğu birçok durumda paralel mekanizmalar kullanılmaya başlamıştır. Örneğin yük taşımacılığında hayvanların yerine robotun kullanımı veya ameliyat yapan cerrahın aynı

hassasiyette görevi bir robota devretmesi alanlarda örnek olarak kullanıldığı belirtilmiştir [4].

Fichter, Stewart platform yapısını sağlayan bir robot manipülatör yapmıştır. Bu çalışmasında özellikle tekillik, kinematik, kinetik analizlerini göstermek için Oregon State Üniversitesi'nde eski yıllara ait çalışmaları örnek olarak sunmuştur. Fichter'in bu araştırmaları, kendisinden sonraki araştırmacılara yol gösterici olmuştur [12].

Faugere ve Lazar yaptıkları çalışmada paralel mekanizmaların sınıflandırmalarını farklı bağlantı ve hareket kısıtlılığı kombinasyonlara göre ayırt etmiştir [13]. Artigue tarafından altı serbestlik derecesine sahip paralel sistem, rijitlik matrisi ile karakterize edilmiştir [14]. Dafaoui ise altı serbestlik dereceli ve kuvvet geri beslemeli yapıda bir paralel sistem önermiştir [15]. Hunt ve Pritsschow önerdikleri yeni paralel robot modelinin çalışma prensiplerine göre noktalar ve doğrular arasındaki uzaklığa göre işlem yapan robotlar önerilmiştir [16, 17]. Gao, Stewart platform sistemleri ile ilgili önemli çalışmalarda bulunmuştur. Buradaki platform sistemlerinin çalışmalarında düzlem, doğru ve nokta aralarındaki mesafeleri baz alarak toplam 3850 çeşit Stewart platform sistemi olduğunu göstermiştir. Lazard ve Mourrain bu 3850 sistemden 1120 tanesinde kinematik hesaplamaları analiz etmek ve çözümlmek için kendi tavsiyeleri olan çözüm yöntemlerini önermişler ve kullanmışlardır [18, 19]. Wang, yüksek lisans tezi çalışmasında yaptığı araştırmalar sonucunda farklı yapılarda birçok Stewart platform mekanizması tavsiyesinde bulunmuştur. Önerdiği her bir platform sistemi için farklı konfigürasyonlar belirtmiştir. Bu sistemlerden bazılarını endüstriyel alanda kullanılmak üzere örnekler vermiştir [10].

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında paralel mekanizmaların gün geçtikçe araştırmalar ve yapılan çalışmalar ile sürekli geliştirdiği görülmektedir. Bu çalışmaların insan hayatında sürekli bir faydalılık sağlaması beklenir. Sürekli gelişmekte olan sistemler kendileri ile birlikte daha farklı sorunları doğurmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere sürekli olarak gelişim değişimi, değişim ise yarınları tasarlamayı gösterir.

2.2. Stewart Platform Mekanizması

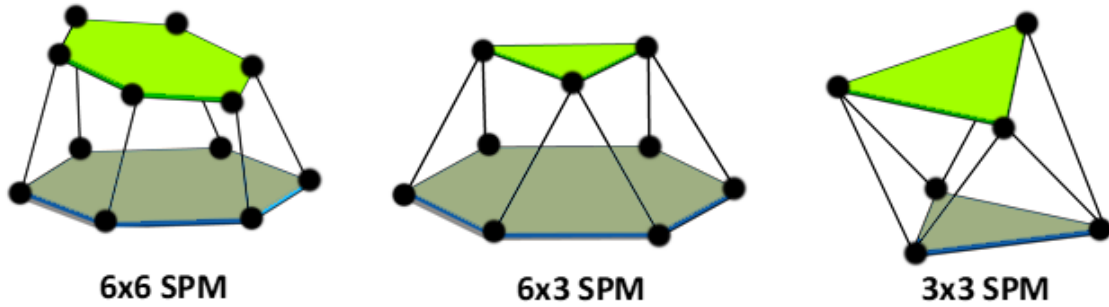
Manipülatör modelleri olan seri ve paralel manipülatör çeşitleri günümüzde birçok uygulamada kullanılmıştır. Bunların dışında iki manipülatör sisteminin birleşimi olarak

oluşturulan hibrit model manipülatör de günümüzde yer almış manipülatör modelleri arasında yer almaktadır. Hibrit model manipülatör tasarımları seri ve paralel manipülatörlerin gerisinde kalsada üzerinde yapılan araştırmalar ve çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Hibrit modeller mekanizmaların doğasının vazgeçilmez bir sistem bütünü olmaktadır. Seri, paralel ve hibrit model arasında paralel manipülatör sistemine en iyi örnek olarak Stewart Platformu verilebilir. 1965 yılında D.Stewart tarafından tasarlanıp yapılan Stewart Platformu, ilk olarak uçak test ve kontrol simülasyon mekanizması olarak kullanıldı. Buradaki amaç, uçağın sürüş öncesi pilotların eğitimidir. Bu sistem gün geçtikçe inşaat sistemlerinde, eğlence sejtöründe, denizcilikte ve medikal robotikte kullanıma başlanmıştır. Bu sistem üzerine yapılan araştırma ve çalışmalar sonucu, birçok stewart platform modeli ortaya çıkmıştır. Farklı tiplerde ve yapılarda stewart platformları tasarlanmış, birçok mekanizma gelişimine ışık tutmuştur.

Robotların sınıflandırmaları günümüzde serbestlik derecesi, çalışma uzayı, hareket kombinasyonu, sürüş tekniği ve kinematik yapısına göre belirlenmektedir. Bir manipülatör sisteminin üç boyutlu uzayda bir cisme göre istenen tüm hareketleri sağlayabilmesi için en az altı serbestlik derecesine sahip olması gerekmektedir. Bu sistemler genel manipülatör yapısını oluşturmaktadır. Bununla birlikte serbestlik derecesi altıdan fazla olan manipülatörler fazlalık sınıflandırılmasına alınır. Serbestlik derecesi altıdan az olan manipülatörler ise eksik serbestlikli manipülatörler olarak sınıflandırılırlar [20].

Stewart platform mekanizması için literatürde birçok farklı konfigürasyon bulunmaktadır. Bununla ilgili kaynaklar incelendiğinde uzaysal ve düzlemsel Stewart platform mekanizmaları şeklinde iki temel adlandırmaya yapılar olduğu görülmektedir. Bu iki temel Stewart platform mekanizmasından birincisi sabitlenmiş bir tabandan üst kısmında bulunan hareketli bir platforma bağlı üç kol bağlantısından oluşmaktadır. Bu modeldeki mekanizma 3 serbestlik dereceli düzlemsel platform sistemi, altı kol ile farklı bağlantı modellerine sahip platform ise altı serbestlik dereceli uzaysal stewart platform mekanizması olarak adlandırılır. Bu modellerde düzlemsel platform sisteminin uzaysal platform sistemine göre çalışma uzayı ve kinematik hesaplamalarının, kinematik analizlerinin daha kolay olduğu görülür. Yapılan literatür çalışmalarında gözlemlenen bilgiler doğrultusunda hem sabit uzunluğa sahip hem de uzunlukları değişen bağlantı kolları yapısında stewart platform mekanizmaları da vardır. Sabit uzunluktaki kola sahip platform modellerinin makaslı yapıda olduğu görülmektedir. İncelenen çalışmalarda ayrıca küresel prizmatik küresel mafsallı ve universal prizmatik

küresel mafsallı şekilde farklı stewart platform mekanizması mafsal tipleri bulunmaktadır. Sınıflandırma şekilleri arasında en yaygın kullanılmakta olan modelin üst hareketli platform ve alt sabit platform arasında uzunluk değişimi sağlayan bağlantı kolları şeklinde sınıflandırabiliriz. Bu bağlamda araştırmalar neticesinde üzerinde araştırmalar yapılan modellerin sıklıkla 6-6, 6-3, 3-3 bağlantı şeklindeki düzenekler olduğu karşımıza çıkmaktadırlar [21].



Şekil 2.1. Stewart platformu için 6x6, 6x3 ve 3x3 bağ tipinde mekanizmalar

Bu tez çalışmasında üzerinde çalışılan platform modeli alt bağlantı noktalarının yüksekliği sabit, üst plakada ise serbest hareketin olduğu bir sistem yapısı bulunmaktadır. Altta sabit bulunan raylı sistemler üzerinde zemine göre paralel doğrusal hareket sağlayan mafsal yuvaları bulunmaktadır. Literatürde üzerinde çalışmalar yapılan modeller arasında bu yapıda bir stewart modeli bulunmadığı için bu çalışmada tip sentezleme yapılarak yeni model önerisinde bulunmuştur. Bu yeni model için en temel fikir alt bağlantı kollarının doğrusal olarak kaydırılmasıdır. Sistem için çalışma uzayı analizi ve ters kinematik hesaplamalar üzerine yoğunlaşmıştır.

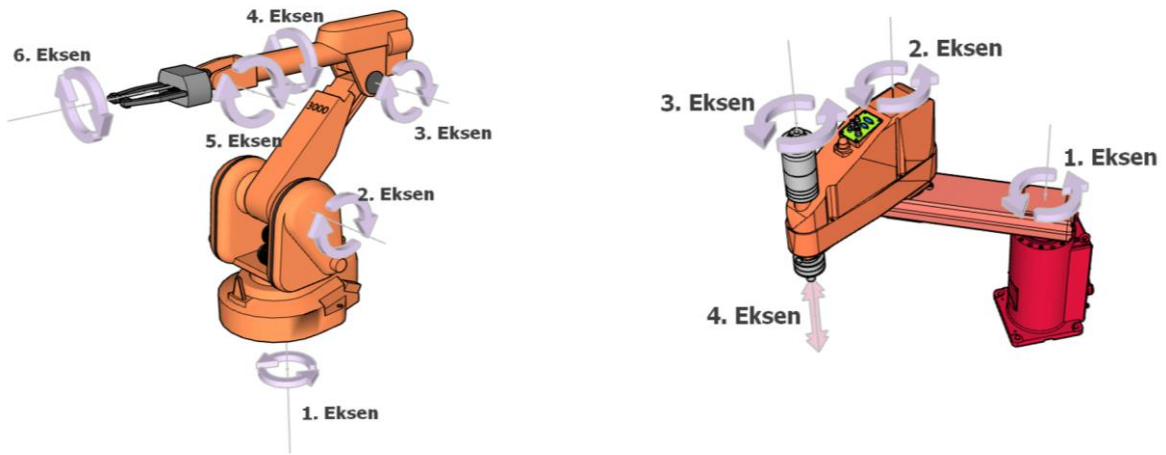
2.2.1. Platform tasarımına göre manipülasyon sistemleri

Manipülasyon sistemleri bir diğer adıyla manipülatörler, bağlantı sistematiğine göre sınıflandırılırlar. Seri, paralel ve son yıllarda daha da gelişme kat eden hibrit manipülatör çeşitleri bulunmaktadır. Her manipülatör çeşidi, kullanılacağı ihtiyaca göre tasarlanıp en iyi sonuç ve maliyeti hesaplanarak üretimi yapılır. Günümüzde paralel ve seri manipülasyon sistemlerinin kullanım alanları geniştir. Hibrit sistemler ise seri ve paralel manipülatör sistemleri gibi çok tercih edilmelerine rağmen gün geçtikçe güncel sistem farklılıklarıyla literatürlerde üzerindeki araştırmalar artmaktadır. Paralel ve seri manipülatör sistemleri

kıyaslandığında, seri manipülatör sistemlerinin paralel manipülatör sistemlerine göre daha çok tercih edildiği söylenebilir. Günümüzde paralel ve hibrit manipülatör sistemleri üzerine çalışmalar kullanım önerisi yapılan alanın ihtiyaçlarına göre oldukça arttığı görülmektedir.

2.2.1.1. Seri model manipülasyon sistemleri

Seri manipülatörler, uç uca eklenen bağlantı yolları ve bu bağlantı noktalarındaki eklem açılarının kontrol edilmesi ile sistemin uç noktasının konumunun istenildiği gibi yönetilmesini sağlayan robotik sistemlerdir. Uç noktanın konumunun ayarlanması için bağlantı kollarının aralarındaki açı ve kolların uzunluklarının geri beslemeli olarak değişimi sağlanır. Seri manipülatörlerde çalışma uzayı paralel mekanizmalara göre büyüktür. Bu sistemler neredeyse her sektörde kullanılmıştır. Yapısına bakıldığında da görüldüğü üzere insan kolunu andırmaktadır ve insan sistematüğini taklit edilmesi amaçlanarak uygulamaya konulmuştur. Özellikle endüstriyel alanda tehlikeli ve risk bulunan işlerde insan eli yerine bu sistemlerin kullanımı artmıştır. İşlem sonucunda, insan eli, kolu, dirseği ve omuz yapısı üzerine yoğunlaşarak taklit sistemler geliştirilmiştir. İnsan kolunun taklit edilmesi ile yapılan hareketlerin hassas ve doğru olması için kinematik hesaplamalar ile birçok çözüm kümesi bulma yöntemi geliştirilmiştir (Şekil 2.2.).

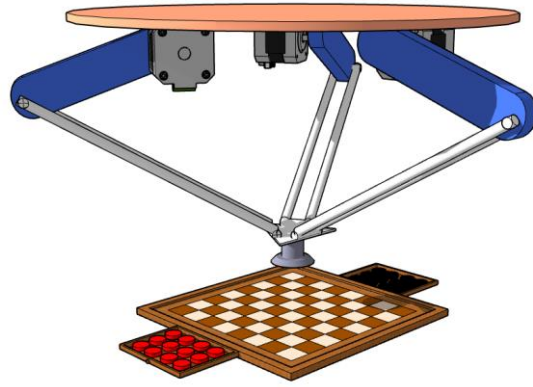


Şekil 2.2. 6 eksenli manipülatör (solda) ve 4 eksenli scara manipülatör (sağda)

2.2.1.2. Paralel model manipülasyon sistemleri

Paralel manipülatörler, iki rijit cisim arasında bulunan birden fazla seri manipülatörün kullanımından oluşmaktadır. Şekil 2.3. ile piyasada delta robot olarak geçen bir paralel

manipülator gösterilmiştir. Üst rijit cisim ile alttaki rijit cisim arasında 3 farklı nokta arasında birleşim sağlayan seri kollar görülmektedir. Manipülator sistemlerinde eyleyici tipi, rijit yapılarının yerleşimi ve bağlantı biçimleri sistemin çalışmasını doğrudan etkilemektedir. Bu etmenlerin en doğru şekilde kullanımı birçok avantaj sağlamaktadır. Paralel manipülatorler eyleyici ve rijitlik yapılarına bakıldığında seri manipülatorlere göre daha çok avantajlıdır. Yapılarında en az bir kinematik zincir modeli buldukları için kapalı kinematik zincir ya da kapalı zincir manipülator sistemleri şeklinde de adlandırılabilir.



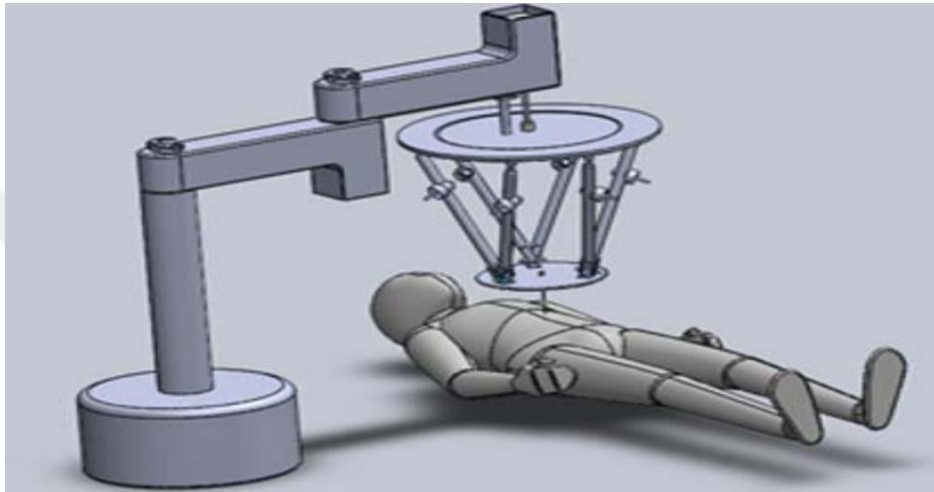
Şekil 2.3. Delta paralel manipülatorü

Gün geçtikçe gelişen paralel manipülator sistemleri için ortaya atılan ilk yazılı fikir Maxwell tarafından 19. yüzyılın sonlarında yayınlanan teorik makalede geçmektedir [22]. Pollard'ın 1942 senesinde arabaları boyamak için tasarlamış olduğu ve patentini aldığı mekanizma, paralel mekanizmalar için atılan ilk adımdır [23]. Atılan bu adımın ardından 1962 yılında araç lastikleri üzerine yapılan testlerde kullanılmak üzere paralel yapıya sahip bir manipülator tasarlanmıştır. D. Stewart ise 1965 senesinde uçuş simülatorü şeklinde kullanılmak üzere bir paralel manipülator tasarlanmıştır. Bu manipülator sisteminde bulunan alt kısımdaki sabit tabla ve üst kısımdaki hareketli tabla arasında uzunlukları değişen 6 bağlantı kolu bulunmaktadır. Stewart tarafından tasarlanan bu paralel model manipülator x , y ve z eksenleri için açısal ve doğrusal hareketleri sağlayabilen 6 serbestlik derecesine sahip yapıdadır.

2.2.1.3. Hibrit model manipülasyon sistemleri

Hibrit model manipülatorler, seri ve paralel manipülatorlerin yani kapalı zincir ve açık zincir sistemlerin birleşimidir. Seri ve paralel manipülator sistemlerinin bir arada kullanılması ile

hibrit manipülatör sistemi oluşmaktadır. Kinematik hesaplamalarda diğer manipülatör modellerine göre farklılık göstermektedir. Hibrit manipülatörlerin kinematik hesaplamaları seri manipülatöre göre daha basit olmalarına karşın paralel model manipülatöre göre kinematik denklem hesaplamalarında kompleks ve zor bir süreç içermektedir. Küçük ve Güngör hibrit model manipülatör için hazırladığı makalede, biyomedikal teknolojisi için Şekil 2.4. ile gösterildiği gibi cerrahi işlemler yapabilecek hibrit model manipülatör önerisinde bulunmuştur.



Şekil 2.4. Tıbbi amaçlar için önerilen yeni hibrit model manipülatör [24]

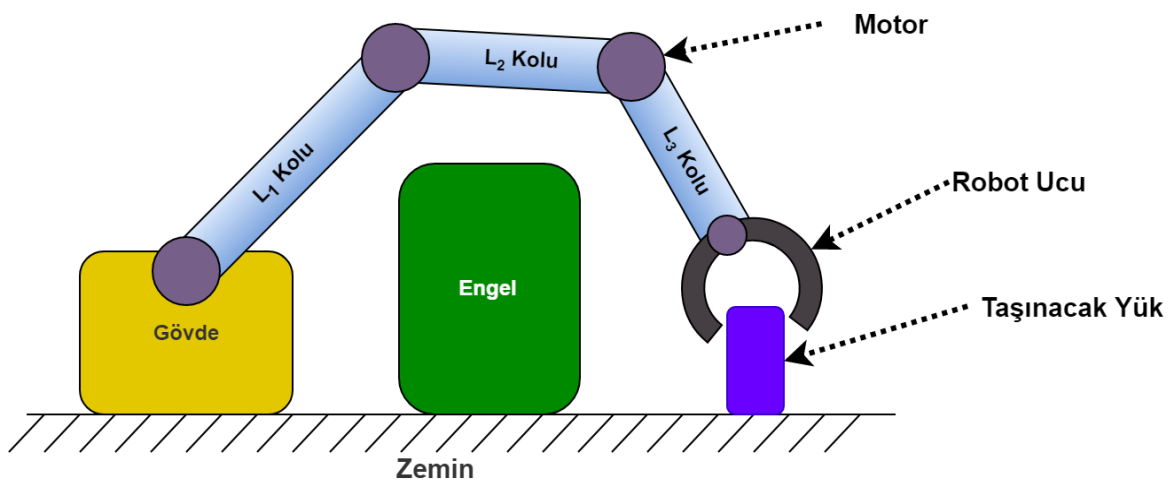
2.2.2. Seri ve Paralel model manipülasyon sistemleri karşılaştırılması

Seri manipülatörlerde ve paralel manipülatörler yapısı incelendiğinde birbirinden ayrı düzlemsel ve uzaysal yapıları bulunmaktadır. İki sistem için de çözüm kümesi hesaplamalarında hem ters hemde ileri kinematiğin kullanılması mümkündür fakat iki sistem için de en uygun hesaplama yöntemleri uç işlevciye göre farklı şekilde tercih edilmektedir. Seri manipülatörler için uç işlevcinin kinematiğine göre yapılacak hesaplamada ileri kinematik yöntemlerden faydalanılır. Paralel manipülatörlerde kinematik hesaplamalar yapılırken ters kinematik hesaplamalar kolay çözülürken, düz kinematik hesaplamalar ise oldukça karmaşık bir hal almaktadır. Ters ve ileri kinematik hesaplama farklılıkları manipülatör sistemlerin farklılığına göre kuvvet transformasyonunun bulunmasında zorluk seviyesini değiştirmektedir. Paralel manipülatör sistemlerinde ters kuvvet dönüşümünü hesaplamak oldukça zor, düz kuvvet transformasyon hesaplanması oldukça kolaydır. Bu durum seri manipülatör sistemleri için tam tersidir. Seri ve paralel manipülatör sistemlerindeki bir diğer farklılık ise tekilliktir. Paralel manipülatörlerde tekillik sistemin

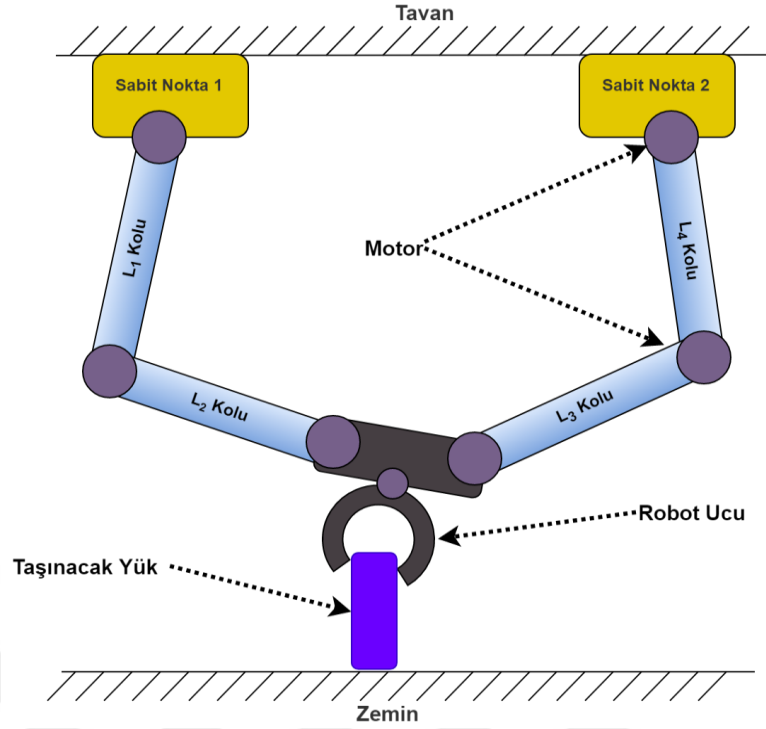
kontrol edilmesine ve serbestlik derecesinin fazla olmasına göre değişmektedir. Sistemin kontrol edilmesi ne kadar zorlaşır veya serbestlik derecesi ne kadar artarsa tekillik bununla doğru orantılı şekilde baskın bir hal almaktadır. Seri manipülatör sistemlerinde ise tekillik kısmi kitlenme ve serbestlik derecesinin düşük olmasına bağlı olarak değişir. Bu farklılıklar genel olarak tüm paralel manipülatör sistemleri için kullanılabilir. Bunun nedeni paralel manipülatörlerin birden fazla seri manipülatörlerden iki uç bağlayıcı arasında bağlanarak oluşmasıdır. Çizelge 2.1. seri-paralel manipülatör sistemleri karşılaştırması yapılmış ve bu sistemler için Şekil 2.5. ve Şekil 2.6. ile sistemlerin örnek gösterimi yapılmıştır [24].

Çizelge 2.1. Seri ve paralel manipülatör sistemlerin karşılaştırılması

	PARALEL MANİPÜLATÖR	SERİ MANİPÜLATÖR
Taşıma Kapasitesi	Yüksek	Düşük
Katılık	Yüksek	Düşük
Çalışma Uzayı	Küçük	Büyük
Tekillik Durumu	Karmaşık	Önemsiz
Kinetik/Dinamik Hesaplama	Zor	Kolay
Birim Yükte Harcanan Güç	Düşük	Yüksek
Atalet	Yüksek	Düşük
Ayarlanabilirlik	Karmaşık	



Şekil 2.5. Seri manipülatör sistemi yapısına örnek gösterim



Şekil 2.6. Paralel manipülatör sistemi yapısına örnek gösterim

Seri manipülatörlerde çalışma uzayının büyük olmasına karşın bir yükü taşıma kabiliyeti paralel sistemlere göre oldukça düşüktür. Seri sistemler frekans olarak düşük sinyallere sahip oldukları için kütle olarak ağır nesnelere yaptıkları işlem performansı ve hızları oldukça düşük kalmaktadır. Bu tür yük altında çalışma istenen durumlarda seri sistemler birbirleri ile sabit plaka ile hareketli plaka arasında birleştirilerek paralel sistemler oluşturulur. Daha güçlü mekanizmalar elde edilir. Ayrıca bu yapı sayesinde yapacağı işler için gerekli hassasiyeti sağlanmış olur. Seri manipülatör sistemlerinde uç işleyiciye kadar giden kısımda eklemler ve eyleyici kollar üzerindeki oluşan tüm hatalar toplanarak uç noktada daha büyük hata haline gelmektedir. Bu da çalışma uzayı içerisindeki hassasiyeti, kararlılığı ve sistem performansını olumsuz etkilemektedir.

Manipülatörler için literatür araştırması yapıldığında görülmektedir ki paralel sistemler için yapılan çalışmaların kullanım önerileri seri sistemlerden daha eskiye dayanmaktadır. Paralel manipülatörlerin için son 30 yılda endüstriyel çalışmalarda kullanımlarının arttığı görülmektedir. Paralel manipülatörler yüksek oranlarda katılık, duyarlılık, taşıma oranı gibi olumlu işlemler gerçekleştirdikleri için seri manipülatörlerin yerini almaktadırlar. Bu özelliklerinin dışında paralel manipülatörlerin çalışma uzayı seri manipülatörlerin çalışma uzaylarına göre küçük olması ve kinematik hesaplamalarda çözüm kümesinin zor bulunması

bu tip manipülatörlerin tipik problemleridir. Paralel manipülatör sistemlerinde sabit ve hareketli platformlar arasındaki bağlantı kolları sayesinde yüksek kapasiteli kütleleri daha rahat ve hassas bir şekilde istenilen konuma getirebilmek mümkündür. Paralel manipülatörlerde serbestlik derecesinin fazla olması sistemin kontrol tarafını daha karmaşık ve zor bir hal almasına sebebiyet vermektedir. Bağlantı kollarının fazla olması daha hassas işlerde aynı konumlar üzerine tekrar tekrar işlem yapmayı kolaylaştırmaktadır. Paralel manipülatörler, seri manipülatörlere göre rijitlik ve daha hassas bir şekilde çalıştıklarından dolayı yük altındaki birçok çalışmalara daha elverişlidir. Paralel manipülatörler ağırlık/kuvvet performansının yüksek olması sebebiyle güç ve hassasiyet istenen çalışmalarda tercihen öncelikli konumdadırlar. Yapılacak işlemlerin çalışma uzayı paralel manipülatör sınırları dahilinde ise bu gibi durumlarda seri manipülatörlere göre daha çok kullanılırlar [14].

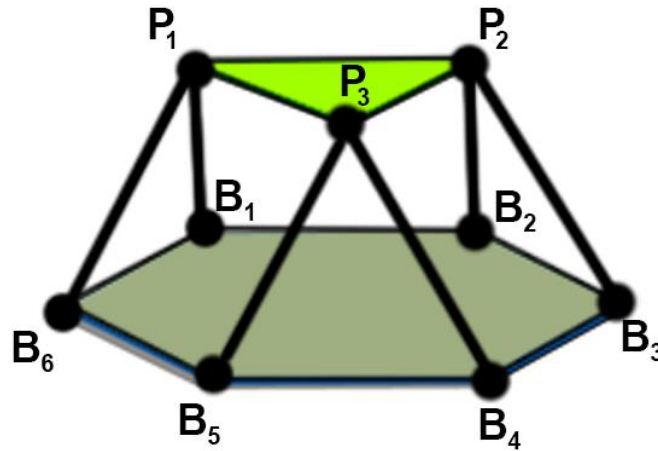
Paralel manipülatör sistemleri çalışma alanı olarak küçük bir alana sahip olmalarına rağmen birden çok bağlantının bir arada kullanılmasıyla daha ağır yükler altında çalışabilmektedir. Paralel manipülatörlerin kinematik hesaplamaları çok karmaşık olmasına rağmen birçok hassasiyet istenen işlevleri yerine getirmek için oldukça verimli çalışmaktadırlar. Paralel manipülatörler doğal frekans sinyalleri kuvvetli olduğu için kuvvet/ağırlık oranları oldukça yüksektir. Sabit platform üzerinde bulunan eyleyiciler hareketli sistem parçalarını ve platformu hareket ettirirken seri manipülatörlerde olduğu gibi uç işlevciye kadar hataları toplamamaktadır. Paralel bir şekilde bağlandığı için hataların ortalaması uç noktaya yansır ve böylelikle küçük hatalar seri manipülatörlerde olduğu gibi uç noktada büyütülmez. Bu nedenle özellikle tıp ve simülatörlerdeki kullanımı oldukça fazladır [26].

Bu sistemler için yapılan karşılaştırma sonucunda iki sistemin de birbirlerine göre avantajları ve dezavantajlarının olduğu görülmektedir. Sistemin dinamik çalışma esasına göre bakıldığında paralel manipülatörler daha avantajlı durumdadırlar. Çalışma uzayı büyüklüğüne göre bakıldığında ise seri manipülatör sistemler daha avantajlıdır. Sistemin çalışma uzayı içerisinde olup kilitlenme veya gerçekleştirilemeyen durumlar için tekillik ifadesi kullanılır. Sistem tasarımı ve benzetimi esnasında tekillik analizi gereklidir. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sistemde yapılan çalışmalar sonucunda, sabit platforma bağlı doğrusal motor sistemlerinin doğru konumlandırılması sayesinde tekillik söz konusu olmamaktadır. Seri model manipülatörlerde serbestlik derecesinin az olması durumlarında ve kısmi kilitlenme durumlarında tekillik söz konusu olur. Seri

mekanizmaların bir diğer dezavantajı ise açık zincir sistem yapısından dolayı eyleyiciden kaynaklı hatalar uca doğru gittikçe artmaktadır. Seri model manipülatörler rijit seviyeleri düşük olmasının yanı sıra küçük frekanslara sahiptirler ve çok hassas değildirler. Tez kapsamında yapılan paralel mekanizma için tekillik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analize göre motor yerleşimleri ve mafsal tasarımları gerçekleştirilmiştir.

2.2.3. Stewart platform mekanizmasının farklı yapı tasarımlarında incelenmesi

Günümüzde endüstrinin gelişimi ile birlikte doğan ihtiyaçların karşılanması için birçok model paralel mekanizma tasarlanmıştır. Stewart platformu sıklıkla bu yeniliklerden payını alarak literatürdeki çalışmalara bakıldığında farklı yaklaşımlar ile yeni tasarımlar yapıldığı görülmektedir. 21. yüzyılın başlarında Xiao-Shan Gao tarafından yapılan araştırmalar neticesinde toplamda 3850 mekanizma önerisi bulunduğunu belirtmiştir [27]. Bu araştırmaların daha iyi anlaşılması için anlatımı yapılmıştır. Stewart platform sistemleri kullanılan bağlantı kolları ve bu kolları bağlayan eklemlere göre sınıflandırılmaktadırlar. Bağlantı kolları sabit platformdaki alt tabladaki birleştikleri bağlantı noktaları x olarak ve hareketli üst platformdaki birleştikleri bağlantı noktaları y olarak gösterilirse bu sistemin x - y yapısında olduğu belirtilir. Bir örnekle bu durumu anlatırsak, alt platforma 6 farklı noktadan bağlanan bağlantı kolu varsayalım ve bunlar üst hareketli platforma ikişerli olarak gruplar halinde 3 noktada birleştirilirse bu durum 6×3 şeklinde ifade edilir [14] (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. 6×3 tipinde stewart platform mekanizmasında bağ yapısı

2.2.4. Stewart manipölatör sistemlerinin günümüzde kullanım alanları

Mekanik sistemlerin gelişimi gün geçtikçe paralel mekanizmaları ve bununla beraber stewart platformunun kullanımına ihtiyaç duyan yeni alanları gün yüzüne çıkarmaktadır. Kullanım alanlarının artmasıyla birlikte birçok farklı yapıda ve farklı alanda stewart platform sistemleri kullanılmıştır. Stewart platform manipölatörlerinin kullanıldığı alanlar uzay bilimi, sağlık alanı, uçuş alanı, robotik alan, simülatör sistemlerinin dizaynları ve eğlence gibi birçok yerde karşımıza çıkmaktadır.

Stewart platform sistemine ihtiyaç duyulan ilk alanlardan biride uçak simülatörlerindeki kullanımınıdır. Uçak pilotluk adayları için ilk uçuştan önceki uçuş eğitimleri oldukça önem taşımaktadır. Bu gibi durumlarda uçuş için yapılacak ilk tecrübe sanal ortamda bir benzetimleyici yani simülatör yardımı ile sağlanır. Bilgisayar destekli yazılımlar ve ekranlar ile de bu senaryolaştırılarak gerçek deneyime en yakın testler sağlanmış olur . Pilot için uçuş sırasında karşılaşabileceği durumlar simüle edilerek önceden tecrübe kazandırılmış olur. Günümüzde yapılan birçok uçak simülatörü için stewart platformu sisteminden faydalanılmıştır. Simülatör eğitimini alacak olan pilot adayının gerçek uçaktaki öteleme ve dönme hareketlerine en yakın seviyede öteleme ve dönme hareketlerini algılaması gerekmektedir. Pilot adayının bu hareketleri algılayabilmesi için havada durmayan bu sistemin havada ilerleyen bir uçak gibi hareketler yapması gerekmektedir. Bu hareketleri sağlaması için sistemin alt tarafına monte edilmiş ve pilot adayının kontrolü doğrultusunda hareket eden paralel bir mekanizma vardır [14]. Uçak simülatörleri günümüzde askeri, hususi ve okullarda oldukça fazla kullanılmaktadır. Örnek olarak Şekil 2.8. görüldüğü gibi uçuş simülatörleri bulunmaktadır.



Şekil 2.8. Havelsan'nın THY için ürettiği bir uçuş simülatörü

Herhangi bir nesneye hareket uygulandığında o nesne için bir ivme söz konusu olur. Bazı nesnelere örneğin sıvılarda bu ivme sönümlenir. Stewart platformları ile yapılan doğrusal ve açısal hareketler ile istenilen ivme etkisi oluşturularak gerçek hayat deneyimi sağlanır. Bu durumun tam tersindeki bir yapı da söz konusu olunca ivme, yapılan hareketin tersi sağlanarak sönümlenir. İvmenin sönümlenmesi Stewart platformu ile sağlanır. Biyomedikal alanda düşünülürse omurilik fitik gibi nakil ameliyatlarında organların taşıma sürecinde platform sisteminden faydalanılması örnek olarak verilebilir [28]. Biyomedikal alanında bu ve bunun gibi birçok örnek mevcuttur. Hassasiyet seviyesi ve risk bakımından önemli bir yer tutan kalp ameliyatları da hastanın sağlık durumunun daha iyi olabilmesi adına doktorların el titremelerini ortadan kaldırmak için bu sistemler kullanılır ve ameliyat bu şekilde gerçekleşir [29]. Bu gibi çalışmalar ile insan sağlığını korumak adına birçok benzer çalışma yapılmaktadır.

Aselsan'ın geliştirdiği milli tank projesinde stabilizasyon testleri yapmaları için oluşturulan simülasyon sisteminin tasarımında paralel manipülatör mekanizmaları kullanılmıştır. Burada stabilizasyon testleri gerçekleşen çalışmalarla birlikte sabit halde duran tank atış performansları yerine tank hareketliken atış yapma stabilizasyonu için ölçümler yapılmaktadır. Tanka yapılan bu stabilizasyon testi tankı kullanan operatör kontrolüne gerek kalmadan atış namlusunun gerekli algoritmalarla zemine göre paralel bir açıda hedefe kilitlenerek sabit kalmasını sağlar [30].

Robotik sistemlerin kullanımının artması ile insanların yapacağı işlerin birçoğu günümüzde robotlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Robot ve insan için karakteristik bazı özellikler Çizelge 2.2. ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.2. Robot ve insanın karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması

KARAKTERİSTİK	İNSAN	ROBOT
Koordinasyon	Görsel ve fiziksel/ Sınırlı	Geometrik/Yüksek doğruluk
Yetenek	Sensör bilgisine göre yüksek	Sensör çeşit ve sayısına bağlı/Sınırlı
Bilgi Son	Yüksek seviye/Yüksek kapasite Düşük seviye/Düşük kapasite	Yüksek seviye/Sınırlı Düşük seviye/Yüksek kapasite
Uyumluluk	Yüksek	Tasarımla sınırlı
Dengeli İşlev	Zamanla Hızla azalan	Zamanla yavaş azalan
Ölçeklenebilirlik	Yaradılıştan sınırlı	Tasarım sınırlı
Sterilizasyon	Kabul edilebilir	Kabul Edilebilir
Doğruluk	Yaradılıştan sınırlı	Yüksek
Yer Gereksinimi	Vücut ile sınırlı	Fazla
Risk	Radyasyon ve enfeksiyon	Yok
Kullanım Amacı	Genel	Özel

Stewart platform mekanizmaları denizcilikte de su altında yapılan çalışmalar için kullanılmaktadır. Su altında yapılacak mekanik ya da yapısal işlemlerde pozisyonlama görevini üstlenmektedir. Su altındaki çalışma performansları oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Bu çalışmalar için beklentiler ile test sonrasındaki sonuçlar kıyaslandığında alınan sonuçların beklenen sonuçlardan oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir [31].

2.3. Robot Manipülatörlerin Kontrolü

Robot manipülatörler bir çeşit robotik sistemdir. Robotik sistemler bilindiği üzere çevresiyle ve diğer donanımsal birimler ile etkileşim halindedir. Çevredeki iletişim halinde bulunduğu bir donanım olabilir, dinamik ve kinematik sistem olabilir ve hatta bir insan bile olabilir [32]. Gün geçtikçe robot manipülatörler bir objeyi taşıma, punta kaynağı, lazer kesimi, kaynak işlemleri ve boyama gibi birçok alanda kullanılmaktadır [33].Yapılan bu işlemler için hassas konumlandırma oldukça yeterlidir. Bu işlemlerin dışında işlenen malzeme üzerinden çapak alma, cilalama, kırılma özelliği olan nesnelere tutulması ve delik delmek gibi çevredeki objeler ile direkt temas kurma durumlarında kuvvet kontrolü gerektirir, sistemin tasarımına

göre kuvvet geri beslemesi sağlayabilmektedir [34]. Bu tür olaylarda bir objenin taşınması senaryosuna göre pozisyon kontrolü gerekir ise doğal dinamiklerin robotlardaki hassas konumlandırma ve kararlılığını etkileyeceği düşünülür ise en uygun işlem olarak görülmektedir [35].

Manipülatör sistemlerinin esnekliği ve hassas hareket kontrolü üzerinde 1970'li yıllardan beridir araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar uzun yıllar almıştır ve hareket kontrolü ve hareket esneklikleri üzerine birçok teori ortaya atılmıştır. Salisbury ve Craig yaptığı çalışmada, kuvvet geri beslenmesine uygun bir şekilde pozisyon yörüngesinin oluşturulduğu kontrol modelini geliştirmişlerdir [36]. Bu yaklaşıma karşılık olarak Whitney, Paul ve Shimano sistemin uç noktadaki hız değerinin kontrol altına alınabildiği sönüm yöntemini önermişlerdir. Hogan ise bu iki farklı yöntemin karışımı olan empedanslı kontrol sistemini önermiştir [37]. Hogan, yaptığı deneysel çalışmalarında empedans kontrolünü, etkileşim anından çalışma uzayına geçişi belirtmekte kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre doğal çevredeki katılıklara karşı kararlılık sağlayan ve ters kinematik hesaplamaları kullanma gereği duymamıştır [38].

Bilimsel araştırmalar sonucu bulunan temel kuvvet kontrolleri sırasıyla katılık, kuvvet, empedans, melez pozisyon/kuvvet, ayrıştırılmış ivme gibi kontrol uygulamalarıdır. Bu bilgiler neticesinde Raibert, Mason ve Craig araştırmalarının sonunda robot, bitiş noktası kuvvetlerini ve konumlandırmasını birlikte kontrol eden bir kontrol algoritması gerçekleştirmiştir [39].

Stewart Platform Mekanizması yapısına benzer çalışan paralel işlevli robotlar kapalı çevrime sahip sistemlerdir. Bu durum nedeniyle bağlantı şekillerinden kaynaklı kontrol çözüm algoritmaları karmaşık yapıdadır [40]. Seri robotlar daha önce bahsettiğimiz şekilde birbiriyle bağlantılı seri uzuvlarla bağlanmışlardır. Burada seri halde uygulanan bağlantılar mafsal ve bağlantı kollarından oluşan hataları toplayarak uç işlevcide istenmeyen durumlara neden olur. Bu durum seri mekanizmaların çalışma uzayında istenmeyen işlevler yaparak sistem performansını olumsuz yönde etkiler. Bu duruma paralel mekanizmalar uç işlevcide hataları toplamaz ortalamasını alır. Seri ve paralel sistemlerde hassas konumlandırma açısından bakıldığında paralel sistemlerin konumlandırmadaki doğruluğu seri sistemlere göre daha yüksek olduğu ortaya çıkar [41].

Tez çalışmasında prototipi geliştirilen sistem ters kinematik hesaplamalara göre çalışmasını gerçekleştirmektedir. Yapılan bu hesaplamalara göre platforma gönderilen doğrusal ve açısal hareketlerin her biri için geçerli zaman dilimi içerisinde hata denetimi ve tekillik kontrolü gerçekleşir. Eğer sistem çalışma uzayı içerisinde fakat doğrusal motor sistemleri genel olarak çalışmayı doğru sınırlar dahilinde gerçekleştirecek komutları almıyor ise hatalı pozisyon moduna geçerek sistemin belirlenen doğrultuda daha ileriye gitmesi engellenir. Böylece çalışma uzayı sınırlarında yapılan tüm hareketlerin kararlılığı sağlanır.

2.3.1. Geometrik eniyileme

Paralel mekanizmalar için yenilikçi birçok çalışma için tip sentezleme araştırmaları yapılır. Yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen verilere göre sistemin teoriden pratiğe aktarılması ve sistem yapısı için gerekli birtakım bilgilerin belirlenmesi gerekir. Bunlar sistemin hangi amaçla nerede ve nasıl bir işlev gerçekleştireceği kinematik, dinamik ve statik gibi hesaplamalar için oldukça önem arz etmektedir [42]. Paralel sistemin mekanik ölçülendirmeleri bu hesaplamalar ile birlikte işleme alınır. Tasarımda çalışma uzayı ve tasarım modeli belirlenirken yapıyı oluşturan parametrelerin ortaya çıkacak geometrik tasarıma uygun bir şekilde belirlenmesi gerekir [43]. Mekanizmada kinematik hesaplamaların en iyi şekilde işlenmesi için eniyileme çalışmaları yapılır. Eniyileme amacı olarak burada tasarım yapısının parametre gruplandırmaları ile tanımlanmış olası durumlar içinde en iyisini bulmaktır. Gosselin, 1985 yılında yapmış olduğu tez çalışmalarında paralel robot sistemlerinde programlamayı, eniyilemesini ve de kinematik hesap analizleri üzerinde durmuştur. Kosinska vd. kendisine has bir çalışma uzayı için delta robotların eniyilemesini kullanmıştır. Çalışma uzayı olarak en iyi olanı elde edebilmek için "Monte Carlo" sayısal yöntemini kullanarak çalışma uzayının kapasitesini genişletmeyi amaçlamışlardır [44]. Suğ vd. altı serbestlik derecesine sahip Stewart platform mekanizmasının eniyilemesi için genetik algoritma kullanmışlardır. Yazarlar çalışmalarında belirttikleri amaçları Jacobian matrisi ile durum sayısını ele almışlardır. Bu çalışmalar sonucunda elde ettikleri verileri quasi-Newtonian metoduyla yenileme çalışması yapıp genetik algoritma metoduyla karşılaştırmışlar ve genetik algoritmanın sonuçlarının daha iyi olduğunu elde etmişler [45]. Jiang, tiktora tezinde paralel robot mekanizmaların geometrik eniyilemesini ve bu mekanizmaların tekil noktaya göre uzakta bulunan çalışma uzayını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında Stewart platform mekanizmalarını ve üç serbestlik dereceli yapıya sahip olan düzlemsel ve paralel mekanizmaları ele almıştır. Bu mekanizmaları ele alırken eniyileme

noktasında Powell's yöntemi adında bir yöntem kullanmıştır ve bu mekanizmaların tekil nokta analizlerini en ince ayrıntısına kadar belirtmiştir [46]. Hay ve Snyman, ele aldıkları çalışmada üç serbestlik derecesine sahip paralel sistemlerin eniyilemesini sağlamışlardır. Burada Hay ve Snyman daha önce geliştirdikleri "chord" yöntemini bu çalışmalarında eniyilemesini gerçekleştirmek için kullanmışlardır. Buradaki amaçları ise "dexterous workspace" parametresini kullanarak fonksiyonel sistemin kullanıldığı aralığa tanımlı olan tüm metodlar ile ulaşılabilecek noktalardır [47]. Cha vd. diğerlerinden farklı olarak üç serbestlik derecesi yapısındaki bir paralel sistemi ve altı serbestlik dereceli bir paralel sistemi kullanarak bu iki sistem mekanizmasını birleştirip ortaya çıkan redundant ve hibrit (belirli serbestlik derecesine sahip bir işlem üzerinde gerekli serbestlik derecesinden fazla bulunması) model bir sistemin eniyilemesi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada sistemin eniyilemesini yaparken işlem yükü olmaması adına eniyilemesini bölgesel olarak ele almışlardır. Bu çalışmada bölgesel eniyileme ile sistemin tüm çalışma uzayı ve yörüngesi için eniyileme işlem gerçekleştirmek olmadığı burdaki bölgesel eniyilemenin bir anlık konumun zamana bağlı en iyi verisel parametrelerini bulmayı amaçlamışlardır. Burada çalışma boyunca sezgisel bir metod ile eniyileme çalışması gerçekleştirilmiştir [48]. Fatah ve Jazi Stewart platform mekanizması ve üç serbestlik derecesine sahip iki paralel sistem üzerinde eniyileme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Fatah ve Jazi çalışmalarında "Monte Carlo" yöntemi ile eniyileme çalışmaları yapmışlardır.

Yeni sistem türlerini bulmak için yapılan tüm çalışmalar literatür araştırmalarında tip sentezleme veya yapısal sentez olarak karşımıza çıkmaktadır. Paralel robot sistemleri için sistemin tip sentezlemesi ele alındığında yapılan çalışmaların sonucunda daha iyi performansa sahip olması veya yeni bir çalışma mekanizması bulmak amaçlanır.

Tip sentezleme araştırmalarında literatür yayınlarında graf teorisi, grup teorisi ve vida teorisi yer almaktadır [1]. Grup çalışma teorisi, katı bir cismin bir yerden başka bir yere geçmesini tanımlar. Bu tanımlamayı yaparken "displacement group" isimli bir grup tanımlar. Bu grup teorisi dışında graf teorisi ise bilgisayar, matematik, kimya, inşaat vb. birçok alanda kullanılmakta olan bir teoridir. Graf teorisine bağlı mekanizma tip sentezlenmesi ilk olarak Freudenstein'in önerdiği bir teori yöntemidir. Mekanizmada işlev olarak bu teori, mekanizma eklem ve bağlantılarını grafiksel bir gösterimle temsil eder [1, 49]. Son olarak vida teorisinde ise, Chasles teorisine dayanmaktadır. Bu teoriye ile katı halde bulunan bir cismin 3B uzayda yer değişimini incelenmektedir. Bu 3B uzaydaki cismin belirlenmiş olan

eksene göre yaptığı öteleme ve dönme hareketleri olarak açıklanır. Hareketin gerçekleşmesini sağlayan ve harekete referans olan eksen için vida ekseni tanımlaması yapılır. Öteleme hareketinin bu vida ekseni boyunca gerçekleşmesi ve vida eksenine göre oluşan dönme hareketinin açısına orantılanması ise pitch olarak adlandırılır [20].

2.3.2. Robot sistemlerinde mobilite

Çağımızda birçok yenilik ile birlikte mobilite kavramı ortaya çıkmıştır. Tam karşılığı birşeyin hareketliliği veya esnekliği gibi anlamlar taşısa da günümüzde cep telefonlarının kullanımı da bir mobilite süreci olarak görülmektedir. Robotikte ise sistemlerin hareket sağlayabilmesi mobiliteyi ifade eder. Mobilitenin iyi sağlanabilmesi için formüllerde analiz ve sonuç elde etmek adına sistemin mekanik tasarımıdaki tüm uzuvlarının uzunlukları, eklem konumlarının noktasal olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu parçaların bağlantıları sonucu yapacağı hareketler çalışma uzayına etki edecekleri için oldukça önem taşırlar. Sistem kinematiğine göre yapılan tüm hesaplamalarda yapılan bağlantılar ve sistemin çalışma uzayı içerisindeki gerçekleştirebildiği hareketleri ve serbestlik derecesini belirler. Sistemde bulunan bağlantı noktalarındaki mafsalların serbestlik dereceleri hareket sınırlarını oluşturmakta ve bu sınırlar içinde verilen komutlara göre yapılacak hareketleri belirler. Bu hareketler sağlanırken diğer mafsallardaki komut ve sınırlandırmalar ele alınarak hesaplamalar yapılır. Mafsallarda serbestlik derecesi belirlenirken birleşmesi sağlanan alt ve üst plakanın yaptığı uzaysal harekete göre mafsallarda açılar oluşmaktadır. Bu açılar mafsalların serbestlik derecesini belirlemektedir. Sistemin mobilitesi aynı zamanda serbestlik derecesini göstermektedir.

2.4. Çalışma Uzayı

Paralel bir manipülatör sistemi hareketlerinin sınır noktaları olan uç noktaları çalışma uzayını oluşturmaktadır. Çalışma uzayı bir sistemin tüm işlem hareketlerinin yapıldığı hareket sınırlarından oluşmaktadır. Paralel ve seri manipülatör sistemlerinde bağlantıların uç noktalara göre konumlamaları ve sayıları çalışma uzayını iki sistem içinde farklı yorumlamaktadır. Paralel manipülatörlerin hareketli üst platformun ağırlık merkezi koordinat eksenlerini vermektedir. Seri manipülatörlerde ise koordinat sistemi sistemin en uç noktasına göre ayarlanması yapılmaktadır. Bu koordinat sisteminde (x , y ve z parametrelerine sahip) değişik kombinasyon hareketlerine göre çalışma uzayı olarak

tanımlanan alan içerisinde hareket etmektedir. Koordinat sisteminin hareketleri ile gerçekleştirilebilen tüm kombinasyonların oluşturduğu kümeye çalışma uzayı denir [20, 50].

Yang vd. Stewart platformlarının uzay alanında çalıştırmak üzere tasarlanacak manipülatör sistemini kullanacakları zemin analizini yapmışlardır. Ancak bu çalışmalarında hareketli tablanın, sabit hareketlerle çalışma uzayında birtakım koordinatlara gidemediği görülmüştür. Merlet, mafsalların hareket limitlerini kullanmadan sabit hareket eden bir çalışma uzayı hesaplaması için teorik bilgiler sunmuştur. Gosselin Merletin anlattığı teorik bilgiler ışığında bu yöntemi geliştirerek CAD programı ile 3B hale getirip çalışma uzayı analizlerini yapmıştır [51, 2].

Manipülatör sistemlerinde bağlantı kolları ve bağlantı kollarının etkisiyle hareket eden hareketli tablanın çalışma uzayını belirlerken analitik hesaplama metotları ve geometrik metotlar kullanılmaktadır. Merlet bu konuya farklı bir şekilde yaklaşarak çözüm yöntemleri üç gruba ayırmıştır. Bu üç sınıflandırma sırasıyla Jacobian matris metodu, geometrik yöntem ve ayrıklaştırma olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu sınıflandırmalardan ayrıklaştırma yöntemi ters kinematik denklem hesaplamalarıyla hareketli bulunan platformun yavaş yavaş hareket ettirilmesiyle bağlantı kollarının sabit eksen takımındaki raylı sistem ile merkeze göre hareketlerinin hesaplamasını sağlamaktadır. Bu kontrollerle mafsallık hareket limitleri ve bağlantı kollarının hareketleri arasındaki mesafe hesaplamaları yapılır. Merlet bu yöntemi kullanarak çalışma uzayı için yapılan grafiksel analizlerin haritalandırmasını sağlarken baştan sona uzun bir süreç aldığını ve verimli olmadığını belirtmiştir. Ayrıklaştırma yöntemi ile yetersiz bir çalışma uzayı analizi olduğunu belirtmektedir. Bu yetersiz kalan analizleri eniyileme metoduyla hesaplayamadığını belirtmiştir. Bu duruma karşılık olarak Bonev ve Ryu, altı serbestlik derecesine sahip manipülatör sistemleri için, 3B harekette çalışma uzayını bu ayrıklaştırma yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Bu yöntemi Ficher 'da aynı şekilde altı serbestlik derecesine sahip manipülatör sistemlerinin çalışma uzaylarını belirlerken kullanmıştır [52, 12, 1].

Manipülatörlerin çalışma uzayları nokta ayrıştırma metodu sayesinde birbirine aynı oranda mesafelendirilip, uzaysal hareket alanını geometrik olarak oluştururlar. Bu hesaplamaların neticesinde, sistemdeki çalışma uzayında uç noktalar ele alınarak bağlantı kollarının hareket mesafesi hesaplanmaktadır. Mafsalların dönme açıları ve bağlantı kollarının çalışma uzayı içinde kilitlenmesi gibi durumlar oluşmaması için bağlantı kolları arasında senkron bir

çalışma yapılarak maksimum ve minimum hareket uzayı belirlenir. Bu koşulların sağlanması durumunda istenilen çalışma uzayı oluşmuş olur [53]. Gosselin ise çalışma uzayının alan hesaplamalarında ve analizlerinde geometrik yöntemin kullanılması önerisinde bulunmuştur. Bu geometrik yöntem sayesinde kinematik hesaplamalar kullanılarak hareketli platformun yaptığı mafsal açıları, platformun alanı, bağlantı kollarının hareketleri hakkında alınan bilgiler dâhilinde çalışma uzayı analizleri yapılır. Bu yöntem ile yapılan çalışma uzayı analizleri hareketli platforma bağlı tablanın çalışma uzayındaki açısal ve doğrusal hareketlerini elde etmemizi sağlar. Paralel manipülatör sistemlerinde altı serbestlik derecesine sahip sistemlerin çalışma uzayındaki konumlarını öğrenebilmek için kullanılmaktadır. Bu yöntemin farklı amaçlarından biride sistemdeki kesişmeleri görmezden gelerek çalışma uzayında belirlenmiş sınırlara varmasını ve eyleyicilerin minimum bir tanesinin üst değerine gelip gelmediğini kontrol eder. Gosselin araştırmaları ve diğer çalışmalarında, çalışma uzayında yapılan pozisyonu bulmak ve çalışma uzayını pozisyonlamak adına bağlantı kollarının kesişmesini sağlamaktadırlar. Kim ve Chung çalışma uzayı analizlerini yaparken genel olarak altı serbestlik derecesine sahip paralel sistemler için geometrik yaklaşım yöntemini kullanmışlardır. Merlet bu yaklaşımların dışında sistemin çalışma uzayını sınırlandıran ve sisteme etki eden tüm fiziksel parçaları hesaplayıp analizlerini yapmıştır. Burada bahsedilen sınırlamalar genel olarak bağlantı kollarının hareket sınırları, mafsalların mekanik sınırları ve bağlantı kollarının çalışma uzayı içerisinde kesişmeleridir. Merlet çalışmalarını ilerlettikçe amaçlanan bu yöntemleri Stewart platformunun hareket edeceği yön hesaplamasında, düzlemsel paralel yapıdaki manipülatörlerin çalışma uzayı hesaplamalarında ve analizleri hesaplamada kullanmıştır [54, 55].

Merlet bu yöntemlerin dışında üçüncü bir analiz yöntemi önerisinde de bulunmuştur. Merlet'in kullanmış olduğu yöntemlerden üçüncüsü Jacobian matris yöntemidir. Joe ve Haug geliştirdikleri çalışmalarda bu Jacobian matris yöntemi üzerinde hesaplamalar yaparak çalışmalarını tamamlamışlar. Hangi daha sonra yaptığı çalışmalarda çalışma uzayı incelemelerinde bu hareket denklemleri içindeki yöntemleri süreklilik olarak nitelendirmiştir. Bu süreklilik yöntemini paralel manipülatörlerin çalışma uzayının haritalandırılmasında kullandığı analizleri ve hesaplamaları sayısal kalıp haline getirmiştir [56, 57].

Wang ve Hsieh yaptıkları çalışmalar içinde süreklilik yöntemini kullanabilmek için Jo ve Haug'un yaptıkları çalışmaları ele alıp çalışmalarını sağlamışlardır. Paralel manipülatörlerde çalışma sınır değerleri belirlendiği durumlarda ve Jacobian matris denklemini çözümlenmesinde süreklilik yöntemi kullanılır. Ancak bu yöntem genel paralel manipülatör sistemlerinde verimli çalışmamaktadır [58].

Paralel manipülatörlerin uzaysal olarak yaptıkları hareketlerde çalışma uzayı birtakım sınırlamalara maruz kalır. Bunları genel olarak iki farklı grup olarak sınıflandırabiliriz. Bu sınıflandırmalar kinematik ve geometrik sınırlama olarak tanımlanabilir.

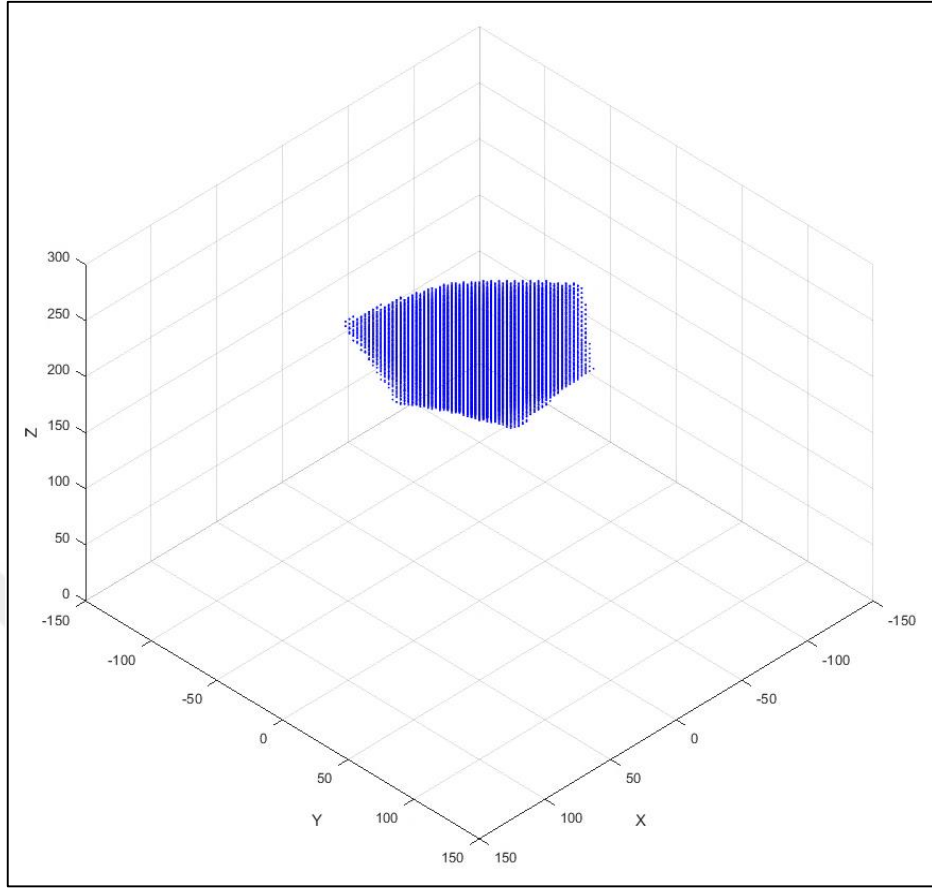
Geometrik sınırlandırmalar;

- Manipülatör sistemlerinde bulunan alt ve üst plaka yarıçaplarının ve bu plakaların ağırlık merkezlerinin birbirine olan uzaklıkları,
- Eklem, mafsalları ve bağlantı kollarının konumlandırmaları,

Geometrik sınırlandırmaların dışında kinematik sınıflandırmalar;

- Bağlantı kollarının hareket uzaylarını sınırlandırmaları,
- Mafsallar ile bağlanmış bağlantı kollarının açıların sınırlandırmaları: bu bağlantı kollarıyla hareketli ve sabit platformlar arasında bulunan bağlantı kollarının çalışma uzayları,
- Bağlantı kollarının birbirine olan etkilerinin sınırlandırmaları: Bu bağlantı kollarının çalışma uzayı içerisindeki hareketleriyle birbirlerine temas etmelerini ortadan kaldırmak veya bağlantı kollarının yapılan hesaplamalarla çalışma uzayı içerisinde nerede oldukları hesap edilmelidir [59, 60].

Prototipi geliştirilen sistem için benzetimin sağlandığı Matlab ortamında uç işlevci olan platformun merkez noktasının x, y ve z eksenlerine göre ulaşılabilir konumlarını analiz etmek amaçlı çalışma uzayı hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan çalışma uzayı nokta bulutlarından oluşmakta ve 2 mm çözünürlüğe göre noktaları oluşturulmuştur (Şekil 2.9.). Çözünürlüğün artırılması (hassasiyetin artması veya daha derin izleme yapılması) çalışma uzayı analiz sürecini daha da uzun tutacaktır.

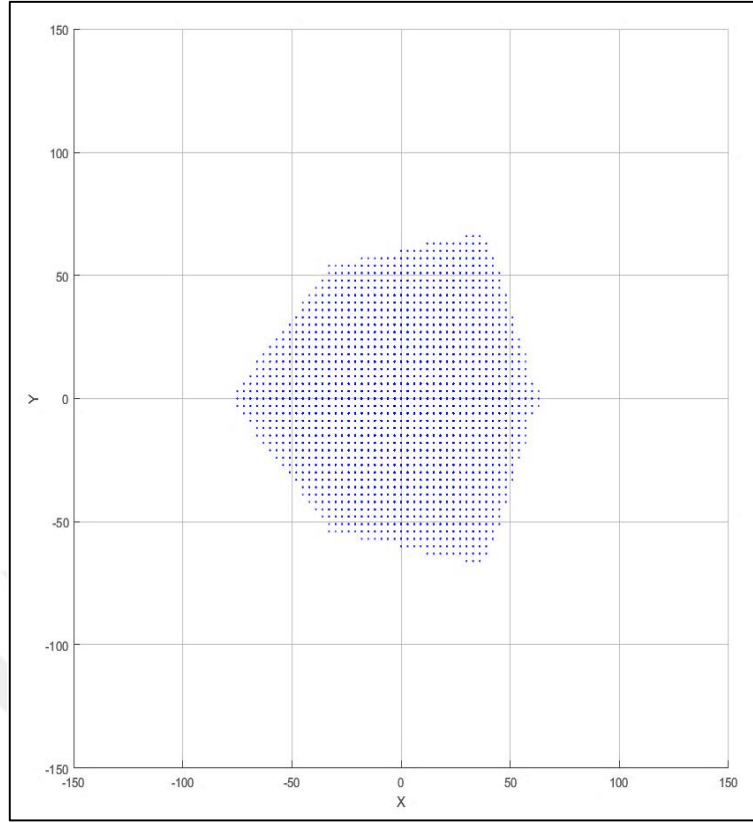


Şekil 2.9. Platformun çalışma uzayı perspektif nokta bulutu (2mm nokta aralığına göre)

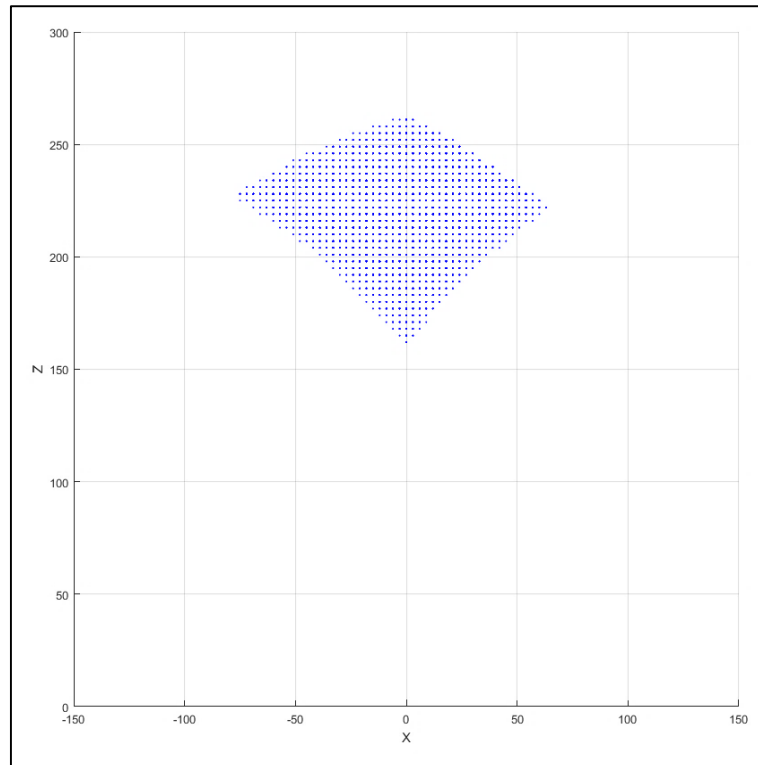
Çalışma uzayı düzlemsel olarak incelendiğinde prototipi geliştirilen sistemdeki platform için, hareketli üst platformun sınır kısımlarına doğru yaptığı hareketlerde daralmalar görülmektedir. Bunun nedeni ise platformdaki doğrusal motor sistemlerinin kendilerine tanımlı sınırlarının bulunmasıdır. Hesaplanmış çalışma uzayı nokta bulutu şeklinde x - y eksenleri için Şekil 2.10.'da, x - z eksenleri için Şekil 2.11'de ve y - z eksenleri için Şekil 2.12.'de gösterilmiştir. Doğrusal motorların sınırları dâhilinde gerçekleşen ve platforma göre yapılan doğrusal hareketlerin çalışma uzayı ön izlenmiştir. Çalışma uzayı içerisindeki geçkelebilecek en uç noktalar Çizelge 2.3. ile gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. x , y ve z eksenleri için çalışma uzayının doğrusal uç noktaları

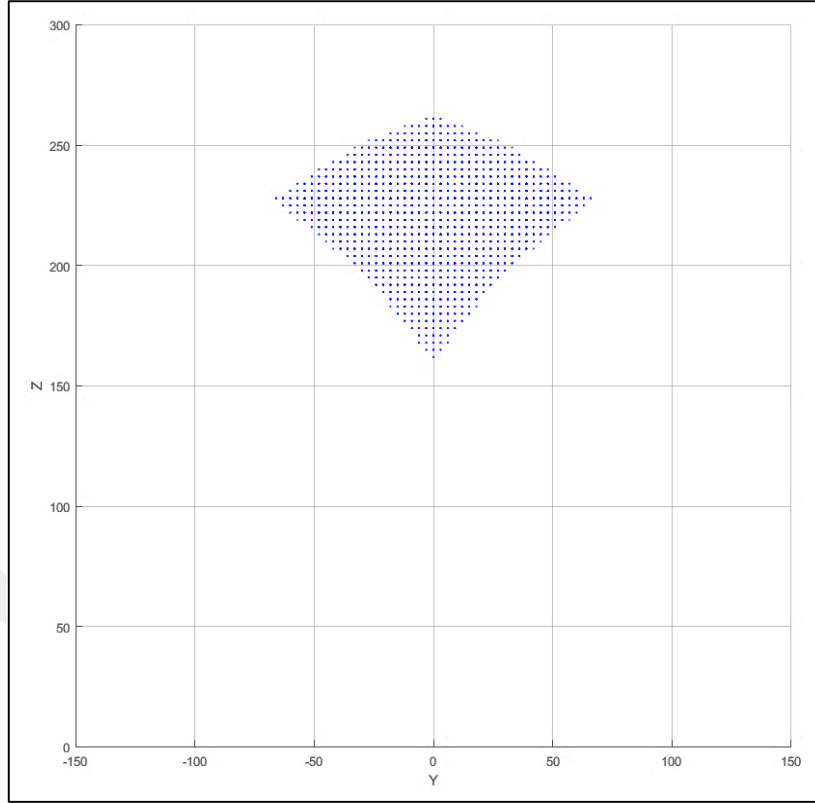
Eksen	Alt Limit	Üst Limit
x	$-77mm$	$57mm$
y	$-60mm$	$60mm$
z	$-68mm$	$34mm$



Şekil 2.10. Platformun çalışma uzayı x-y nokta bulutu (2mm nokta aralığına göre)



Şekil 2.11. Platformun çalışma uzayı x-z nokta bulutu (2mm nokta aralığına göre)



Şekil 2.12. Platformun çalışma uzayı y-z nokta bulutu (2mm nokta aralığına göre)

Çalışma uzayı etkilerinin sistem tasarımına göre değiştiği bilinen bir gerçektir. Yapılan analizde gösterilen çalışma uzayına sistemdeki her bir aksamın iskelet yapısındaki ufak değişimler olumlu ya da olumsuz olarak etki etmektedir. Çalışma uzayını etkileyen en önemli parametreler; motor yolu uzunluğu, bağlantı kollarının uzunluğu, mafsalların birbirlerine uzaklığı, platform yarıçapı ve doğrusal motor sistemlerinin yerleşimidir.

2.4.1. Kısıtlı çalışma uzayına sahip mekanizmalar

Günümüzde altı serbestlik derecesinden daha az serbestlik derecesine sahip sistemlere kısıtlı çalışma uzayına sahip mekanizmalar denir. Bu kısıtlı çalışma uzayına sahip sistemler endüstride üretilen ürünlerin miktar çokluğu ve fazla maliyet gerektiren sistemlerde kullanılır. Kısıtlı çalışma uzayına sahip manipülatör sistemleri ve altı serbestlik derecesine sahip sistemlere göre hız olarak daha verimli, daha ağır yüklerde çalışma avantajı, montaj avantajı, işlem yapılan komutların kolaylığı ve maliyetin düşük olması gibi avantajları vardır. Manipülatör sistemlerinin, Jakobian matrisi ile hesaplamaları yapılarak tekillilikleri bulunmaktadır. Du Pleisis ve Snyman (2001) 6-3 Stewart platform sistemlerinde sayısal

metotlarla çalışma uzayını belirlemişler. Aselsan üretmiş olduğu tanklarda, tankın stabilizasyonunu test ortamına taşımak için sınırlı yapıda serbestlik dereceli paralel platform kullanmaktadır (William J.). Amaçladıkları hedefte kontrol algoritmasını basitleştirerek montaj kolaylığıyla maliyeti düşürmek olmuştur.

2.4.2. Çalışma uzayında yörünge takip planlaması

Günümüz teknolojisinde engelden kaçan ya da yörünge takibi yapan sistemler araştırma konuları arasında oldukça fazladır. Yörünge takipli sistemlerde bir konumda bulunan tablayı başka bir konuma yönlendirmek ve yönlendirirken istenilen açığı sağlamak için çok çaba harcanır. Hareketli platform sistemindeki üst tablanın eksen hareketleri sırasında yaptığı konum değişikliği esnasında hız değişimi ve bu hız değişimine bağlı ivmenin yarattığı bir titreşim ortaya çıkar. Bu titreşimler yapılan hesaplamalar doğrultusunda istenilen doğru sonuca rağmen farklı açı ve konumlandırmalar sağlayabilir. Bu gibi durumların yaşanmaması için hareketli platform sistemindeki üst tablanın istenilen konum ve açıları sağlaması adına yörünge takip planlaması sağlanır. Bu yörünge planlaması doğru bir şekilde sisteme aktarıldıktan sonra platformda bulunan üst tablanın hareketleri esnasında bağlantı kolları arasındaki hız hesaplamaları yeniden ayarlanarak sistemin istenilen şekilde istikrarlı hareketler yapması sağlanır [61, 62].

2.4.3. Çalışma uzayında değişken uzayı metodu

Günümüz teknolojisinde paralel manipülatör sistemlerin çalışma uzaylarını oluşturmak için üç temel yöntem kullanılmıştır. Çalışma uzayı hesaplamaları için kullanılan bu üç yöntem sayısal, geometrik ve ayırıklaştırma yöntemleri olarak tanımlanırlar. Bu üç yöntem kullanıldıkları tasarımlarda kullanım açısından yeterli görülmektedir. Ancak bu yöntemler tasarımın ne olacağına değil yapılan çalışmadaki tasarım işlevlerinin çalışma doğruluğunu sağlarlar [1, 63].

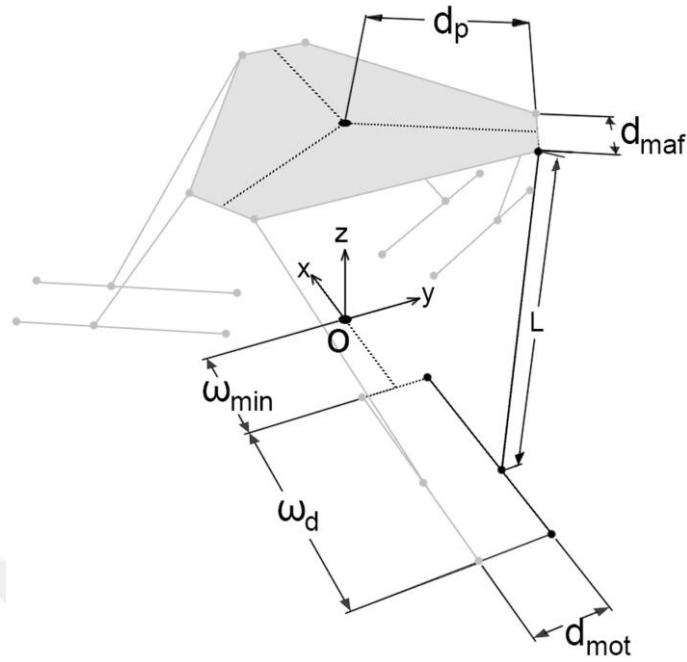
Bu kısımda tavsiye edilen yöntem diğer yöntemlerden farklı olarak çalışma uzayı sınırlarında belirli sayıda koordinat noktası seçilir. Bu noktalar ile sistemdeki hareketli tablanın hangi konumda olacağını hesaplayabilecek ve geometrik tasarımda kullanabileceği aralıklar verilmektedir. Bu parametre uzayı algoritmasına bağlı olarak aralık yönteminde kullanılmakta ve bu sayede yapılan hesaplamaların sonuçlanması oldukça kısalmaktadır.

Paralel sistemlerde kullanılan parametre uzayı hesaplarında ele alınan farklı parametre sayısında bir sınır yoktur. Bu parametrelerin artması ise yapılan hesaplamaların süresini fazlalaştırır.

Bu parametre uzay yaklaşımında kullanılan algoritma şu şekilde çalışır: Uzay alanı içerisinde belirtilen noktaların oluşturduğu köşelere bağlı bir prizmanın doğru işlev görebilmesi için her köşe noktasına farklı hesaplamalarla sonuç sağlaması yapılır. Bu seçili noktalardan oluşan sınır değerleri sağlaması doğrulanıyorsa prizma oluşumu kabul edilir. Belirlenen bu parametredeki değerlerin oluşturduğu prizmada seçilebilecek her parametre kümesi uzay alanındaki çalışmayı sağlar. Uzay alanında sağlaması gerçekleşmeyen tek bir nokta bile prizma köşe noktalarına bakılarak bulunur ve bulunduğu bölgede maksimum ve minimum sınırları ele alınır. Bu maksimum ve minimum değerlerin olduğu kenar alanı ortadan ikiye bölünmektedir. Bu bölünen kenar sonucunda büyük prizmalar ve küçük prizmalar oluşur. Algoritma burada büyük prizmayı göz ardı ederek küçük prizma üzerinden devam eder. Burada yapılan bölme işlemleri devam ederek oluşan prizmalarda kenar uzunluğunun belirlenen bir sınırın altına inmesiyle işlem sona erdirilir. Kabul edilmeyen prizmalarda kenar uzunlukları belirlenen sınırların altında kalması ya da tüm sınırın altında kabul görmüş prizma alanlarının kabul edilmesiyle algoritma çalışması sona ermektedir.

2.4.3.1. Stewart platform mekanizmasında değişken uzayı

Stewart platform sistemlerinde geometrik parametre sayısını azaltarak Parametre-Uzayı yönteminin manipülör sistemine iyi bir şekilde adapte olması sağlanmalıdır. Araştırmalar sonucunda geometrik hareket hesaplamaları için toplamda altı tasarım parametresi kullanılmaktadır. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz; sabit platform manipülörü için alınan başlangıç değeri (ω_{min}), doğrusal motor sisteminin hareket mesafesi (ω_d), ikili raylı motor sisteminin arasındaki mesafe (d_{mot}), doğrusal motor sistemi ile hareketli platform arasındaki bağlantı kolunun uzunluğu (L), platform merkezinden ikili mafsal sistemine olan yarıçap (d_p) son olarak hareketli platform mafsalı arasındaki mesafe (d_{maf}) ölçülendirmeleridir. Burada açıklanan altı parametre sembolik olarak Şekil 2.13. gösterilmiştir.



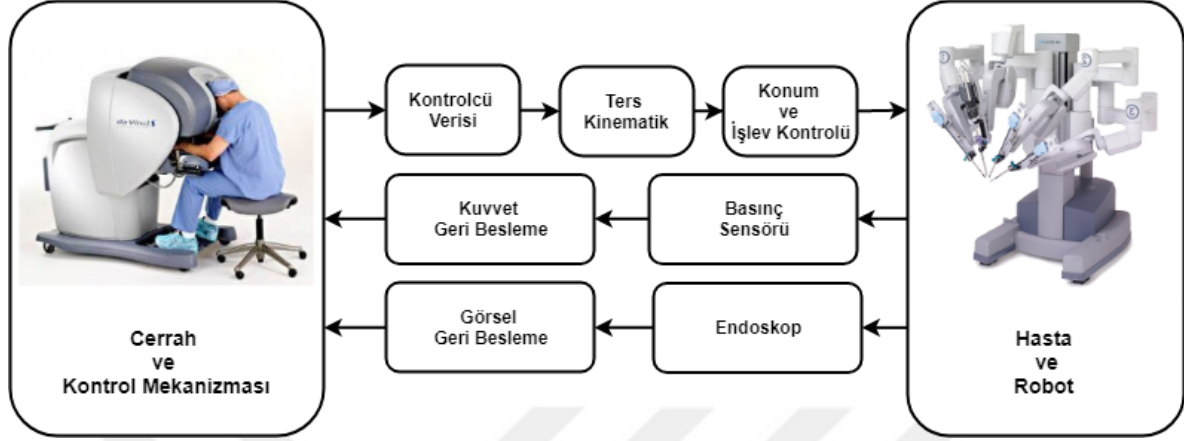
Şekil 2.13. Platform mekanizması için sistem karakteristiğini belirleyen değişkenlerin geometrik gösterimi

Şekil 2.13. ile gösterilen parametreler sistem tasarımını etkileyen minimum değişken parametrelerdir. Bu parametrelere sistem karakteristiğini belirlemedeki en temel değişkenlerdir. Yapılan değişiklikler çalışma uzayı dâhil tüm çıktılar için yeniden kinematik hesaplama ve analiz gerektirir. Platformun hareket alanı, sabit eksen takımındaki eyleyicinin etkisi kadar değişebileceğinden bağlantı platformun maksimum ve minimum hareket alanı eyleyicinin tepkisine bağlıdır.

2.5. Haptik Mekanizmalar

Haptik kelimesi Yunan dil kaynaklarına dayanan ‘haptesthai’ kelimesinden gelmektedir. Dokunma duyusu ya da bir şeyi kavrama anlamıyla kullanılmaktadır. Bu dokunma duyusu insan ile robotların etkileşimini kapsamaktadır. Bu temel uygulamalarda kuvvet geri beslemesi ve dokunma verileri için dış ortama yönelik verileri daha iyi ele alarak mühendislik ve biyomedikal uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Bu haptik çalışma ile insanlar gibi görme ve duyma işlevi gibi dış dünyadan büyük bir veri analizi yapabilmektedir. Haptik duyu algıları zor olmasının yanı sıra çalışmalara bağlı çok hızlı veri işleme yapılmalıdır. Çalışma verilerinin anlık olarak işlenebilmeleri önemlidir. Haptik

uygulamalar özellikle biyomedikal çalışmalarla birlikte tıp alanında oldukça kullanımı artmaktadır. Bu sistemin yapısı Şekil 2.14. verilmiştir.



Şekil 2.14. Haptik sistemlerin çalışma yapısı

3. KİNEMATİK HESAPLAMALAR

Kinematik hesaplamalar yapılırken hesaplama verisi olarak kullanacağı ve harekete neden olan kuvvet yerine hareket sonrası oluşan hız, yön, ivme gibi parametreleri ele alır. Bu tip Stewart platform sistemlerinde hareketli tablanın hareketini kontrol edebilmek için kinematik denklemler hesaplamalarına ihtiyaç duyulur. Hareketli platformun kinematik hesaplamaları yapılırken platforma etki eden kuvvetler göz ardı edilir. Bu tür Stewart platformu gibi seri ve paralel sistemlerde hesaplamalar genellikle üç kısımdan oluşmaktadır.

Birinci kısımda; platformun üst kısmında bulunan hareketli tablanın dönme ve öteleme hareketlerini ve sabit alt platformdaki eyleyici sistemin merkeze göre bağlantı kollarını konumlandırması hakkında yapılan ters kinematik hesaplamalar ele alınır. Bu hesaplamalar yapılırken ters kinematik denklemin sağladığı dönme ve öteleme parametreleri için üst hareketli platformdaki tablaya bağlı bulunan eklem merkezi ve alt kısımda bulunan sabit platform sistemine göre hangi konumda olduğunu hesaplamaktadır. Bu konumlandırma değerlerine göre alt sistemdeki eyleyici sistemin bağlantı kollarını konumlandırmaları ve tablaların dönme ve öteleme hareketlerini hesaplamalarıyla sonuç elde edilir. Paralel sistemlerde düz kinematik hesaplamalara göre ters kinematik hesaplanması ve tek bir sonuç vermesi daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Seri sistemlerde ise bu durum tam tersi bir sonuç vermektedir.

İkinci kısımda ise; hareketli platformun öteleme ve dönme hareketleri ile eyleyici sistemin merkeze göre bağlantı kolları konumlandırmaları için düz kinematik hesaplamaları gerçekleştirir. Paralel platform sistemlerinde düz kinematik hesaplamalar karmaşık ve zor olmasına rağmen seri manipülatör sistemlerinde oldukça kolaydır. Paralel sistemlerde elde edilen çözüm genellikle tek değildir. Bağlantı kollarının hesaplamalarında genelde birçok farklı olası durum için birden fazla çözüm vermektedir.

Üçüncü kısımda ise; sistem platformundaki Jakobian matrisini vermektedir. Jakobian matrisi eyleyici hızı ile hareketli platforma bağlı üst tablanın doğrusal ve açısal hızları arasındaki bağlantılarını analiz eder.

3.1. Sistemde Serbestlik Derecesi

Serbestlik derecesi bir sistemin hareketli mekanizma yapılandırmasını oluşturan bağımsız parametrelerdir. Bu bağımsız parametreler oluşturularak, sistemin çalışma konfigürasyonunu tanımlayabilmek amaçlanmaktadır. Serbestlik derecesinin yaygın olarak kullanılan Gröbler denklemi denklem (3.1) ile verilmiştir.

$$SD = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (3.1)$$

Denklem (3.1) ile verilen λ sistemdeki belirlenmiş olan çalışma uzayına ait serbestlik derecesini temsil eder. Bu sembolün değeri küresel ve düzlemsel sistemlerde üç olurken uzaysal sistemlerde ise serbestlik derecesi altı olmaktadır. Sistemde kinematik bağ sayısı n , eklem sayısı j ve eklemlerin serbestlik derecesi ise f_i ile gösterilmiştir.

Bir sistemde Gröbler denklemi kullanılacak olduğunda dikkat edilmesi gereken önemli bir durum bulunmaktadır. Bu durum kinematik yapıya sahip robotun eklem bağlantılarıyla ortaya çıkabilecek pasif durumda olan bir serbestlik derecesini belirtmektedir. Böyle bir durumda bu pasif serbestlik derecesi tork ve hareket işlevlerini yerine getiremez. Bu bağlamda Gröbler denklem hesaplamalarında pasif serbestlik derecesine sahip durumlar, denklemin genel hesaplamalarından çıkarılmalıdır. Bu durum uygulandığında denklem (3.2) ile gösterildiği gibi yeni halini alır [20].

$$SD = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i - f_p \quad (3.2)$$

Bu denklemde pasif serbestlik derecesine sahip durumu belirtmek üzere f_p sembolü kullanılmıştır. Bu pasif serbestlik durumları eklemler üzerinde Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Mafsalsal tipine göre pasif serbestlik derecesi durumları

MAFSAL TİPİ (ÇİFT MAFSAL YAPISI)	SERBESTLİK DERECEŚİ PASİF OLAN BAĞLANTI KOLLARI DURUMU
DÜZLEMSEL – DÜZLEMSEL	Serbestlik derecesi kesişen iki düzlemsel eksene paralel bulunan küresel eklem boyunca kayan 1 serbestlik derecesi oluşur. Bu iki düzlem paralel bulunduğu takdirde 3 pasif serbestlik derecesi oluşur.
DÜZLEMSEL – KÜRESEL	Küresel mafsalsal merkezinden geçen düzlemsel mafsalsal dik olarak bulunan ekseninde dönel bir pasif serbestlik derecesi oluşur.
KÜRESEL – KÜRESEL	İki küresel mafsalsalın merkezinden geçen bir eksenin çevresinde dönel olarak bulunan pasif serbestlik derecesi bulunur.

3.2. Stewart Platform Mekanizmasının Kinematik Hesaplamaları

Bu tez çalışması temelinde Stewart platform manipülatörün sistem yapısı olarak yapıldığından sistemin çalışması ters ve ileri kinematiğe dayalı hesaplamalara dayanmaktadır.

Stewart platformlarında genel olarak yapılan hesaplamalar üst hareketli tablanın açısal ve doğrusal olarak istenilen konumlara gelmesini sağlamaktır. Bu sağlama bağlantı kollarının maksimum ve minimum hareket değerlerine bağlı olarak gerçekleşir. Stewart platformunun hareketlerini gerçekleştirebilmesi için ters kinematik denklem hesaplamaları sonucunda elde edilen verilere göre çalışmaktadır. Bu platform çalışmasında hareketleri sağlamadan önce uzayda konumu bilinen uç elemanların ve bağlantı kollarının konumlandırılması yapılır. Bu konumlandırmaların ifade edilebilmesi için açısal konumlandırma Euler yada global koordinat açılarına bağlı α , β ve θ bulunur. Doğrusal hareketler ise x , y , z koordinatlarındaki öteleme hareketi ise PD_x , PD_y , PD_z şekliyle tanımlanır. Çizelge 3.2. ile gerçekleştirilen hesaplama yöntemine göre girdi ve çıktı durumları gösterilmiştir.

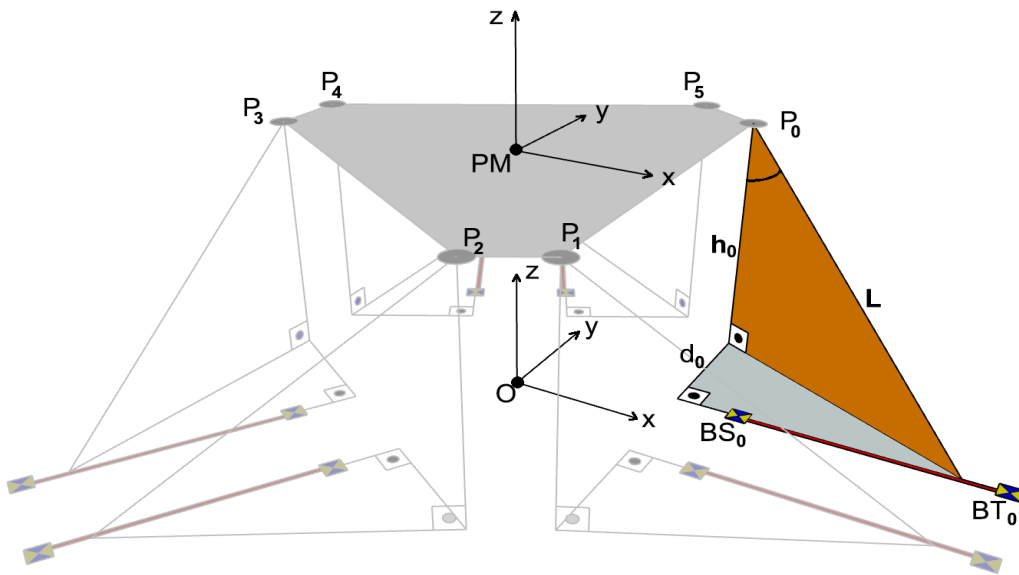
Çizelge 3.2. Ters ve düz kinematik için girdi çıktı parametreleri

	GİRDİ	ÇIKTI
TERS KİNEMATİK	$PD_x, PD_y, PD_z, \alpha, \beta, \theta$	$\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$
DÜZ KİNEMATİK	$\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$	$PD_x, PD_y, PD_z, \alpha, \beta, \theta$

Stewart platform mekanizması bir alana temas etmesi gerektiği durumlarda, temas sağlayacağı bölge noktasal olarak ele alınır. Bu noktasal bölgenin koordinatlarının hesaplanması ve de platformun bu noktasal bölgeye göre aldığı pozisyonun olduğu durumlarda bağlantı kollarının hareket alanı hesaplanarak çalışma uzayındaki sınır noktalar hesaplanır. Bu konumlandırma hesaplamaları bir algoritma ile gerçekleştirilir ve burada kullanılan hesaplama yöntemi olarak kinematik hesaplamalar kullanılmıştır.

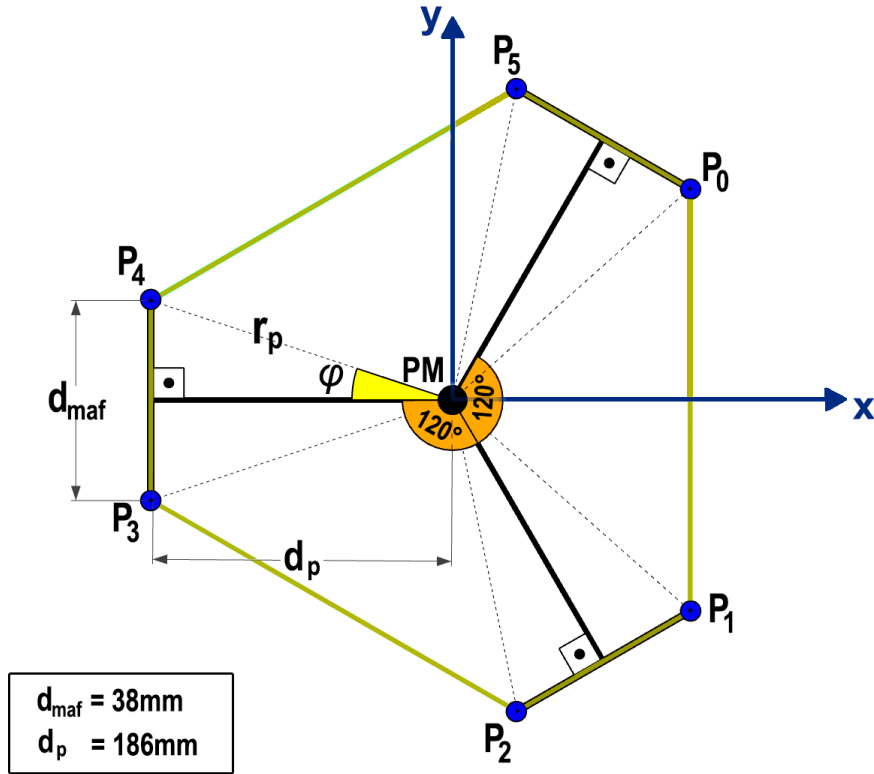
3.2.1. Ters kinematik hesaplama

Robotik sistemlerde ters kinematik denklem hesaplamaları yapılırken; sistemin hareketli platformuna ait koordinat sistemi bulunmaktadır. Bu koordinat sistemine bağlı olarak doğrusal ve açısal hareketleri sağlamak için hesaplamalar yapılır. Sistemde girdi olarak verilecek parametreler, platformun altı serbestlik derecesine sahip olmasından dolayı toplam altı adettir. Bu girdi parametrelerinin üç tanesi doğrusal, üç tanesi açısal olarak tanımlanmaktadır ($PM_x, PM_y, PM_z, \alpha, \beta, \theta$).



Şekil 3.1. Ters kinematik hesaplamasının başlangıç parametresi olan PM koordinat sistemi gösterimi

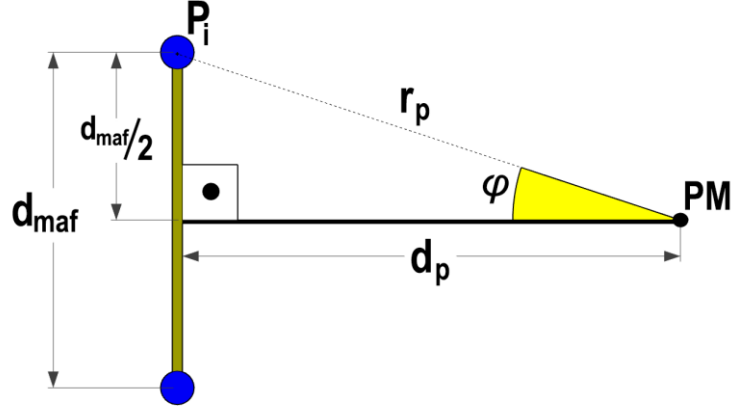
Şekil 3.1.' da gösterildiği üzere hareket eden sistemin konumunun hesaplanması için hareketli platformun merkezine konumlandırılan bir koordinat sisteminden faydalanılır. Sistemin yapacağı tüm dönme ve öteleme hareketleri için bu koordinat sistemi kullanılır ve terse doğru bir yol izlenerek zemine paralel olan motorların ne kadar açıklıkta olmaları gerektiği hesaplanır. Bu süreç izlenirken girdi parametreleri ($PD_x, PD_y, PD_z, \alpha, \beta, \theta$) sisteme aktarılır. Platformun her bir köşe noktası için yeni konum hesaplaması yapılır. Güncellenen konumlara göre zemindeki motorların hangi konuma getirilmesi gerektiği hesaplanır. Bu sistemde istenilen konuma göre motor konumları ayarlandığı için ileri kinematiğe göre daha kullanışlıdır. İleri kinematik hesaplamalarında doğru sonuca ulaşmak daha karmaşık ve zaman almaktadır. Yapılan doğrusal ve açısal hareketler çalışma uzayı dâhilinde gerçekleşir. Çalışma uzayı dışına çıkan parametreler hatalı çıktı vermekte olup gerçek hayat uygulamalarında olumsuz sonuçlar ile karşılaşılmasına yol açabilmektedir.



Şekil 3.2. Platformun görünümü ve gerekli ölçülendirmeleri

Kinematik hesaplamalar için öncelikle platformun yani hareketli üst plakanın bağlantı noktalarına ait koordinatların ve vektörlerin tanımlanması gerekmektedir. Platformun yapısına bakıldığında köşe kısımları kesilmiş bir üçgene benzer yapıdadır. Köşeleri

incelendiğinde her bir köşede ikili bağlantı noktası bulunmaktadır (Şekil 3.2.). Bu bağlantı noktaları $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ olmak üzere sistemin mafsallarını ifade etmektedir.

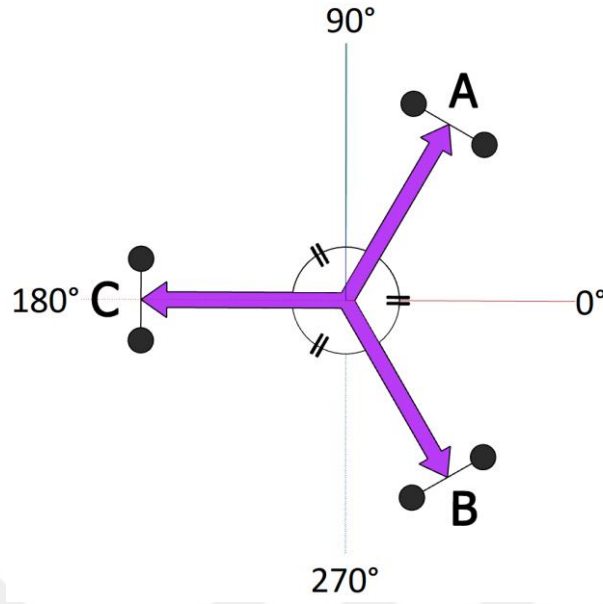


Şekil 3.3. Platformun tek köşesine ait i . mafsalin P_i konum vektörü

Köşe kısımlar üçgenin yapısı ve sistemin simetrik doğasını bozmamak adına platform merkezi olan PM 'ye göre d_p yarıçaplı uzaklığa 120° 'lik eşit açıda konumlandırılmıştır (Şekil 3.2.). İkili mafsal yapısında mafsalların merkezleri arası uzaklık d_{maf} olarak tanımlanır. Prototipi gerçekleştirilen sistemde $d_p = 186mm$ ve $d_{maf} = 38mm$ olarak gerçekleştirilmiştir. İkili mafsal yapısında her mafsal, platform merkezine göre uzaklığı r_p 'dir. Şekil 3.3. ile gösterildiği gibi r_p yarıçapın bulunması dik kenarların kullanılması ile mümkündür (Denklem (3.3)).

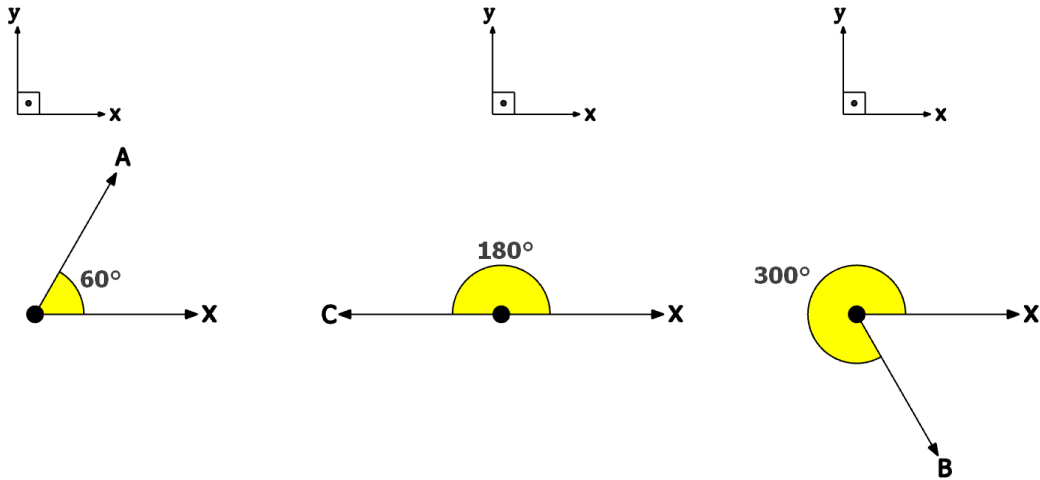
$$r_p = \sqrt{\left(\frac{d_{maf}}{2}\right)^2 + d_p^2} \quad (3.3)$$

Her mafsal noktasının (P_i) koordinatını hesaplamak için her noktanın konumu platform merkezine göre vektörel olarak hesaplanır. Bu vektörün yaptığı açının bilinmesi gerekir (ε_i). Bunun için öncelikle bilinen en temel şey; mafsal çiftlerinin platform merkezine göre olan açıları 120° 'lik dilimlerden oluşmasıdır (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Hareketli platformun A, B ve C köşeleri

Köşe açılarının 0° açıdaki konuma göre açıları ise 60° başlangıç açısından başlayarak 120° fark ile açı değiştirilerek köşe referans açıları bulunur. Platformun köşeleri sembolik olarak A, B ve C köşeleri olarak adlandırılabilir. Bu köşelerin açıları sırası ile 60° , 180° , 300°). Bu durum Şekil 3.5. ile gösterilmiştir.



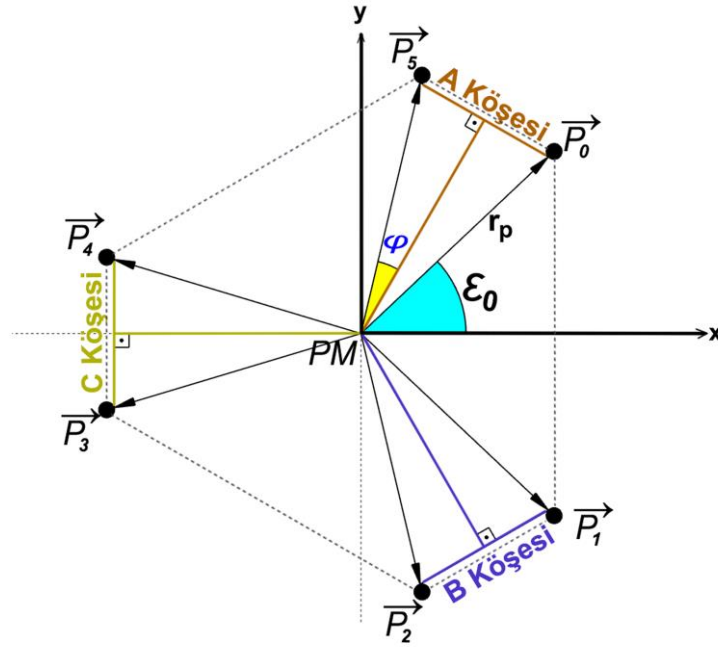
Şekil 3.5. Hareketli platformun A, B ve C köşelerinin açısal konumları

Platformun tasarımında mafsal noktalarının normal duruş pozisyonuna göre global eksen takımındaki konumları Şekil 3.2. ile gösterilmiştir. A, B ve C köşelerinin her biri kendi tarafında bulunan bağlantı noktaları için platform merkezine göre φ kadar sapma açısına

sahiptir. Bu açının hesaplanması için ise Şekil 3.3.'te gösterilen dik kenarların oranının tanjantı kullanılabilir. Denklem (3.4) ile gösterilmiştir.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{(d_{maf})}{2.d_p} \right) \quad (3.4)$$

Platform üzerindeki her mafsal noktası için ayrı ayrı konum vektörleri çizilerek noktasal olarak konum hesaplamaları yapılır (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Hareketli platform üzerinde bulunan mafsal bağlantı noktalarının konum vektörleri

Sistemin eksen takımında x eksenine göre yaptığı açı hesaplanır. Bunun için köşe referans açılarına göre $\pm\varphi$ konumuna P_i noktaları konumlandırılır. Bu açılar 6×1 boyutlu ε matrisini elde etmemizi sağlar (Eşitlik (3.5)).

$$\varepsilon_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} 60 - \varphi \\ 300 + \varphi \\ 300 - \varphi \\ 180 + \varphi \\ 180 - \varphi \\ 60 + \varphi \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (3.5)$$

P_i noktasını z ekseninden bağımsız iki boyutlu düzlemde düşünerek ($z = 0$) sadece x ve y eksenini için tanımlayan normal duruşa göre (Açısal ve doğrusal tüm istenen parametreler 0 kabul edilir.) konum vektörü denklem (3.6) ile gösterilmiştir.

$$\vec{P}_i = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \quad (3.6)$$

$$\vec{P}_i = (r_p \cdot \cos(\varepsilon_i))\hat{i} + (r_p \cdot \sin(\varepsilon_i))\hat{j} + (0)\hat{k} \quad (3.7)$$

$$\vec{P}_i = (r_p \cdot \cos(\varepsilon_i))\hat{i} + (r_p \cdot \sin(\varepsilon_i))\hat{j} \quad (3.8)$$

Platformun açısal hareketleri x eksenine göre dönme, y eksenine göre yunuslama ve z eksenine göre ise yalpalama olarak adlandırılır. Bu eksenlerdeki açısal hareketler derece türünden sırası ile α, β, θ sembolleri ile ifade edilmiştir. (3.6) ile gösterilen platforma etki uygulanmamış α, β, θ açılarının etkisi gösterilmemiştir. Açısal hareket hangi ekseninde yapılıyor ise diğer eksenlerdeki konumlandırmalar bundan etkilenmektedir. Bu açıların etkisi uygulandığında vektör (3.10) ile gösterildiği gibi bir hal alır. Platforma burada yalnızca açısal hesaplamaların etkisi gösterilmiştir.

$$\vec{P}_i = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \quad (3.9)$$

olur. Bu durumda;

$$\begin{aligned} \vec{P}_i &= (r_p \cdot \cos(\varepsilon_i + \theta) \cdot \cos(\beta))\hat{i} \\ &+ (r_p \cdot \sin(\varepsilon_i + \theta) \cdot \cos(\alpha))\hat{j} \\ &+ (r_p \cdot \sin(\varepsilon_i) \cdot \sin(\alpha) - \cos(\varepsilon_i) \cdot \sin(\beta))\hat{k} \end{aligned} \quad (3.10)$$

elde edilir.

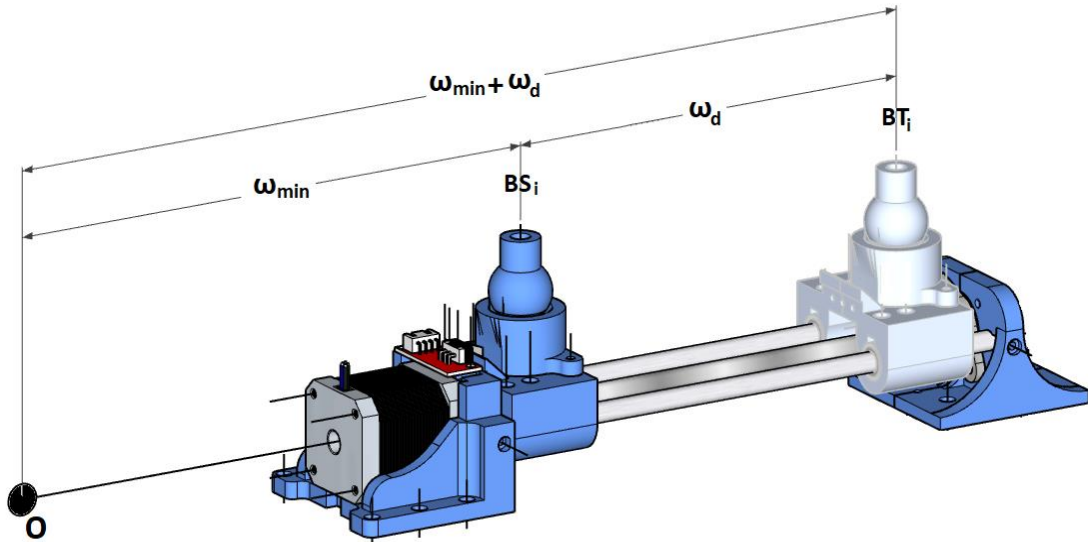
Platforma etki eden sistemdeki doğrusal hareketleri (PD_x, PD_y, PD_z) kinematik hesaplama sürecinde kullanabilmek için platform merkezinden (PM) dışa doğru vektörün parametrelerine göre yönü belirlenecek bir \vec{PD} doğrusal öteleme vektörü oluşturulur

(denklem (3.11)). Doğrusal öteleme vektörü ile platform kinematiğini birlikte hesaplamak için gerekli denklem çıktısı denklem (3.12) ile gösterilmiştir.

$$\overline{PD} = PD_x \hat{i} + PD_y \hat{j} + PD_z \hat{k} \quad (3.11)$$

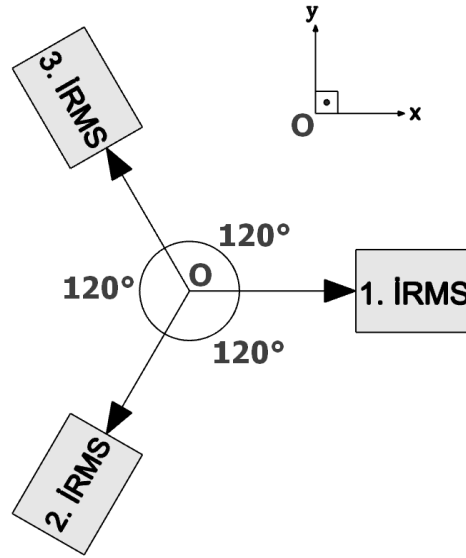
$$\begin{aligned} \vec{P}_i = & \left((r_p \cdot \cos(\varepsilon_i + \theta) \cdot \cos(\beta)) + PD_x \right) \hat{i} \\ & + \left((r_p \cdot \sin(\varepsilon_i + \theta) \cdot \cos(a)) + PD_y \right) \hat{j} \\ & + \left((r_p \cdot \sin(\varepsilon_i) \cdot \sin(a)) - \cos(\varepsilon_i) \cdot \sin(\beta) \right) PD_z \hat{k} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Genel olarak sistem kinematiğinin buradaki en önemli hareket kaynağı olan parça motor sistemleridir. Motor sistemlerinin istenen konuma göre ayarlanması tamamen yazılımsal olarak yapı içerisindeki step motorun dönme miktarına göre hesaplanmaktadır. Motor açıklıkları ve sistemin tekli görünümü Şekil 3.7.'de gösterilmiştir. Sistemin O koordinat sistemi merkezinden ω_{min} kadar uzaklıktaki BS_i noktasından BT_i noktasına kadar ω_d uzunluğunda hareket etme mesafesi bulunmaktadır.



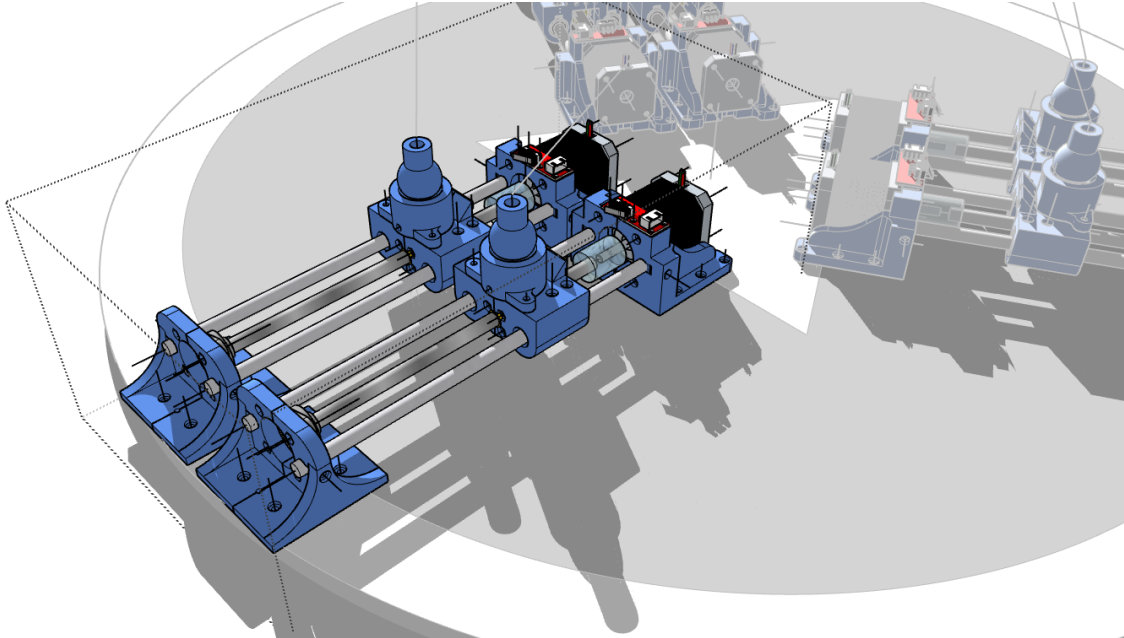
Şekil 3.7. Sistemde kullanılan doğrusal motor sisteminin 3B görünümü ve motor açıklığı

Sistemin kinematik sürecinin en önemli parçası olan doğrusal raylı motor sisteminin yerleşimi de önemlidir. Bu kısımda gerekli motor konumlandırmaları da hareketli platformda olduğu gibi sistem dinamiğine uygun olması açısından 120° aralıklar ile ikili olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.8.). Bu tez çalışmasında motor sistemi yerleşimindeki ikili yapı, İkili Raylı Motor Sistemi (İRMS) olarak tanımlanır.



Şekil 3.8. İkili raylı motor sistemlerinin zemine konumlandırmasının kapalı görünümü

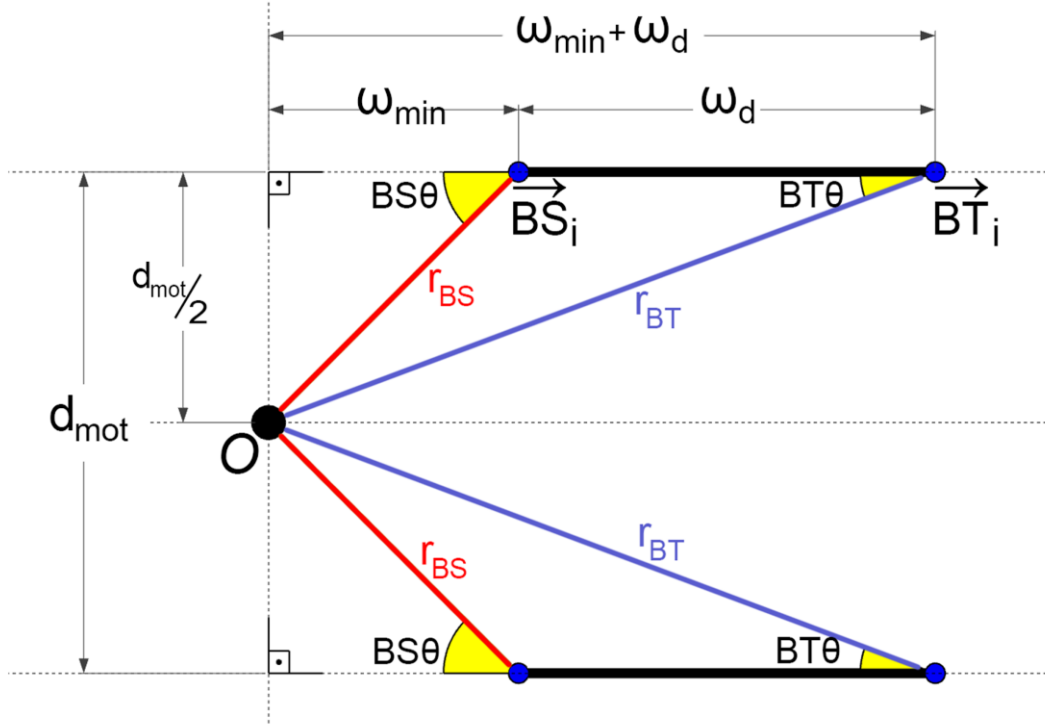
Bu yerleşimi en iyilenmiş şekilde yapabilmek adına MATLAB ortamında gerekli testler gerçekleştirilmiştir. Yerleşik konumlandırma ve İRMS'nin konumu ve açıları buna göre belirlenmiştir (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. İkili raylı motor sistemlerinin zemine konumlandırılmış halinin 3B görünümü

Raylı motor sistemi üzerinde hareketli kısımda mafsallı yuva bulunmaktadır. Bu kısmın sistemdeki yerleşik açılara göre net koordinatlarının bilinmesi için konum vektörleri

tanımlanır (BS_i ve BT_i). Şekil 3.10.'da gösterildiği gibi tüm yapı içerisinde 3 adet İRMS bulunmaktadır. i . motor için gösterilen hesaplamalar altı adet motor sisteminin her biri için ayrı ayrı hesaplanır.



Şekil 3.10. İkili raylı motor sisteminde bulunan vektörler ve geometrik ölçümler

İRMS yapısı içerisinde doğrusal motor sistemleri birbirlerine paralel olarak yerleştirilmiştir. Motorların hareket ettirdikleri mafsalların birbirleri arasındaki uzaklık d_{mot} olarak tanımlanır. Motor yolunun çalışma alanı doğrusal motor başlangıç noktası (BS_i) ve doğrusal motor bitiş noktası (BT_i) arasındadır, ω_d uzunluğundadır. Doğrusal motor sisteminin çalışma mesafesi, prototipi gerçekleştirilen sistemde $\omega_d = 160mm$ olarak belirlenmiştir. Doğrusal motor başlangıç ve bitiş noktalarının O merkezine olan uzaklıkları sırası ile r_{BS} ve r_{BT} olarak tanımlıdır (denklem (3.15) ve denklem (3.16)). Her motorun hareket eksenini farklı bir doğru üzerindedir. Bu doğrunun O merkezine olan dik uzaklığı $d_{mot} / 2$ 'dir. Hareket doğrultusunun başlangıç ve bitiş noktaları O merkezine göre $BS\theta$ ve $BT\theta$ açısına göre konumlandırılmıştır. Bu açıların hesaplanması için dik kenarların tanjantlarının oranı kullanılır (denklem (3.13) ve denklem (3.14)).

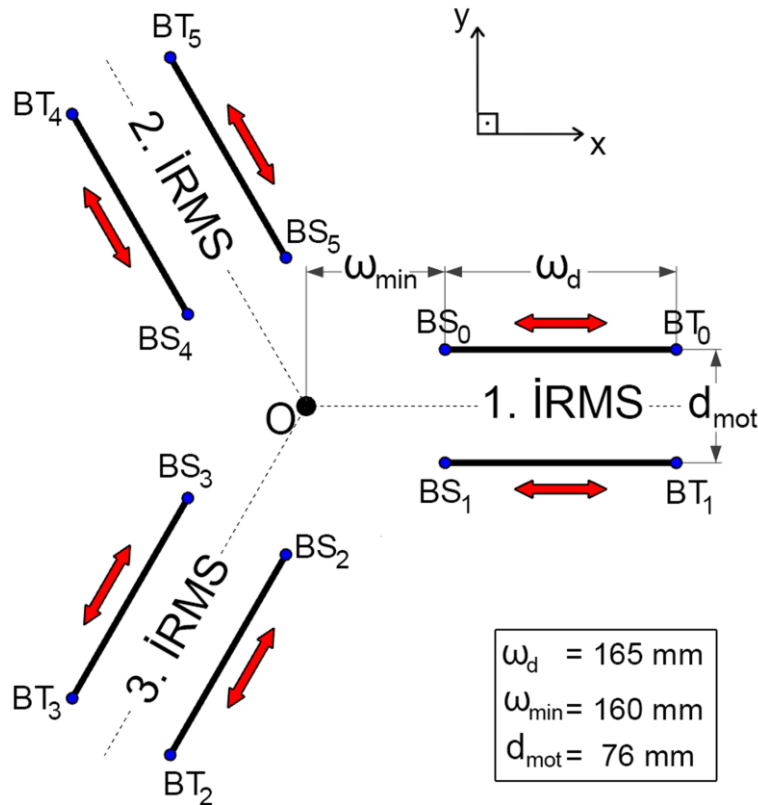
$$BS\theta = \tan\left(\frac{d_{mot}}{2\omega_{min}}\right) \quad (3.13)$$

$$BT\theta = \tan\left(\frac{d_{mot}}{2(\omega_{min} + \omega_d)}\right) \quad (3.14)$$

$$r_{BS} = \sqrt{\left(\frac{d_{mot}}{2}\right)^2 + \omega_{min}^2} \quad (3.15)$$

$$r_{BT} = \sqrt{\left(\frac{d_{mot}}{2}\right)^2 + (\omega_{min} + \omega_d)^2} \quad (3.16)$$

Motorların yerleşimini tanımlamak için merkeze göre Şekil 3.11.'de gösterildiği gibi 120° sapma açısı ile yerleşmektedir.



Şekil 3.11. İkili raylı motor sisteminin yerleşiminin açık gösterimi ve ölçülendirmesi

Motor başlangıç ve bitiş noktalarının i . motor sistemine ait konum vektörü BS_i ve BT_i 'yi oluşturmak gerekir. Öncelikle her motor için sistemin eksen takımına göre duruş açıları 6×1 boyutunda δ matrisi ile tanımlanır (Eşitlik (3.17)).

$$\delta_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 240 \\ 240 \\ 120 \\ 120 \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (3.17)$$

Bu açılar ile (δ_i) motorların buldukları konuma göre yaptıkları sapma açıları ($BS\theta$ ve $BT\theta$) bir ekleme bir çıkma durumuna göre toplanarak net sapma açıları olan $BS\delta_i$ ve $BT\delta_i$ ayrı ayrı hesaplanır. Hesaplama yapılırken her motorun bulunduğu konum indisine göre fark açısı çıkarılır ya da eklenir (Eşitlik (3.18) ve (3.19)).

$$BS\delta_i = \delta_i + BS\theta \cdot (\text{mod}2(i+1) - \text{mod}2(i)) \quad (3.18)$$

$$BT\delta_i = \delta_i + BT\theta \cdot (\text{mod}2(i+1) - \text{mod}2(i)) \quad (3.19)$$

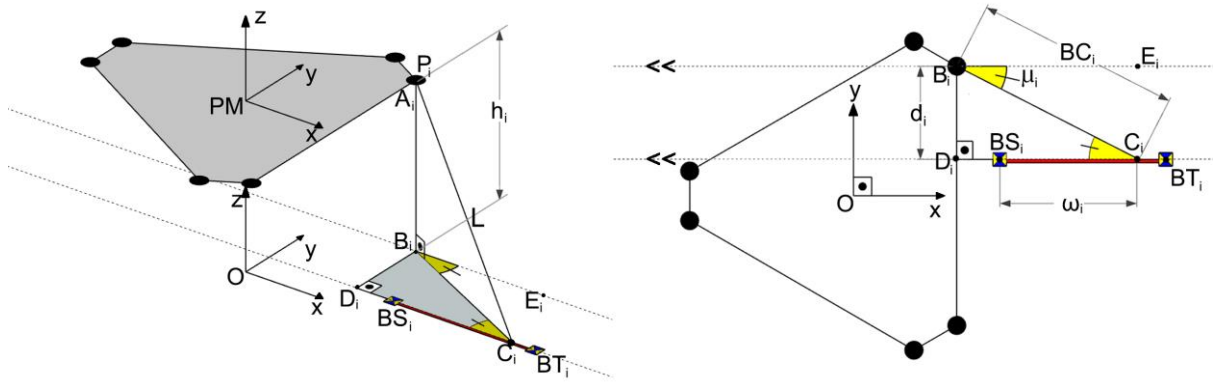
Bu aşamada net sapma açıları \overrightarrow{BS}_i ve \overrightarrow{BT}_i noktalarının konum vektörünü hesaplamak için kullanılır (Denklem (3.20) ve (3.21)).

$$\overrightarrow{BS}_i = r_{BS} \cdot \cos(BS\delta_i)\hat{i} + r_{BS} \cdot \sin(BS\delta_i)\hat{j} + 0 \cdot \hat{k} \quad (3.20)$$

$$\overrightarrow{BT}_i = r_{BT} \cdot \cos(BT\delta_i)\hat{i} + r_{BT} \cdot \sin(BT\delta_i)\hat{j} + 0 \cdot \hat{k} \quad (3.21)$$

Bu aşamaya kadar yapılan tüm hesaplamalar sistemin bağ yapısı dışında kalan kısmı kapsamaktadır. Yapılan uzaysal hareketler ve bu hareketleri sağlamak için gerekli eyleyici parametrelerinin kullanımı bu kısımdan sonra gerçekleştirilecektir. Sistemik olarak gerçekleştirilmiş ve kinematik çalışma sürecini oluşturan yapı platformun sistem kinematiğine göre hareketleri gerçek hayat problemine dönüştürmek için geometrik yöntemlerden faydalanılmıştır. Bağ yapısını oluşturan temel parça L uzunluğundaki bağlantı kollarıdır. Belirli kısıtlar dâhilinde yani çalışma uzayı ve doğrusal motor sisteminin alt ve üst sınırları sistemin çalışmasını doğrudan etkilemektedir. P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 ve P_5 olmak

üzere toplamda 6 adet mafsalın bağlı olduğu hareketli plaka rijit yapıdadır. Aynı şekilde zemine bağlı bulunan doğrusal motor sistemi de sabit zemin ile bütünleşik rijit yapıdadır. Alt ve üst rijit kısımlar arasında L uzunluğundaki kolun üst mafsalı A_i noktasında hareketli platformun P_i noktasına özgün tasarımsal yapıdaki mafsal yardımı ile bağlıdır ($i = 0..5$). Alt ucu ise doğrusal motor sisteminin ω_i açılığındaki konumunda bulunan C_i noktasındaki hareketli mafsal yatağına bağlıdır (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Ters kinematik hesaplamada geometrik çözümleme yöntemi için platformda bulunan üçgenler

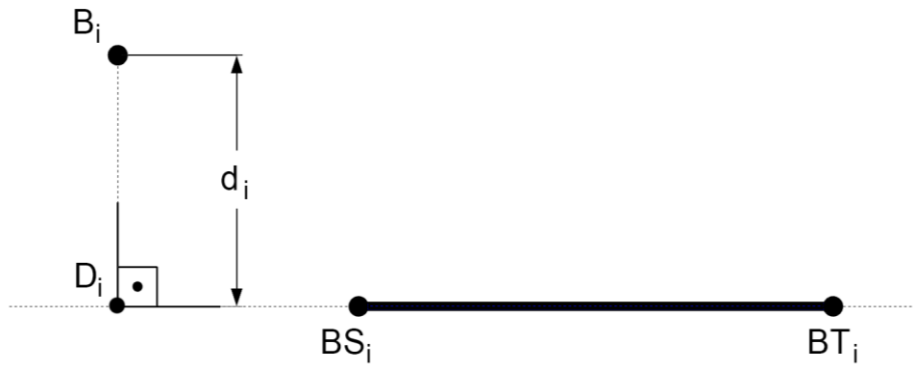
Şekil 3.12. incelendiğinde görülüyor ki sistemin geometrik çözümlemesi için her bacağı ait $A_iB_iC_i$ ve $B_iC_iD_i$ üçgenleri bulunmaktadır. Bu üçgenler çözüm kümesine dâhil edilir. Ters kinematik hesaplama sürecini tamamlanmasını sağlar. A_i noktasının konumu P_i ile aynıdır ($A_i=P_i$). B_i noktası A_i noktasının düşey düzlemdeki izdüşümüdür (x ve y koordinatları aynı) ve O koordinat sistemine göre z ekseninde 0 konumundadır. $A_iB_iC_i$ üçgenin dik kenarlarından biri $|A_iB_i|$ uzaklığı olan h_i , diğer dik $|B_iC_i|$ kenarı uzunluğu ise BC_i olarak ifade edilir (denklem (3.22)). L uzunluğundaki çubuk, prototipi gerçekleştirilen sistemde $300mm$ olarak gerçeğe uyarlanmıştır. $|B_iE_i|$ ve $|D_iC_i|$ kenarları birbirine paraleldir ($|B_iE_i| // |D_iC_i|$).

$$BC_i = L \cdot \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{h_i}{L} \right) \right) \quad (3.22)$$

$|B_iD_i|$ kenarı uzunluğu d_i olarak tanımlanır. Geometrik yaklaşıma göre yapılan çözümleme sürecinde μ_i açısını hesaplamak için d_i kenarının uzunluğunun, BC_i uzunluğuna oranının inversinin kosinüsü alınarak hesaplanır (denklem (3.23)).

$$\mu_i = \cos^{-1} \left(\frac{d_i}{BC_i} \right) \quad (3.23)$$

d_i uzunluğu D_i noktasının koordinatları bilinmediği için doğrudan bilinmemektedir. Şekil 3.12. incelendiğinde doğrusal motor yolunun başlangıç ve bitiş noktalarından geçen bir doğruya B_i noktasından dik şekilde gelen doğrunun kesişim noktasının D_i olduğu görülmektedir. Burada da görüldüğü gibi 0 yüksekliğinde gerçekleşen durumlar için iki boyutlu düzlemde hesaplamalar yapılabilir. Bu durum Şekil 3.13. ile daha net ifade edilmiştir.



Şekil 3.13. B_i noktasının doğrusal motor sisteminin hareket eksenine dik uzaklığının gösterimi

Bu aşamada bilinmelidirki $\overline{BS_i}$ ve $\overline{BT_i}$ noktalarından geçen doğrunun denklemi bulunur ve B_i noktasının bu doğruya olan uzaklığı d_i uzunluğunu verir. İki noktası bilinen doğrunun denklemini çıkarmak gerekir. Doğrunun denklemi en bilinen formu ile $ax + by + c = 0$ 'dır. Bu denklemde x, y eksenlerinin a, b çarpanları ve c sabiti bulunur. $\overline{BS_i}$ ve $\overline{BT_i}$ konum vektörlerinin noktalarından geçen doğrunun denklemi (3.24) ile gösterilmiştir.

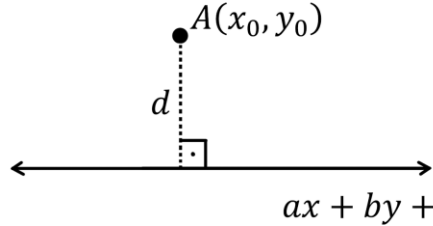
$$\frac{BT_i\hat{j} - BS_i\hat{j}}{BT_i\hat{i} - BS_i\hat{i}} = \frac{y - BT_i\hat{j}}{x - BT_i\hat{i}} \quad (3.24)$$

Denklemden;

$$x(BT_i\hat{j} - BS_i\hat{j}) - y(BT_i\hat{i} - BS_i\hat{i}) + (BT_i\hat{i}.BS_i\hat{j} - BS_i\hat{i}.BT_i\hat{j}) = 0 \quad (3.25)$$

elde edilir.

Doğrunun denklemi çıkarıldığına göre B_i noktasının bu doğruya olan dik uzaklığı hesaplanabilir. Düzlemde koordinatları bilinen bir noktanın bir doğruya olan uzaklığı Şekil 3.14. ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Burada d nokta ile doğrunun arasındaki dik uzaklığı, A ise noktanın konumunu vermektedir.



$$d = \frac{|ax_0 + by_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

Şekil 3.14. Noktanın doğruya olan uzaklığının genel gösterimi ve formülü

Bu kuraldaki denkleme göre sistemimizdeki parametrelerin uyarlanması ile denklem (3.26) elde edilmektedir. Bu şekilde d_i uzunluğu hesaplanmış olur.

$$d_i = \frac{|B_i \hat{i} \cdot (BT_i \hat{j} - BS_i \hat{j}) + B_i \hat{j} \cdot (BS_i \hat{i} - BT_i \hat{i}) + (BT_i \hat{i} \cdot BS_i \hat{j} - BS_i \hat{i} \cdot BT_i \hat{j})|}{\sqrt{(BT_i \hat{j} - BS_i \hat{j})^2 + (BS_i \hat{i} - BT_i \hat{i})^2}} \quad (3.26)$$

Geometrik yaklaşıma göre hesaplanan μ_i açısı her motor için sistemin eksen takımına göre dikey düzlemde açısına (δ_i) göre modüler olarak toplanır ve B_i noktasına göre O merkezli eksen takımındaki yapılan net σ_i açısı hesaplanmış olur (Denklem (3.27)). Bu açı $B_i C_i D_i$ üçgeni için C_i köşesinin açısını ifade eder.

$$\sigma_i = \delta_i + (90 - \mu_i) \cdot (\text{mod}2(i) - \text{mod}2(i + 1)) \quad (3.27)$$

Bu durumda C_i noktası için tanımlı konum vektörü:

$$C_i = (B_i \hat{i} + BC_i \cdot \cos(\sigma_i)) \hat{l} + (B_i \hat{j} + BC_i \cdot \sin(\sigma_i)) \hat{j} + 0 \cdot \hat{k} \quad (3.28)$$

olur.

Paralel mekanizmaların çalışma süreci de diğer tüm sistemlerde olduğu gibi belirli kısıtlar dâhilinde gerçekleşir. Bunlardan birincisi çalışma uzayıdır. Çalışma uzayını belirleyen en önemli faktör sistemin mekanik tasarımı ve bu tasarımın rijit yapılarının kinematığıdır.

Sistemin tüm çalışması belirli bir çalışma uzayı içerisinde gerçekleşmektedir. Bu gibi sistemlerde doğru sonuçlar alabilmek için çalışması mümkün olmayan durumlar tespit edilerek çalışma iş akışından dışarıda tutulması sağlanır. Hatalı durumun veya çalışma uzayının tanımlanabilmesi için doğrusal motor sistemi üzerindeki C_i nokta konumunun motorun çalışma sınırları içerisinde durmasına dikkat edilir. Bunun için eşitlik (3.29) 'un sağlanması gerekir. Bu koşulun sağlanmadığı durumlarda hiçbir hesaplama gerçek hayat uygulamasında mümkün olmayacaktır çünkü motorun başlangıç ve bitiş sınırları bulunmaktadır. Bu sınırlar dahilinde olmayan tüm durumlar hatalı alanlardır. Motorların doğru kısıtlar ile hareket sağlayabilmesi ve hareketli platforma hesaplanan gerçek hareketleri uygulayabilmesi için bu denetim olmazsa olmazdır.

$$r_{BS} \leq \sqrt{C_i \hat{t}^2 + C_i \hat{j}^2} \leq r_{BT} \quad (3.29)$$

Sistem çalışma sürecinde (3.29) koşulunu sağladığı sürece ω_i değeri hesaplanarak doğrusal motor sisteminin konumlandırılması yapılır. ω_i değeri motorun mm ölçü birimine göre açıklığını ifade etmektedir. Doğrusal motor sistemi başlangıcı (BS_i) ile C_i noktası arasındaki mesafe ile ifade edilir (denklem (3.30)).

$$\omega_i = \sqrt{(BS_i \hat{t} - C_i \hat{t})^2 + (BS_i \hat{j} - C_i \hat{j})^2} \quad (3.30)$$

Eğer C_i uzunluğu r_{BS} uzunluğundan büyük ise ($\sqrt{C_i \hat{t}^2 + C_i \hat{j}^2} < r_{BS}$) ω_i uzunluğunun hesaplanmış değeri -1 ile çarpılır. Bu durum sistemde tekilliğin önlenmesi için gereklidir. Gözarde edilebilir fakat doğrusal motorun açıklık parametresinin doğru sınırlar dâhilinde gerçekleşmesi için bu durum ile doğruluk sağlaması yapılır.

3.2.2. Düz kinematik hesaplama

Robotik sistemlerde düz kinematik bağlantılar arasındaki eklemler ile uç noktada bulunan sistem parçası arasındaki konumu ve hareketleri sistemin temel yapısına göre hesaplamaktadır. Stewart platformlarında ise manipülatörlerin düz kinematiği hesaplanırken iki metot kullanılır. Bunlar: sayısal ve analitik çözümdür [64].

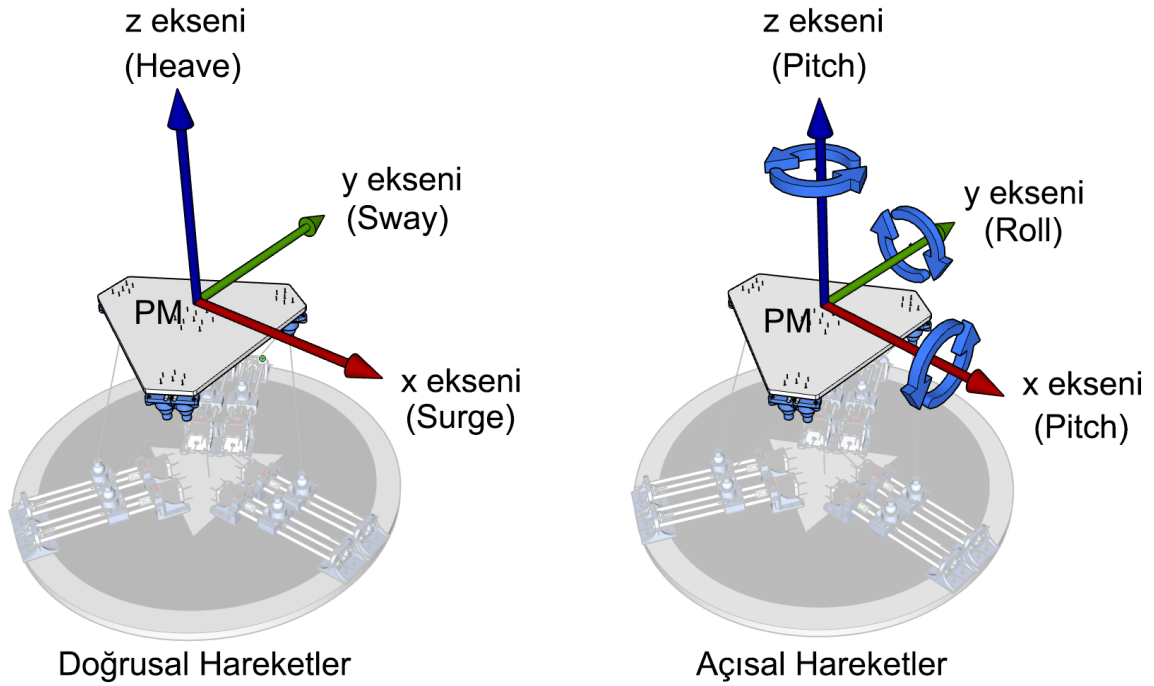
3.2.2.1. Düz kinematikte analitik yöntem

Bir konuda hesaplamalar yapılırken, elde edilmiş ve kabul görmüş verilerle kesin sonuçlara ulaşmak için analitik metottan faydalanılır. Genellikle analitik metot “polinom metodu” olarak bilinen zor bir algoritma ile hesaplanmaktadır. Bu nedenle senkron yani aynı zamanda gerçekleşen kontroller için oldukça yavaş çalışmalarından dolayı fazla tercih edilmemektedir. Platform tasarımlarında aynı uzunluktaki bağlantı kolları hareketli platform için 8 olası konum oluşturur. Yörünge takiplerinde doğru konuma ulaşmak için elde edilen olası konumları göz ardı etmek gerekir. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda hesaplamaların düz kinematik ile yapılması, sistemdeki hesaplamaları daha çok zorlaştırır.

3.3. Sistemdeki Doğrusal ve Açısal Hareketler

Paralel mekanizmalardan istenen özelliklerden biri de çalışma uzayı içerisinde doğrusal veya açısal hareketlerin sağlanmasıdır. Doğrusal hareket genel olarak global eksen takımı üzerinde tanımlı x , y ve z ekselerindeki açısal değişimin olmadığı öteleme hareketlerini temsil etmektedir. Bu eksenlere göre yapılan dönme hareketleri ise açısal hareket olarak bilinmektedir. Bu hareketlerin yalnızca bir eksene bağlı olma şartı yoktur fakat yapılan hareketi tanımlayabilmek için global eksen takımına göre yapılan hareketler ile ifadeler kullanılır.

Literatürde doğrusal hareket için x , y ve z eksenlerinde gerçekleşen öteleme hareketlerinin isimleri sırası ile Surge, Heave ve Sway olarak yer alır. Açısal hareketlerde ise x , y ve z eksenleri için sırası ile Pitch, Roll ve Yaw ifadeleri ile bilinir. Prototipi gerçekleştirilen sistemdeki açısal ve doğrusal hareketler PM eksen takımına göre Şekil 3.15. ile gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Hareketli platformun çalışma uzayında gerçekleştirdiği açısal ve doğrusal hareketler

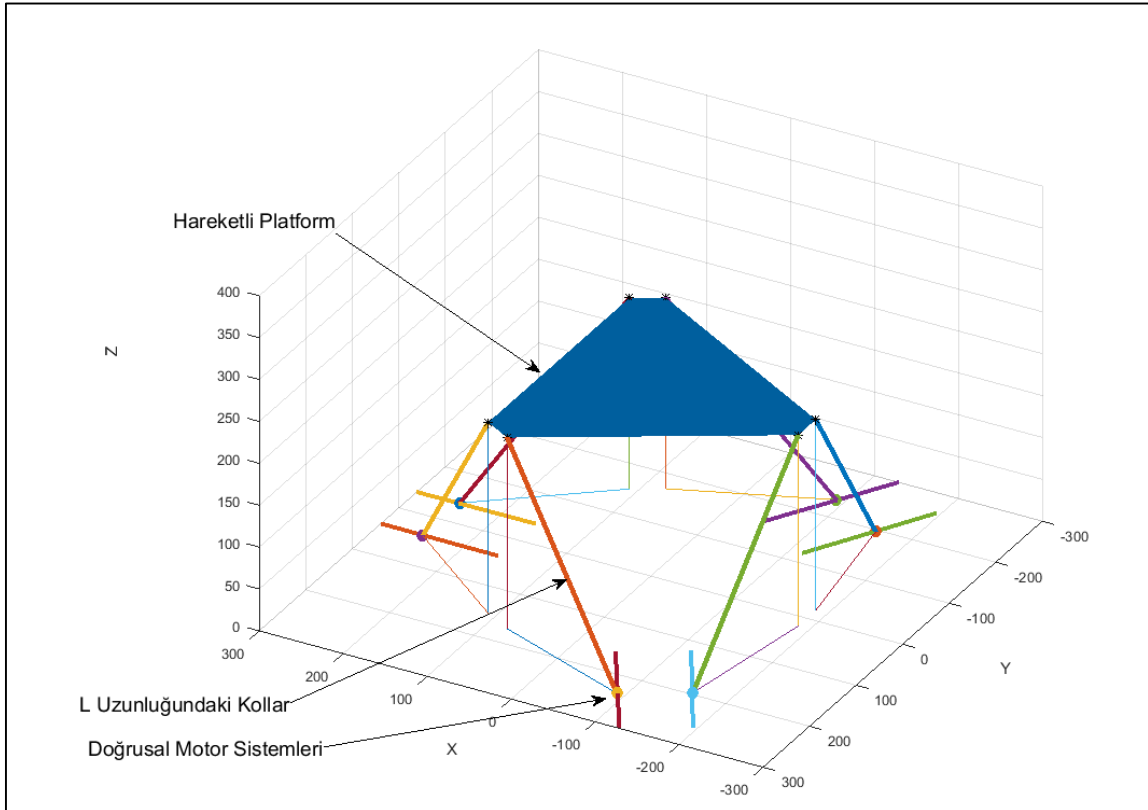
PM eksen takımına göre yapılan hareketlerin alt ve üst limitleri Çizelge 3.3. ile gösterilmiştir. Bu bilgiler çalışma uzayını net bir şekilde belirtmemektedir. Çalışma uzayı içerisindeki hareket alanı nokta bulutları ile daha net incelenebilir.

Çizelge 3.3. Hareketli platform ile yapılan açısal ve doğrusal hareketlere ait kısıtlar

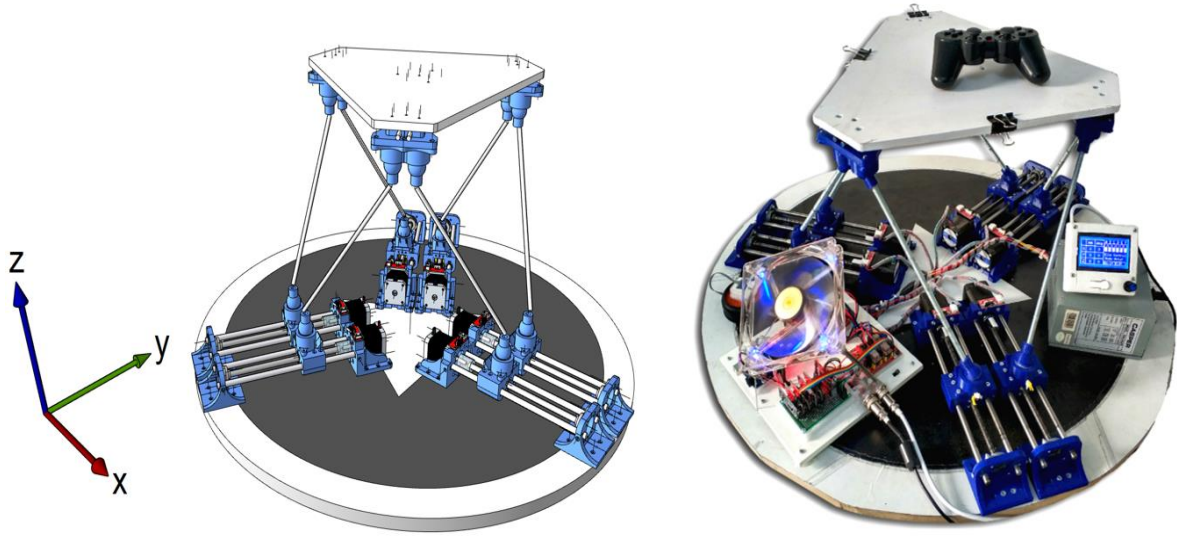
Hareket Tipi	Eksen	Hareket Adı	Simge	Alt Limit	Üst Limit
Açısal Hareket	x	Pitch	α	-11°	11°
	y	Roll	β	-17°	11°
	z	Yaw	θ	-20°	20°
Doğrusal Hareket	x	Surge	PD_x	$-77mm$	$57mm$
	y	Sway	PD_y	$-60mm$	$60mm$
	z	Heave	PD_z	$-68mm$	$34mm$

4. SİSTEMİN MEKANİK TASARIMININ MODELLENMESİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Tez çalışmasındaki sistem modeli oluşturulurken öncelikle Matlab ile sistem kinematiğine uygun 3B iskelet model oluşturulmuştur. İskelet model Şekil 4.1. ile gösterilmiştir. Oluşturulan 3B iskelet modelden faydalanarak SketchUp 2018 Pro yazılımından faydalanarak gerçek hayata göre 3B mekanik model tasarımı yapılmıştır. Oluşturulan 3B mekanik modellerin tümleşik hali Şekil 4.2. ile gösterildiği gibidir. Yapılan bu çalışmada mekanik bileşenlere ait tüm ölçülendirmeler metrik bir şekilde yapıldıktan sonra 3B yazıcı ile üretimi gerçekleştirilerek denemeler ve son düzeltmeler yapılmıştır. Yapılan tüm tasarım, sistemin iskelet modeline göre belirlenmiş sınırları dâhilinde yapılarak kinematik hesaplamaların gerçek ortamda doğru şekilde çalışması sağlanmıştır.



Şekil 4.1. Matlab ile ters kinematiğe uygun hazırlanan sistemin temel iskelet modeli



Şekil 4.2. Çalışma kapsamında yapılan prototip cihazın 3B ve gerçek görünümü

4.1. Benzetim Yolu İle Sistem Gerekliliklerinin Belirlenmesi

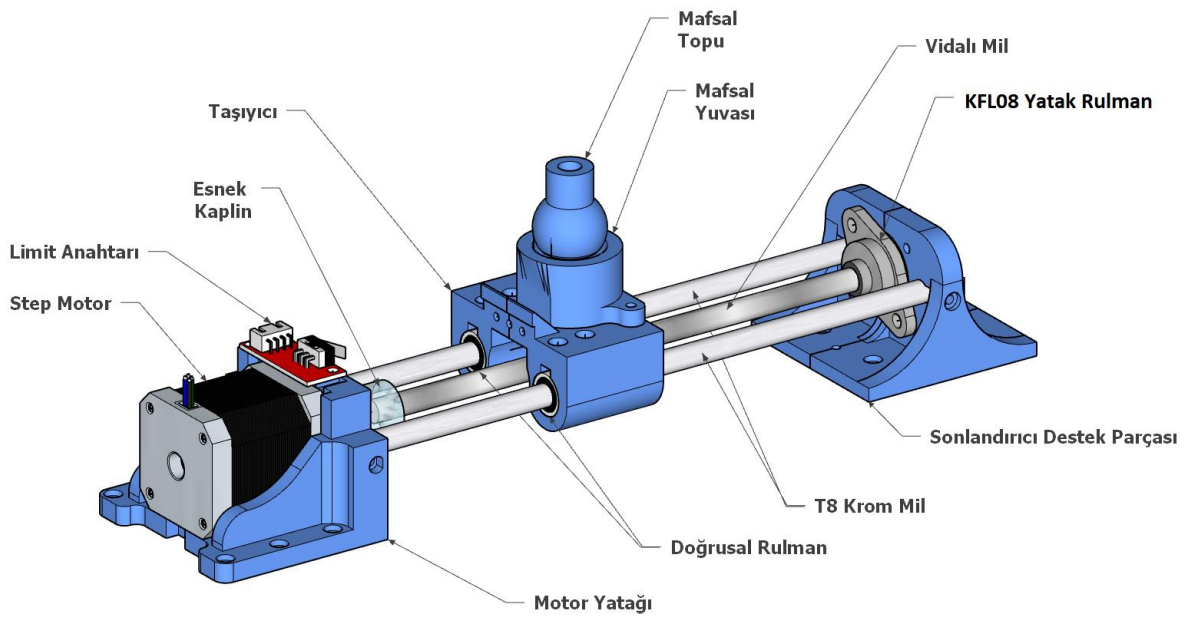
Gerçek hayata uyarlanacak sistemlerde sistem yapılmadan önce gerek hataların tespiti gerek ise gerekliliklerin belirlenmesi için bilgisayar ortamında denemeler yapılır. Bu çalışmada sistemin yapısal gerekliliklerini belirlemek amaçlı öncelikle Matlab ortamında sistemin iskelet yapısı oluşturulmuştur. Bu iskelet yapıda, doğrusal hareket sağlayan motor sistemlerinin bulunduğu düzlemsel yapı ve bu sistemin platforma olan bağ yapılarından faydalanılmıştır. Oluşan iskelet sistemin kinematik performansı gözlemlenmiştir. Gözlem verileri üzerinde yapılacak incelemeler ışığında bir model oluşturulmuştur. Bu model ile yapılan benzetimlerle gerçekleşen tasarım çıktı performansı gerçek ortam şartlarına göre test edilmiştir. Burada yapılan benzetimler modelin ayrıntılarını gerçek hayata aktarırken büyük önem taşır.

Sistem genel olarak iki bölüme ayrılmaktadır. Bu iki bölüm kontrol ve mekanik olacak şekilde tanımlanmaktadır. Sisteme tahrik uygulayan eyleyicilerin mekanik sistemde Matlab programında oluşturulan iskelet yapıda benzetim adımları için mekanik sistem yapısının ürettiği verileri temel alınıp çalışma 3B tasarıma uyarlanmıştır. Bu veriler ışığında mekanik sistemin yapmış olduğu hareketler incelenerek farklı bir benzetim denenmektedir. Yapılan işlem sonuçları neticesinde SketchUp 2018 Pro programında gerçek ölçülendirmeler ile sistem yeniden modellenip gerekli toleranslar ile gerçekleştirilir.

4.2. Doğrusal Motor Sisteminin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

Robotik sistemlerin en önemli kısımları eklemler ve hareket kaynağı olan eyleyici sistemlerdir. Eyleyici sistemlerin yapısı içerisinde genellikle elektrikli motor barındırmaktadır. Tez çalışması kapsamında geliştirilen sistem üzerinde toplamda 6 adet eyleyici bulunmaktadır. Bu eyleyiciler platform mekanizması için kas görevi görmektedir. Eyleyici sistem doğrusal olarak hareket etmektedir. Step motordan aldığı dönme hareketini doğrusal harekete çevirmek için vidalı krom mil kullanılmıştır.

Dairesel hareketin doğrusal öteleme hareketine dönüşümü için birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Bilinen bu yöntemlere krank mekanizması ile doğrusal hareket, triger kayış sistemi ile doğrusal hareket veya kramayer dişli sistemi kullanılarak doğrusal hareketi sağlamak örnek olarak verilebilir. Gerçekleştirilen prototip cihazda esnek kaplin ile motordan alınan dairesel hareket vidalı mile aktarılmaktadır. Mil sonunda bitirici eleman olarak da vidalı milin sonunda KFL08 model yatay yastık rulman kullanılmıştır (Şekil 4.3.).



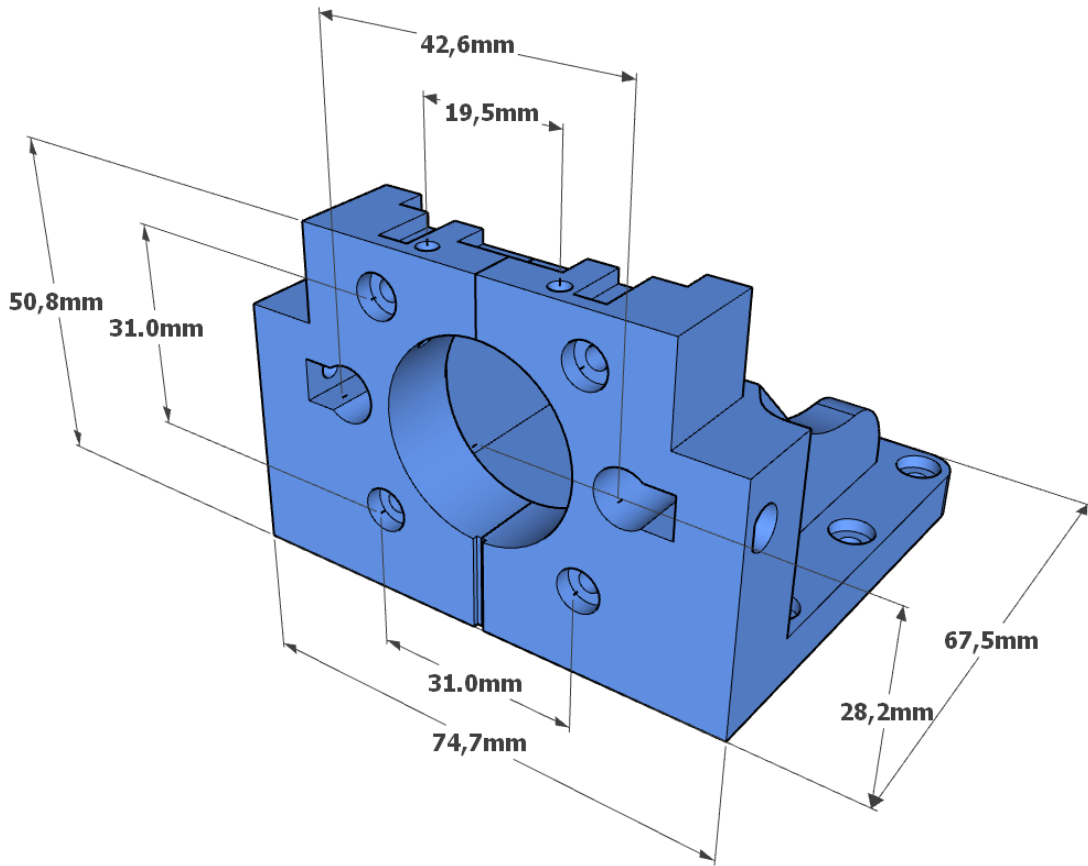
Şekil 4.3. Doğrusal motor sisteminin 3B modeli ve parçaların isimleri

Tasarımsal olarak Şekil 4.3.'te gösterilen doğrusal motor sistemi incelendiğinde, krom mil üzerinde raylı bir şekilde hareket sağlayan bir taşıyıcının bulunduğu görülmektedir. Taşıyıcı motor tarafında bulunan 2mm'lik çıkıntı sayesinde motor yatağına bağlı limit anahtarına basma işlemi ve çalışma sürecinde sıfırlama işleminin yapılması sağlanır. Bu sayede step

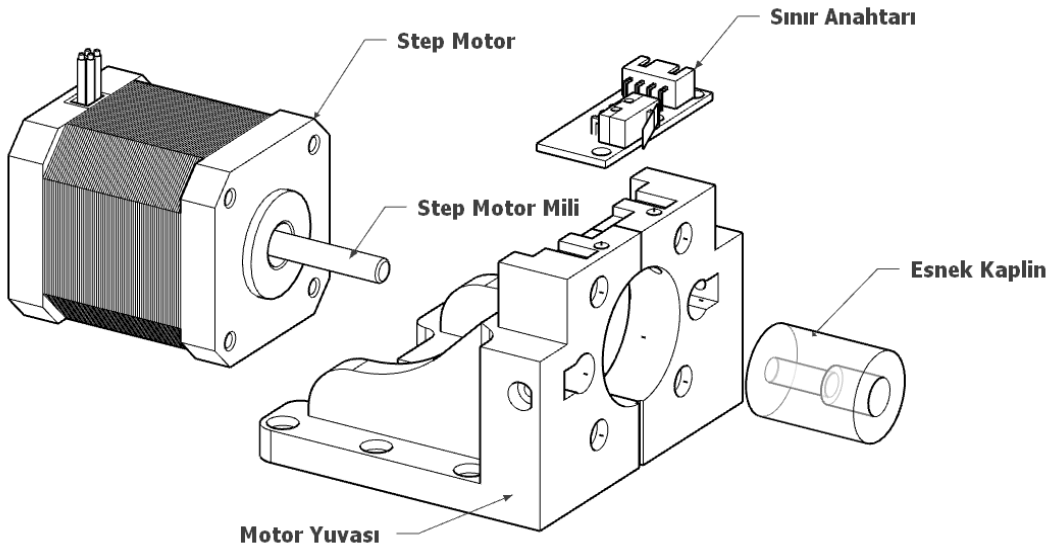
motorların konum kalibrasyonu yapılır. Doğrusal motor sistemi krom mil üzerinde 165mm hareket edebilmektedir. Motor milindeki dönme hareketi esnek kaplin ile vidalı mile, vidalı mil ile de taşıyıcı üzerine sabitlenmiş bakır somuna etki eder. Somun ray üzerinde dönemediği için vidadaki dönme hareketi doğrusal harekete çevrilmiş olur.

Doğrusal motor sistemi yapısında temelde üç kısımdan ve diğer ek vida ve millerden oluşmaktadır. Bunlar başlangıçtaki motor yatağı, sondaki destek parçası ve arada hareketli bulunan taşıyıcı parçadır.

a. Motor yatağı parçası: Bu parça sayesinde doğrusal motor sistemi üzerindeki motorun konumlandırması ve sabitlenmesi sağlanır. Üzerinde limit anahtarı, motor ve krom millerin bağlanması ile bütün bir yapı oluşur. Zemine uygun pozisyonda sabitlenir. Motor yatağı tasarımı ve kaba ölçülendirmeleri Şekil 4.4. ile patlatma tasarımı ise Şekil 4.5. ile gösterilmiştir.

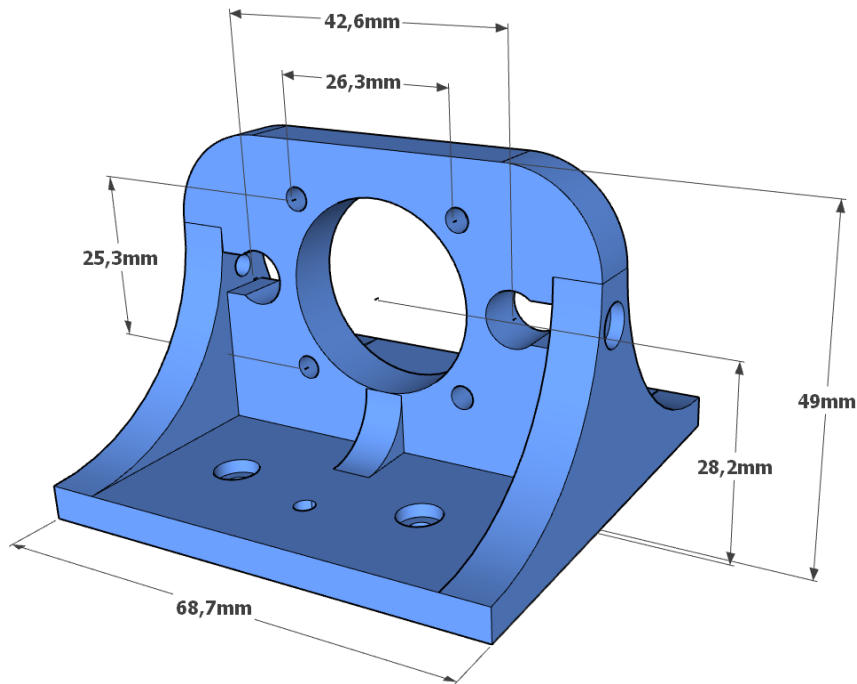


Şekil 4.4. Motor yatağı parçasına ait 3B model ve kaba ölçüleri

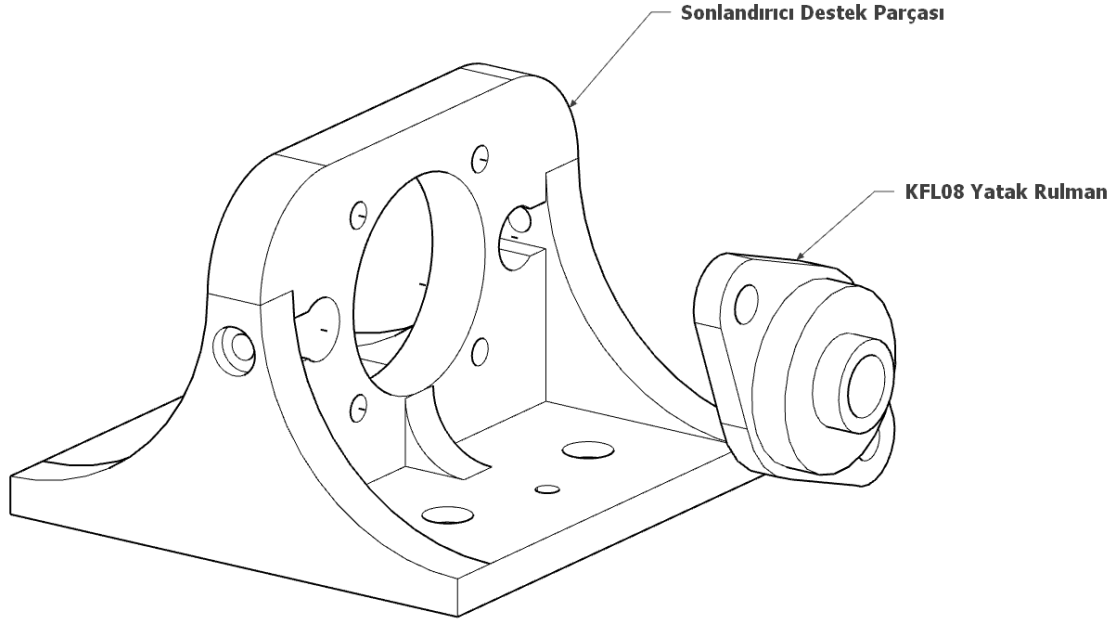


Şekil 4.5. Motor yatağı parçasının diğer parçalar ile patlatılmış montaj görünümü

b. Sonlandırıcı destek parçası: Doğrusal motor sistemi üzerinde ray görevi gören indüksiyonlu krom miller ve KFL08 rulman yatağını motor yatağının karşısında dik olarak uygun pozisyonda zemine sabitlemek için kullanılır. Eksen kaçıklığı gibi durumların yaşanmaması için tasarımda motor yatağı parçası ölçülendirmeleri temel alınmıştır. Sonlandırıcı destek parçasının tasarımı ve kaba ölçülendirmeleri Şekil 4.6. ile, patlatma tasarımı ise Şekil 4.7. ile gösterilmiştir.

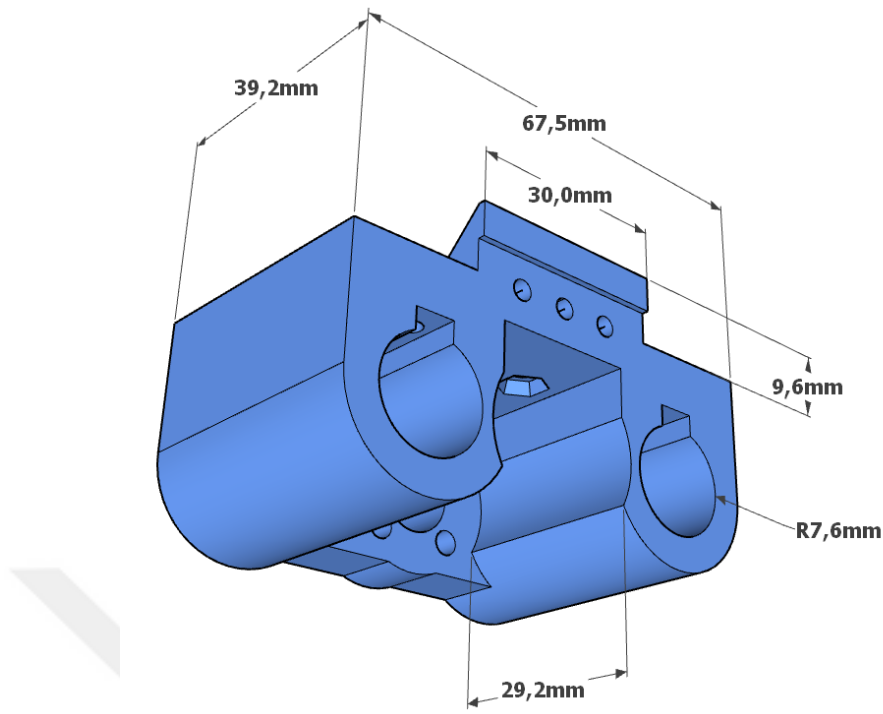


Şekil 4.6. Sonlandırıcı destek parçasına ait 3B model ve kaba ölçüleri

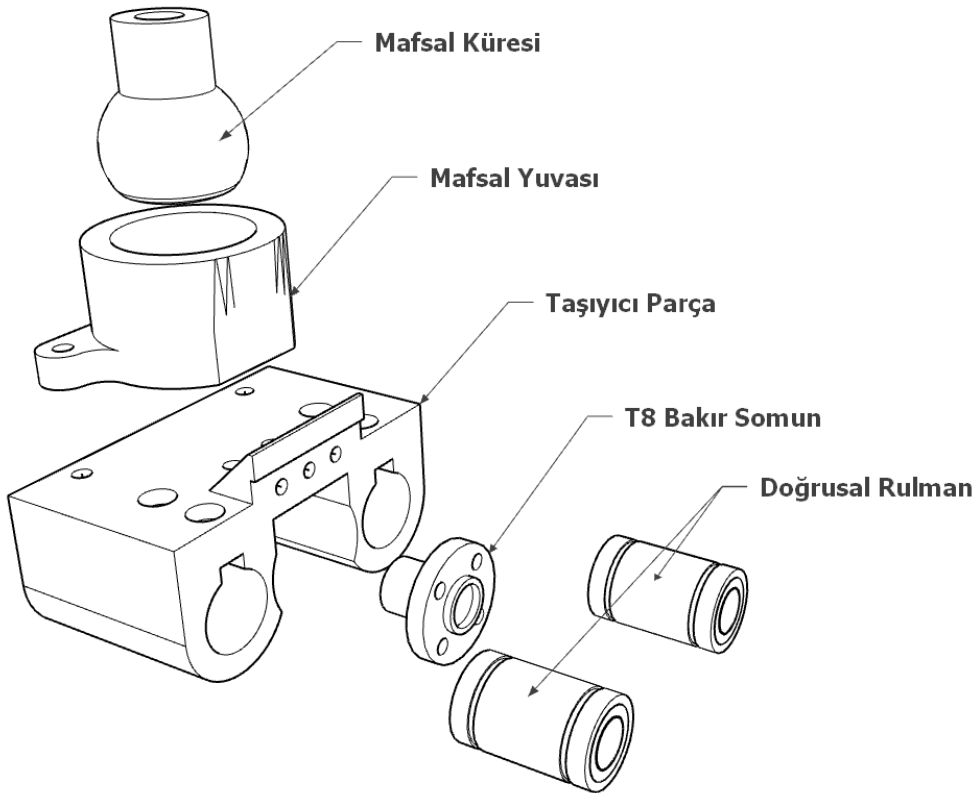


Şekil 4.7. Sonlandırıcı destek parçasının diğer parçalar ile patlatılmış montaj görünümü

c. Taşıyıcı parça: Doğrusal motor sisteminde hareketin diğer uzuvlara aktarımını sağlayan ana parçadır. Üzerindeki 30mm çıkıntı ile motor yuvası üzerinde bulunan limit anahtarına basma görevini yerine getirir. Yapısındaki lineer rulmanlar motor yuvası ile sonlandırıcı destek parçası arasındaki kayganlaştırılmış krom miller üzerinde rahatça öteleme hareketi yapmasını sağlar. Bu ötelemeyi kontrol etmek, konum ayarı yapmak için motor kaynağından esnek kaplin ile vidalı krom mile aktarılan dönme hareketini T8 bakır somun ile tutarak motorun dönme hareketi ile istenilen konuma gidilir. Taşıyıcı üzerine mafsal yuvasının sabitlenmesi ile sistemdeki bağlantı kolları mafsallı yapı ile kullanılarak taşıyıcının konumuna göre platformun istenen hareketleri yapması sağlanır. Yapısal olarak taşıyıcı parçanın kaba ölçülendirmeleri Şekil 4.8. ile patlatma çizimi ise Şekil 4.9. ile gösterilmiştir.



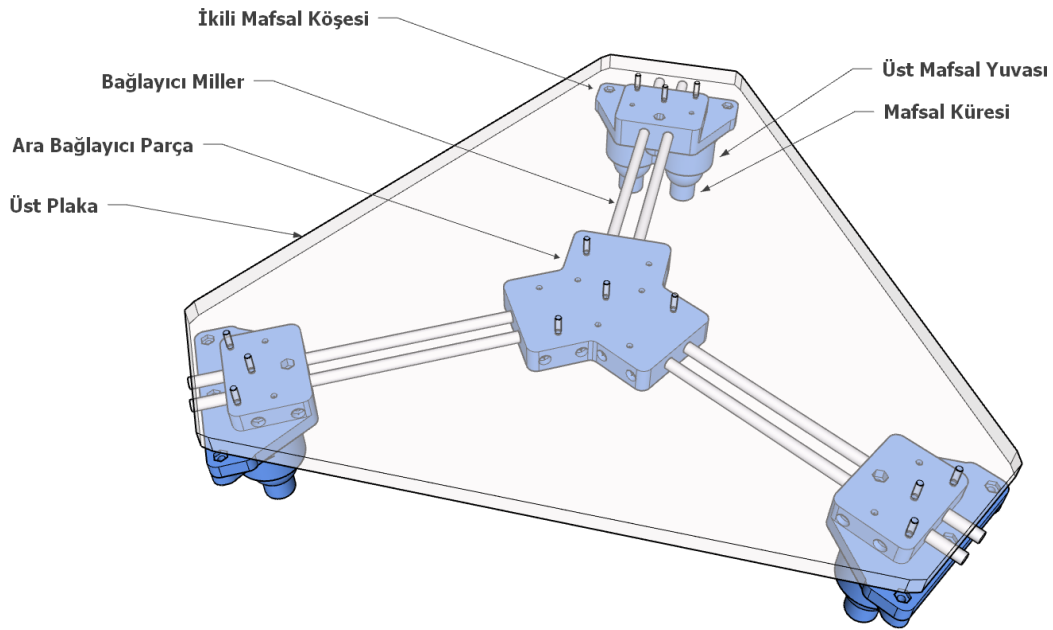
Şekil 4.8. Taşıyıcı parçaya ait 3B model ve kaba ölçüleri



Şekil 4.9. Taşıyıcı parçanın diğer parçalar ile patlatılmış montaj görünümü

4.3. Üst Taşıyıcı Platformun Tasarımı

Tez çalışmasında doğrusal ve açısal hareketlerin gerçekleştiği kısım rijit yapıda bulunan hareketli üst plakadır. Bu plaka, çalışma uzayındaki yapılması istenilen hareketleri yansıtmaktadır. Sistemin tümü aslında bu plakanın eğimi ve dengesi üzerine kuruludur. Yapılan platform Stewart Platform türlerinden 6x3'lük bir modelin örneğidir. Alt plakaya sabit altı adet doğrusal hareket motor düzeneğine bağlı taşıyıcı kollar, üst plakada üç nokta birleşmektedir. Hareketli üst platformun temel elemanları ve kurulu görünümü Şekil 4.10.'da genel olarak gösterilmiştir.

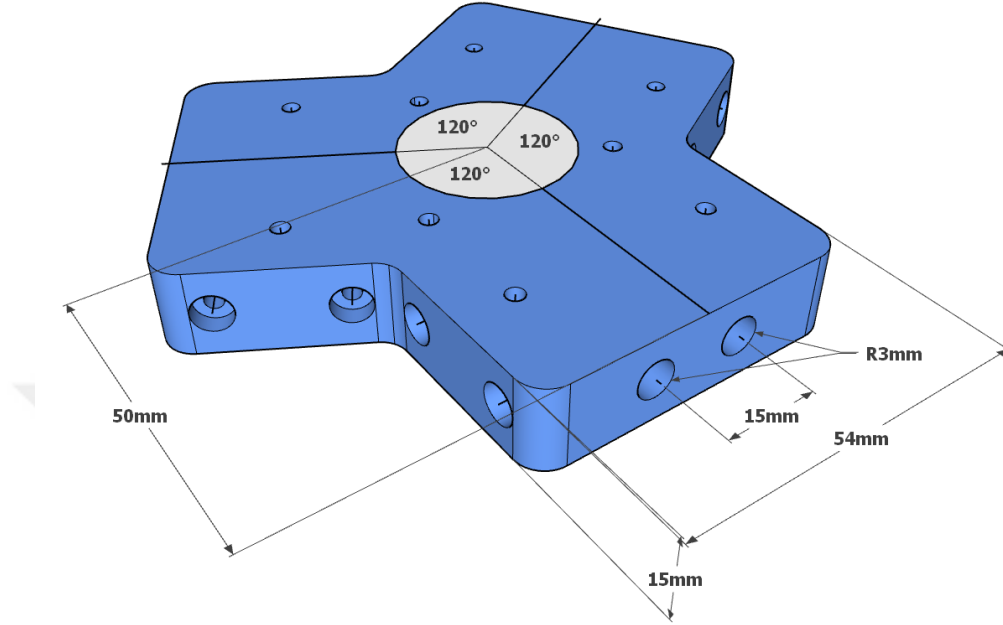


Şekil 4.10. Taşıyıcı platformun 3B modeli ve parçaların isimleri

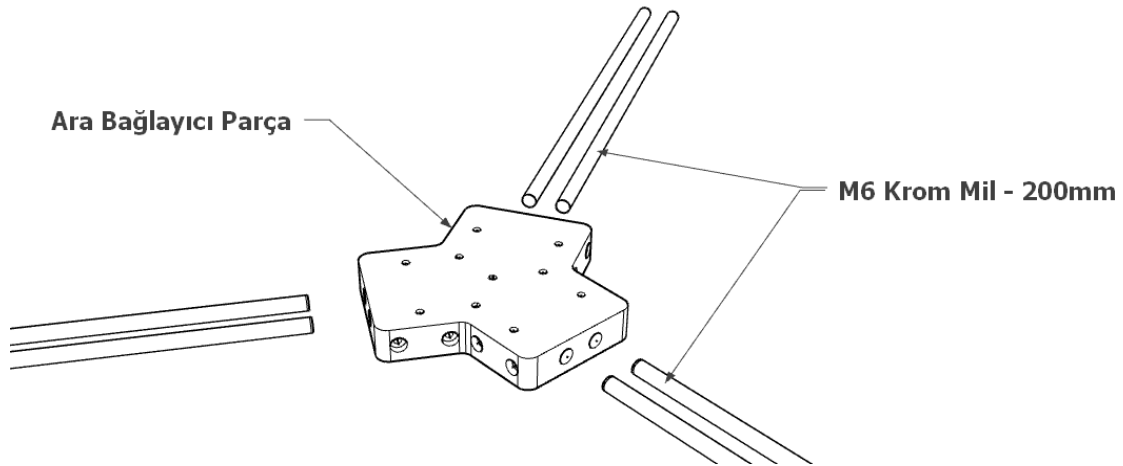
Şekil 4.10. incelendiğinde platformun oluşumunu sağlayan temel iskelet parçalarının üç köşe için birer adet ikili mafsal köşesi, merkez için ara bağlayıcı parça ve bağlayıcı parça ile köşe parçalarının bağlantısı için 6 adet bağlayıcı krom milden oluştuğu görülmektedir. Düzgün rijitlikteki iskeletin üzerinde de 1 cm kalınlığında düz bir üst plaka kullanılmıştır. İkili mafsal köşesi üzerine sabitlemek üzere ikili mafsal yuvası bulunmaktadır.

a. Ara bağlayıcı parça: Üst plakanın merkezinde bulunur. Platformdaki 120 derecelik eşit açıdaki bölümlenmeye göre uygun pozisyonun alınması bu parça sayesinde gerçekleşir. Üzerine 15mm merkez aralıkları ile takılan 6mm çapındaki ikili krom miller ile köşe

parçaları arasındaki bağlantıyı yaparak rijitliği sağlar. Ara bağlayıcı için kaba ölçülendirmeler Şekil 4.11. ile, mil bağlantı kısımları ise Şekil 4.12. ile gösterilmiştir.



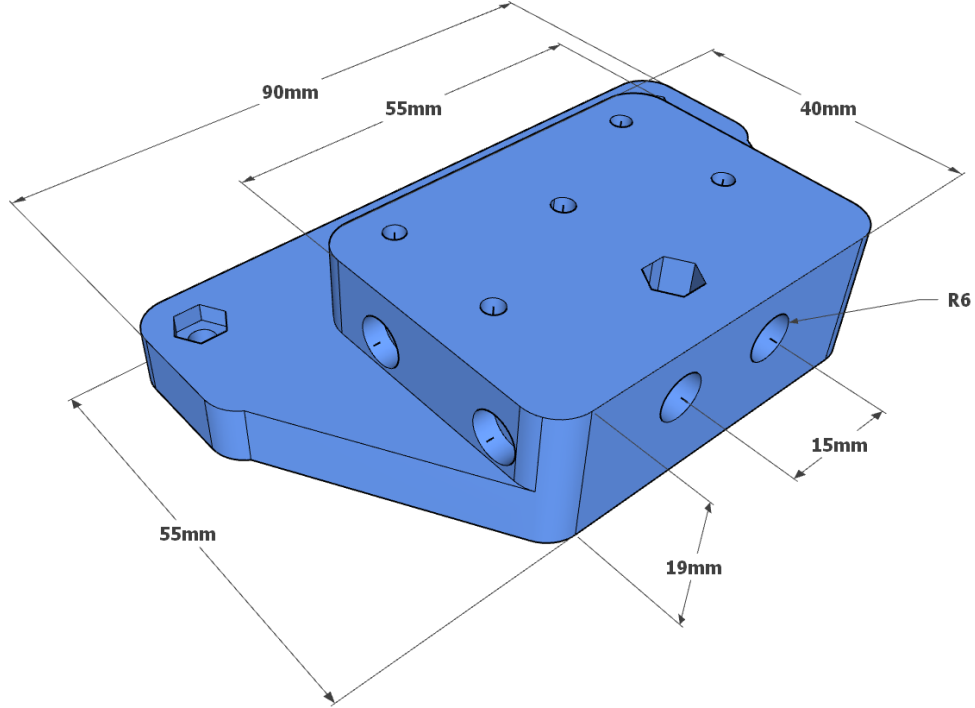
Şekil 4.11. Ara bağlayıcı parçaya ait 3B model ve kaba ölçüleri



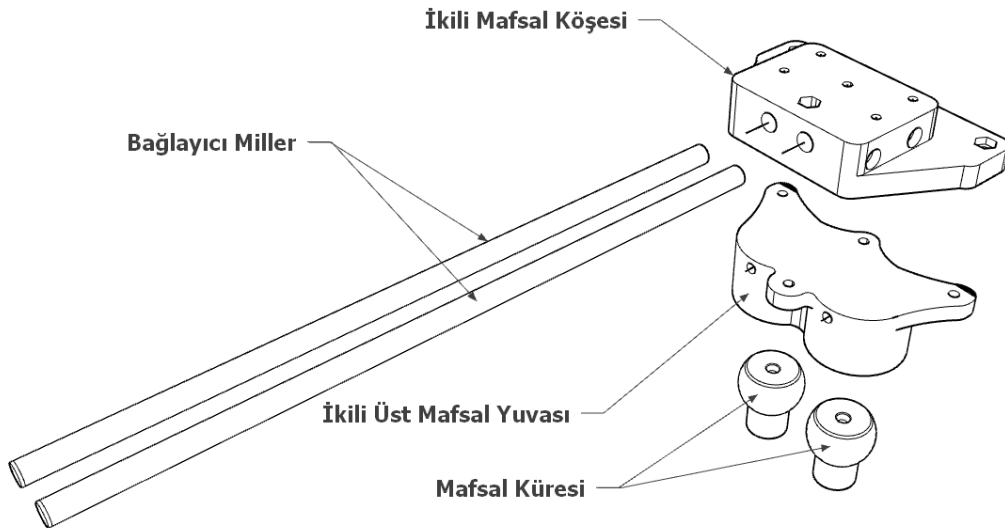
Şekil 4.12. Ara bağlayıcı parçanın diğer parçalar ile patlatılmış montaj görünümü

b. İkili mafsal köşesi: İskeletin genel yapısında üç köşede birer tane ikili mafsal köşesi bulunur. Bağlantı milleri ile merkeze bağlıdır. Platformun mafsal yuvaları buraya bağlanır. Tasarımın özelleştirilebilmesi veya farklı tasarımlara uyarlanabilmesi düşünülerek mafsal düzeneği bu tasarıma ayrı olarak bağlanabilecek yapıda tasarlanmıştır. Bu sayede gerekli test ve ön tasarım sürecinde denemelerin yapılması sağlanmıştır ve ara mafsal tasarımlarında yapılacak tasarımsal güncellemeler platformun iskelet yapısını etkilememektedir. İkili

mafsal köşesi için gerçekleştirilen prototipteki ölçülendirmeler Şekil 4.13. ile gösterilmiştir. Ayrıca diğer yakın parçalar ile arasındaki patlatılmış montaj görünümü de Şekil 4.14. ile gösterildiği gibidir.



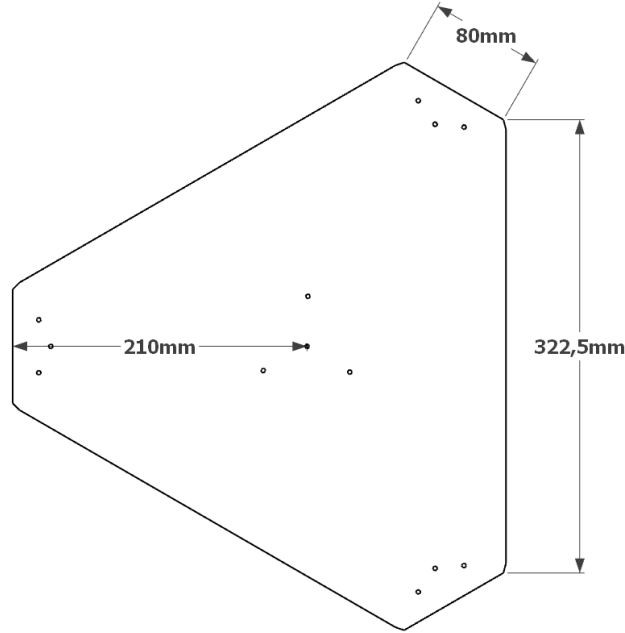
Şekil 4.13. İkili mafsal köşesi parçasına ait 3B model ve kaba ölçüleri



Şekil 4.14. İkili mafsal köşesinin diğer parçalar ile patlatılmış montaj görünümü

c. Üst plaka: Hareketli üst platformun üstüne takılarak rijitliği korur. Aynı zamanda platformun üzerindeki yapılacak çalışmaların uygun düzlükte yapılmasını sağlar. Üst plaka

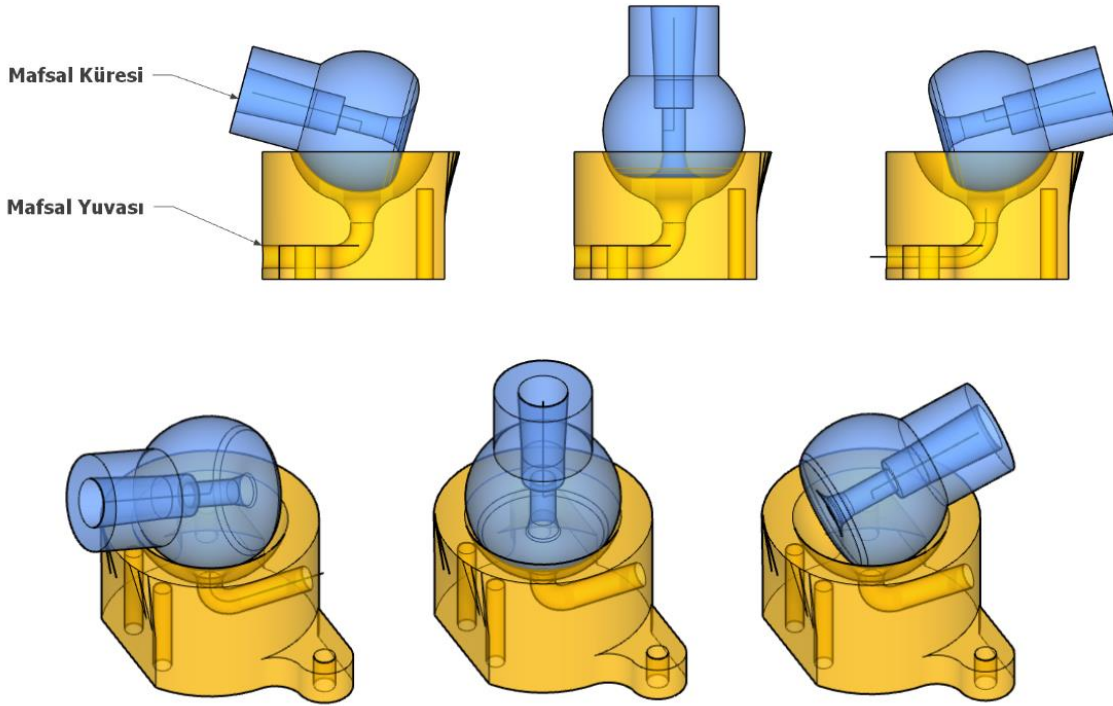
için 10 mm kalınlığında maket kartonu kullanılmıştır. Prototip cihazdaki tasarıma göre gerçekteşirilmiş ölçülemendirmeler Şekil 4.15. ile gösterildiği gibidir.



Şekil 4.15. Hareketli üst plaka ve kaba ölçüleri

4.4. Mafsall ve Bağlayıcı Kol Tasarımı

Mafsall sistemleri, kendi üzerine monte edilmiş parçanın serbest bir şekilde hareket etmesini sağlar. Bu tez çalışmasında hareketli üst platform ile altta bulunan doğrusal motor sistemleri arasında bulunan bağlantı kollarının bağlantısı mafsallar ile gerçekteşir. Bağlantı kollarına bağlı bulunan mafsall küreleri ve bağlanacağı kısımlara ait mafsall yuvaları bulunmaktadır. Hareketli platformun, hareket uzayında serbest ve istikrarlı hareket etmesi için mafsallar önemlidir. Bu tez çalışmasında kullanılan mafsall tasarımı Şekil 4.16. de gösterilmiştir.

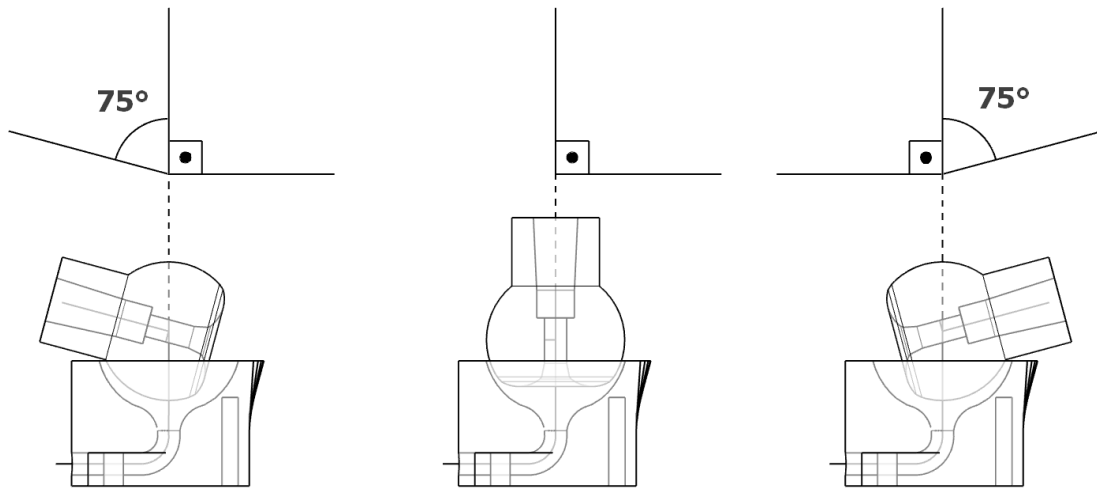


Şekil 4.16. Tez çalışması için tasarlanan ve kullanılan mafsala ait farklı açılardaki 3B görünüm

Sistemde kullanılan taşıyıcı kolları üst ve alt tablaya bağlayan mafsalların her yöne serbest şekilde hareketi klasik yaklaşıma girmektedir. Platformda taşıyıcı kolları sistemde kullanılmadan önce, MATLAB üzerinde yapılan ters kinematik hesaplamalarla kaç mm uzunlukta olacağı hesaplanıp sisteme uyarlanmıştır. Aynı şekilde kullanılacak mafsalların kaç derece açıya kadar eğilmesi gerektiği hesaplanmış ve ona göre mafsal tasarımı yapılmıştır. Sistemde taşıyıcı kolların uzunlukları eşittir. Taşıyıcı kolların ani ivmesel hareketlerinde, serbest ve istenilen yönde hareket eden mafsalların istenilen maksimum eğime ulaşabilmesi gerekmektedir. Yapılan tasarımın ters kinematik hesaplamalarındaki uzaysal hareketleri sağlarken kısıtlılıkla karşılaşmayarak stabil olarak çalışabilmesi gerekmektedir.

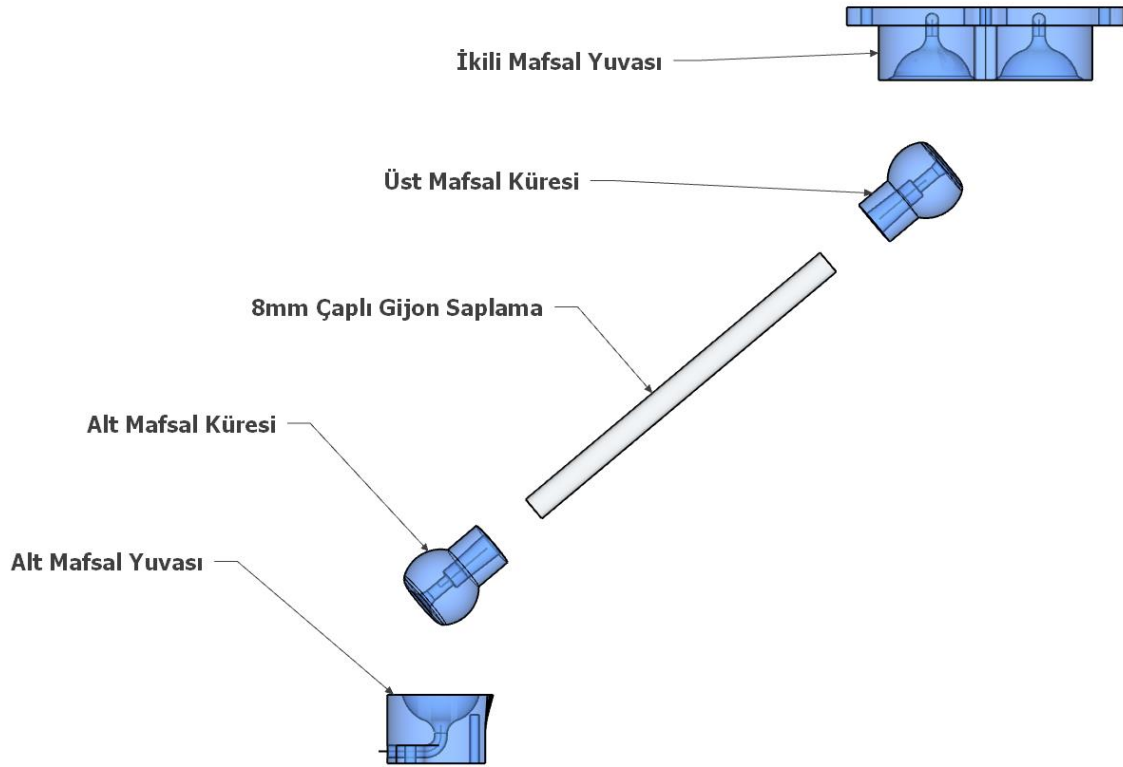
Sistemde kullanılan mafsallara istenilen yöne etki edilmesi durumunda istenilen yönde hareket sağlanır. Ancak serbest hareket eden mafsallar dışında, kendi eğim ve açısını kontrol eden yani konum geri beslemeli mafsal sistemleri de vardır. Mafsalin hangi açıya gitmesi gerektiği bu mafsalların bağlı bulunduğu mikroişlemciye gönderilir. Daha sonra ise mafsal, motor sistemleri ile istenilen açıya göre konumlandırılır.

Çalışmada yapılan küre şeklini andıran mafsal tasarımının 3B yazıcıda üretimi gerçekleştirilmiştir. 3B yazıcıda titizlikle basılan mafsal yuvası ve mafsal küresinin dışındaki basım sırasında oluşan pürüzlü yüzey zımpara işlemlerinden geçirilerek daha düzgün bir çalışma sağlanır. Üretilen mafsal yuvası ve mafsal kürenin ortasındaki delikten özel aşınmaya dayanıklı bir ip ile birleştirme işlemi yapılmıştır. Mafsal için bu iki parçanın birleşimi sağlanarak gerekli testler yapılır. Mafsallar tek yönde 75° açığa sahip olmak üzere toplamda 150° açığa sahiptir. Şekil 4.17. de mafsal açıları iki yöne göre gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Çalışmada kullanılan mafsal modeline ait sınır açıların çizelge gösterimi

Çizgi modelde gösterildiği gibi mafsalın hareketli topu içerisine kolların takılması için bir oyuk bulunmaktadır. Kolun uzunluğu diğer paralel mekanizmalar gibi değişebilen yapıda değildir. Sabit bir L uzunluğunda $8mm$ çapında gijon saplama kullanılmıştır. Tercih edilme nedeni ise yük altındaki çalışmalarda güçsüzlük yaşanmasının önüne geçmektir.

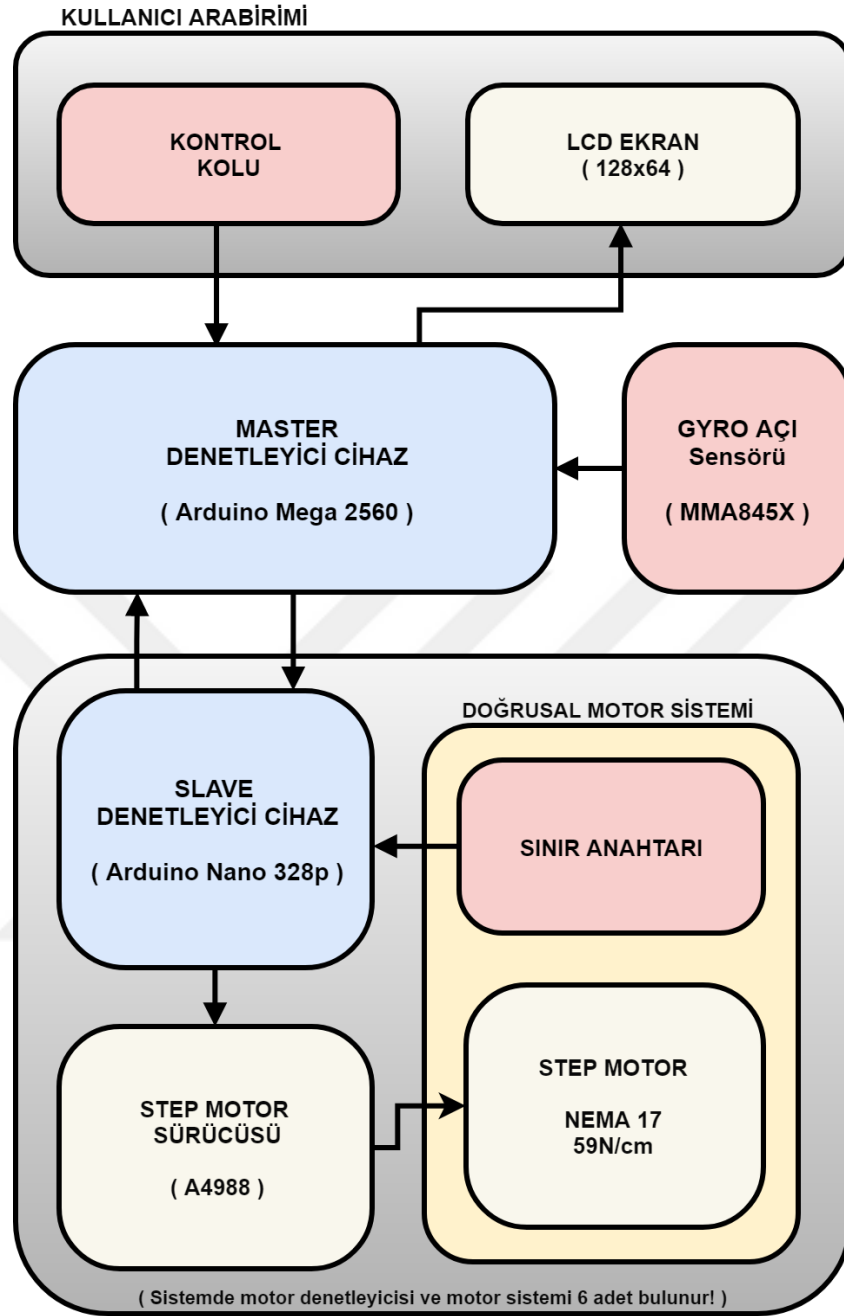


Şekil 4.18. Mafsal sistemi ve bağlantı kolunun patlatılmış montaj görünümü

Sistemdeki mafsal yapısı Şekil 4.18. ile gösterilen yapıda kurulumu gerçekleşir. Alt mafsal küresi ve üst mafsal küresi birbiri ile özdeştir. Alt mafsal yuvası doğrusal motor sistemi tarafından hareket ettirilir. İkili mafsal yuvası platform üzerindeki ikili mafsal köşesine monte edilir.

5. GÜÇ SİSTEMLERİ VE GÖMÜLÜ ELEKTRONİK KONTROL MEKANİZMALARI

Bu tez çalışmasında, verilen açı ve koordinata göre hareket eden üst plakanın çalışma uzayı yazılımsal olarak çözümlendikten sonra sistemin elektronik kurulumu gerçekleştirilmiştir. Sistemin ana beyni olan mikrodenetleyiciye bağlı elektronik sistemlerin kurulumu gerçekleştirilmiştir. Sistemin amaçladığı çalışma uzayındaki parametreleri en iyi şekilde uygulaması için, mekanizmanın yapı taşını oluşturan motorların ve buna bağlı olan kontrol sisteminin (Mikrodenetleyici, Güç Kaynağı, Motor sürücüsü) iyi seçilmesi gerekir. Motorların fazla yük çekmesine bağlı olan, aşırı yüklenme sonucu kablo veya kart yanmalarının yaşanmaması adına sistemdeki ısınmaların önüne geçmek için soğutma sisteminin yeterli olması ve fan sisteminin iyi hava sirkülasyonu yapacak şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca güç iletimi sağlayan pvc izoleli bakır kabloların iyi seçilmesi gerekmektedir. Sistemin kontrolünü sağlamak amaçlı kullanılacak olan mikrodenetleyici seçilirken, karta bağlı olacak giriş ve çıkış pin sayıları belirlenmeli ve buna göre uygun bir pin yapısında ve uygun çalışma frekansını sağlayan model kart seçilmelidir. Sistemde motor gibi fazla akım çeken elektronik aygıtların güç beslemesi ayrı yapılmalıdır. Aksi takdirde devre kartlarıyla aynı hat üzerinden besleme yapılması durumunda, fazla akım çekeceğinden kartların lojik çalışma yapısından dolayı kararsız çalışmasına neden olabilmektedir. Sistemin kontrol mekanizması genel olarak Şekil 5.1.'de gösterilen bağlantı yapısındadır.



Şekil 5.1. Sistemin genel elektronik denetim bileşenleri ve kontrol süreci

Denetim sağlayan çiplerin en ortak özelliği girdi, işlem ve çıktı katmanları ile sistemin çalışma sürecini idame ettirmektir. Prototip sistem için Şekil 5.1. incelendiğinde sistemin genel yapısı içerisinde 1 adet ana kontrol denetleyicisi (Master) ve 6 adet de paralel sürücü yapısındaki ikincil denetleyici (slave) cihaz olmak üzere toplamda 7 adet denetleyici kart bulunmaktadır. Bu kartlar genel yapının işlem katmanında görev alır. Açık sensör, sınır anahtarı ve kontrol kolu sistemin genelinde girdi katmanındadır. Motor, ekran ve motor sürücüsü ise çıktı görevi görür. Doğrusal motor sistemi yapısı paralel yapıda olduğu için her

motorun kontrol düzeneği birbirinden ayrı olarak master cihaz tarafından yönetilmektedir. Şekil 5.1. üzerinde motor kontrol düzeneği alt kısımda 1 tanesi için gösterilmiştir, tümü özdeş yapıdadır. Sistemin genel çalışma hiyerarşisini anlamak için girdi, işlem ve çıktı katmanlarındaki sürecin daha iyi anlaşılması gerekir.

5.1. Mikrodenetleyici (MCU) Kontrolü

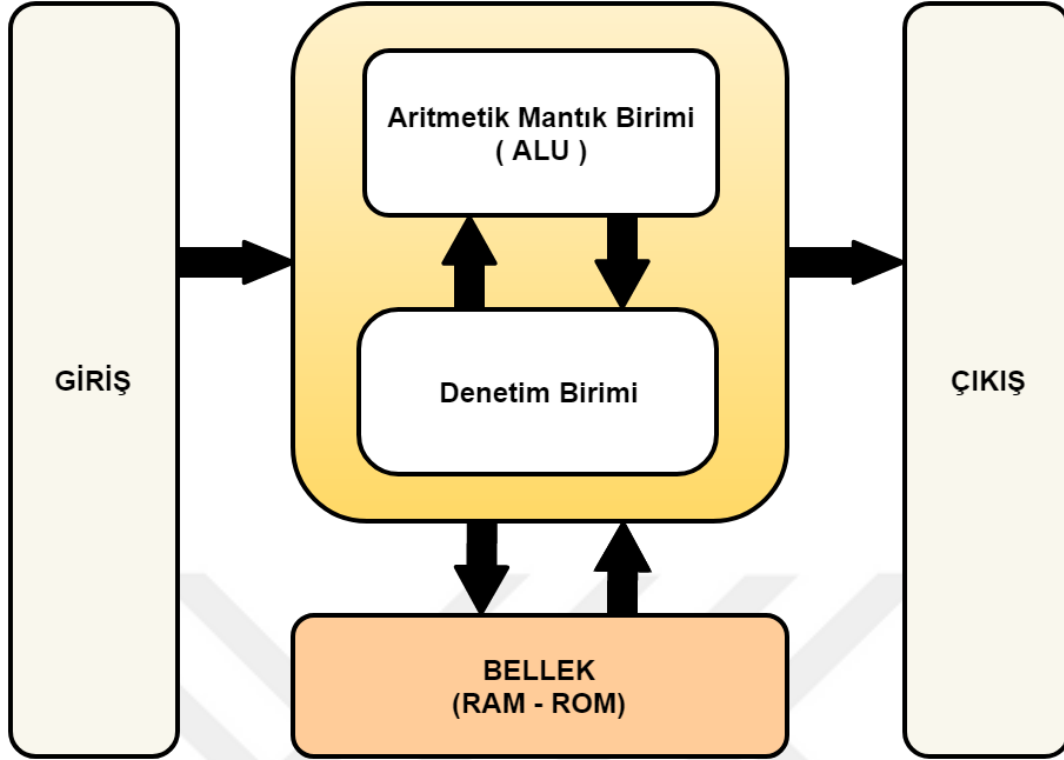
Mikroişlemci, yapısında işlemci, ön bellek ve giriş çıkış birimleri barındıran devre sistemlerine denir. Kısaca bir bilgisayar da denebilir. Mikroişlemciler, kullanıldığı elektronik hiyerarşinin beyni kabul edilir. Sistemi, amaç doğrultusunda kontrol etmemizi sağlar. Mikroişlemcinin veri işleme biriminde bir CPU yer alır. Veri işleme işlemleri CPU içerisinde yer alan ALU'da gerçekleşir. ALU aritmetik mantık birimidir. Bu sayede sistemde sayısal lojik işlemler işlenir. Mikroişlemciye yazılan veriler hafızada depolanır. İşlemcinin direkt eriştiği bellekler RAM ve ROM 'dur. RAM, önbellek ismiyle anılmakta ve Mikroişlemci kapandığı anda yüklü veriler kaybolur. Ancak ROM bellekte öyle değildir. ROM bellek, kalıcı bir hafıza sistemine sahip olup mikroişlemci kapansa bile hafızadaki veriler silinmemektedir.

Mikrodenetleyici, üzerine işlenen veriyi hafızasında tutan, derleme işlemini gerçekleştirip bir çıktı sağlayan bilgisayardır. Mikrodenetleyiciler kendi yapılarında;

- CPU,
- RAM Bellek,
- ROM Bellek,
- Giriş/Çıkış Portları,
- Seri ve Paralel Portlar

bulundurur. Türüne bağlı olarak, analog veriyi dijital veriye ve dijital veriyi analog veriye çeviren çevirici bulunanları da vardır.

Mikrodenetleyiciler yapılarında Mikroişlemci barındırırlar. Mikroişlemcilerin yapısında işlemci, ön bellek ve giriş çıkış portları olmaktadır. Mikrodenetleyici ise aynı zamanda paralel ile seri port bağlantıları ve çevirici sistem portlarında üzerinde barındırmaktadır (Şekil 5.2.).



Şekil 5.2. Mikrodenetleyicinin genel yapısının şematik gösterimi

Bir mikrodenetleyici içine yazılım atmak yani programlayabilmek için, kendi iç yapısına uygun komut satırları barındıran derlenmiş yazılım atmak gerekir. Farklı mikrodenetleyiciler için farklı derleyici ve yazılmış kodun derlenerek aktarılması içinde farklı tipte aracı programlar vardır. Bu tip programlar, program atarken derleme yaparak, yazılmış yazılım komutlarını makinenin anlayacağı dile (makine dili) çevirerek mikrodenetleyiciye yüklerler.

Bu tez çalışmasında programlama kartı olarak Arduino ailesinden olan, Arduino Mega ve Arduino Nano kullanılmıştır. Arduino, kolay kullanılabilirliği sayesinde, projeler geliştirmek için elektronik ve yazılım tabanlı bir sistematik gömülü yazılım platformudur. Yapısında mikrodenetleyici olarak Atmel AVR bulunmakta ve kart üzerindeki pinleri kullanabilmek için çeşitli komponent bağlantı noktaları bulunmaktadır. İtalyan mühendis grubu tarafından geliştirilmiş ve daha sonradan bütünüyle açık kaynak kodlu platforma dönüşmüştür. Bu kart wiring tabanına sahip programlama dili ile kontrol edilmekte ve geliştirme ortamı ise processing tabanlı Arduino IDE'dir. C programlama diliyle hemen hemen aynı programlama mantığına sahip ve usb kablosu sayesinde kolayca yazılan kod parçacığını karta yüklenebilmektedir. Arduino tercih edilme sebepleri şunlardır:

- Kolay erişilebilir kütüphane yapısıyla programlamayı kolaylaştırmaktadır.
- Kart üzerindeki dijital ve analog giriş pinleri sayesinde dijital veya analog veriler kolaylıkla işlenmektedir.
- Sensör gibi girdi elektronik elemanlarla çalışması kütüphane desteği olmasından kolaydır.
- Bu kart kullanılarak elektronik ve robot uygulamaları geliştirmek çok daha kolay olmaktadır.
- Kendi yazılım dili, C diline benzediğinden ve basit olduğundan yardımcı kaynak bulmak kolaydır.
- Arduino IDE 'nin ücretsiz olması ve işletim sistemlerine uyumlu olması sayesinde uyum problemi yaşatmaz.

Arduino programlama kartlarının gün geçtikçe çeşitleri artmaktadır. En çok kullanılan Arduino türleri şunlardır:

- Arduino Mega ADK
- Arduino Robot
- Arduino Micro
- Arduino Nano
- Arduino Ethernet
- LilyPad Arduino
- Arduino Uno R3
- Arduino Leonardo
- Arduino Mega 2560
- Arduino Esplora

Sistemde daha öncede belirtildiği gibi Arduino Mega ve Arduino Nano kullanılmıştır (Şekil 5.3.). Arduino Mega ana kontrol kartı olarak(Master mod) kullanılmış ve Arduino Nano kartları ise paralel şekilde birbirine bağlanıp(Slave mod), I²C protokolü kullanılarak Arduino Mega dan alınan bilgilere göre işlem yetkisi atanmıştır. Her Step Motor için bir adet Arduino Nano kartı kullanılmıştır. Dolayısıyla 6 adet motor için 6 adet Arduino Nano paralel protokol ile bağlanmış ve Arduino Mega dan gelen işlemlere göre birbirleri arasında hareket sistematığı kurulmuştur (Çizelge 5.1.).

Çizelge 5.1. Arduino Mega ve Arduino Nano özellikleri

Kart Özellikleri	ARDUINO MEGA 2560	ARDUINO NANO
Mikrodenetleyici :	ATmega2560	ATmega328
Çalışma gerilimi :	+5 V DC	+5 V DC
Tavsiye edilen besleme gerilimi :	7 - 12 V DC	7 - 12 V DC
Besleme gerilimi limitleri :	6 - 20 V	6 - 20 V
Dijital giriş / çıkış pinleri :	54 tane (15 tanesi PWM)	14 (6 tanesi PWM çıkışı)
Analog giriş pinleri :	16 adet	8 adet
Giriş / çıkış pini başına düşen DC akım :	40 mA	40 mA
3,3 V pini için akım :	50 mA	50 mA
Flash hafıza :	256 KB (8 KB bootloader için kullanılır)	32 KB (ATmega328) 2 KB bootloader için kullanılır
SRAM :	8 KB	2 KB (ATmega328)
EEPROM :	4 KB	1 KB (ATmega328)
Saat frekansı :	16 MHz	16 MHz
Uzunluk:	101.6 mm	45 mm
Genişlik:	53.4 mm	18 mm
Ağırlık:	36 g	5 g



(Arduino Mega 2560)



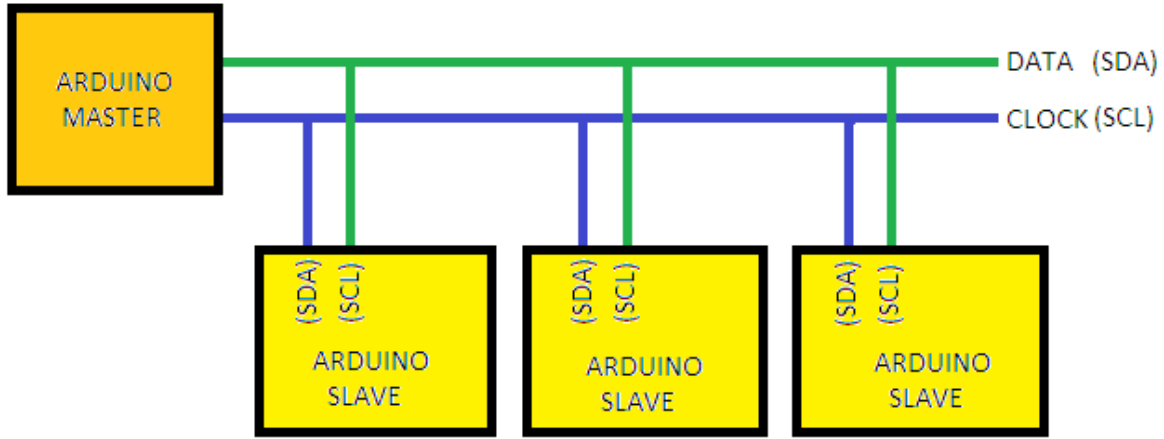
(Arduino Nano 328p)

Şekil 5.3. Arduino Nano 328p ve Arduino Mega 2560 gömülü denetleyici kartları

5.1.1. Paralel haberleşme süreci (I²C)

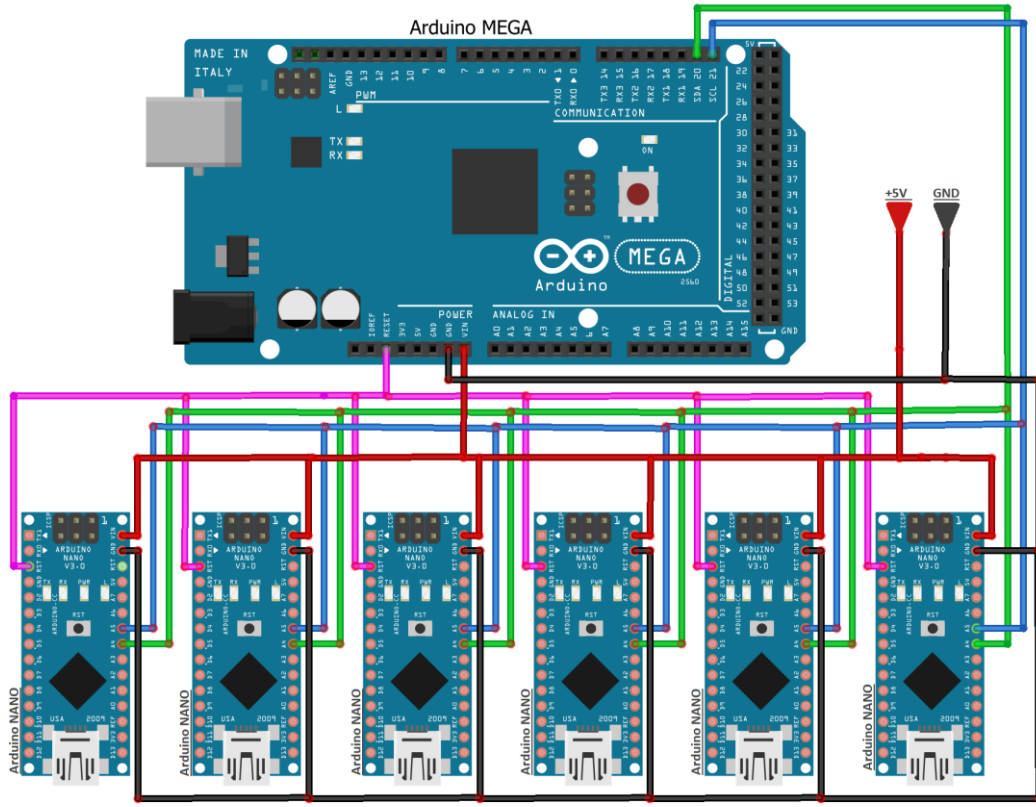
Philips tarafından geliştirilen I²C haberleşme protokolü “Inter Integrated Circuit” kelimelerinden oluşmaktadır. Bant genişliği küçük ve mesafe bakımından kısıtlı haberleşme sağlayan bir eşzamanlı yapıda haberleşme biçimidir.

Bu haberleşme protokolü, haberleşme için iki kanal kullanır (Şekil 5.4.). Bu kanallar SDA ve SCL kanallarıdır. SDA veri dosyalarının iletildiği kanaldır. SCL ise clock sinyallerinin veri senkronizasyonu sağlayarak iletimini sağlar.



Şekil 5.4. Master ve Slave cihazların I²C protokolü ile iletişimi

I²C haberleşme yapısında, bağlı aygıtlar master ve slave şekilde haberleşme sağlarlar. Dolayısıyla bağlı aygıtların master ve slave olarak adaptasyonu sağlanmalıdır. Buna bağlı olarak I²C yapısının bir güzel tarafı ise multimaster özelliğinin olmasıdır. Sistem multimaster sayesinde çoklu master ile çalışabilmektedir. Şekil 5.5.'te görüldüğü üzere, tez çalışmasında 1 adet master ve 6 adet slave modda kart birbirleriyle haberleşme sağlamaktadır.



Şekil 5.5. Sistemde master ve slave denetleyicilerin bağlantı şeması

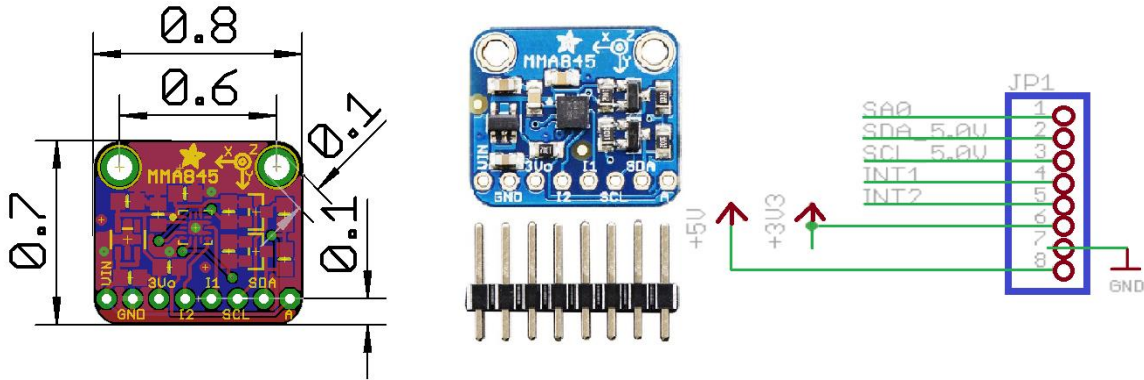
Şekil 5.5.'teki kartlardaki haberleşme, master olan Arduino Mega'nın kontrolündedir. Veri alışverişini başlatıp sonlandıranda master karttır. Master olan Arduino Mega, SCL kanalından clock veri sinyalleri yollayarak kartlar arası veri alışverişini devamlı kontrol altında tutar. Slave olan Arduino Nano kartlar ise clock veri sinyali üretme yetkileri yoktur. Sadece veri alışverişini sağlarlar. Çizelge 5.6.'da Arduino Mega ile Arduino Nano kartlarının SDA ve SCL bağlantı pinleri verilmiştir.

Çizelge 5.2. Arduino Mega ve Arduino Nano denetleyicilerin iletişim için pin bağlantıları

Arduino türü	SDA pini	SCL pini
Arduino Nano	A4	A5
Arduino Mega	D20	D21

5.2. Açı Sensörü ve Bağlantısı

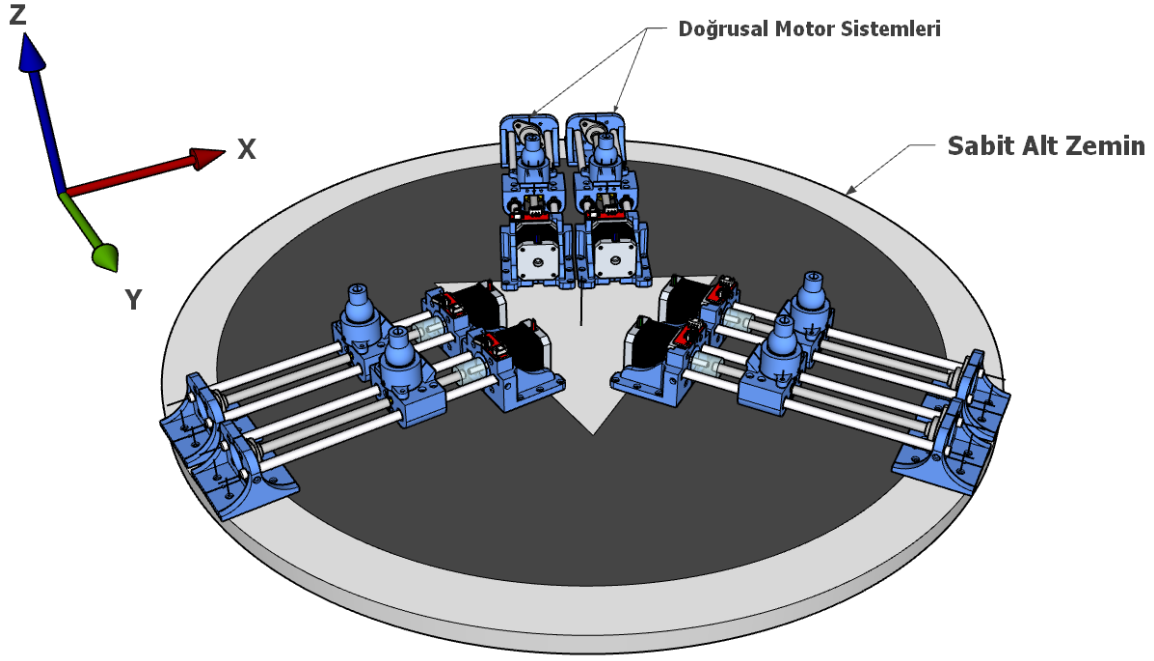
Bu tez çalışmasında, ters kinematik hesaplamalarla denge sağlarken aynı zamanda denge doğrulunu elektronik açıölçer kullanılarak sağlanmaktadır. Platform üzerindeki açılı algılayıp master mikrodenetleyici kartımıza stabil açı verilerini göndermesi önemlidir. Araştırmalar ve değerlendirmeler sonucunda NXP Semiconductors firmasının üretmiş olduğu MMA845X açı ve ivmeölçer sensör kartı bu tez çalışmasında kullanılmıştır. MMA845X açı ve ivme ölçer sensörü, üç eksen üzerinde stabil sonuç çıkışı, boyut olarak küçük olması ve harcadığı enerji düşüklüğü nedeniyle tercih sebebi olmuştur. Sensör incelendiğinde, yaşanan ivmelerin algılama stabilitesi açısından 2-4-8 tercihleri sunulmuştur. İvme kalibrasyonu yapılırken I²C pin kanalından yaşanan ivme değerleri alınabilir. MMA845X açı ve ivmeölçer sensöründen bahsetmişken, bu kartın üzerindeki küçük SMD parça aslında tüm görevi görmektedir. Kartın diğer bölümü lehim yapacak kişiye kolaylık sağlanması içindir. SMD elemanını kartın üzerinden sökerek, özel devrelerde lehimlenerek kullanılabilir. Ancak kendi üretim çıkışlı kullanılması tavsiye edilmektedir. Doğru konumlandırma sağlanıp ve pin bağlantıları düzgün lehimlenir ise, bu karttan yüksek verim alınır. Şekil 5.6.'da görüldüğü üzere sensör kartının boyutunu ve bağlantı pin noktaları gösterilmiştir.



Şekil 5.6. MMA845X açı sensörünün pinleri ve genel görünümü

Platformda denge verilerini stabil almak için, sensörü sistemin rijit noktasına yerleştirilmesi gerekir. Platform hareketlerinden etkilenmemesi için, sensör düz bir sünger üzerine yerleştirilmiştir. Böylelikle sensör, platformda motorların hareketi sonucu oluşan titreşimlerden en düşük seviyede etkilenecek ve açı parametreleri master kartımız olan

Arduino Mega karta stabil bir şekilde iletilecektir. Şekil 5.7.'de platform sisteminin sabit zemin görülmektedir. Sensör kartı sabit zemin üzerine konumlandırılmıştır.



Şekil 5.7. Sistemdeki sabit alt zeminin 3B görünümü

MMA845X açı ve ivme ölçme sensörünün genel özellikleri;

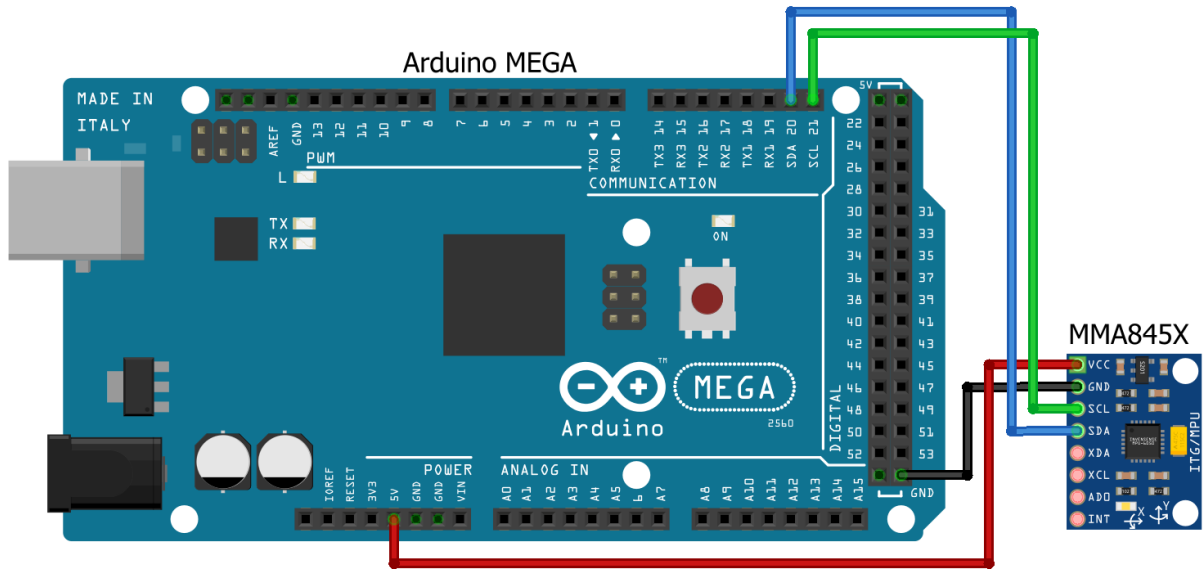
- Düşme, ani hareket ve çarpma algılama,
- Döndürme algılama,
- Anlık ivme algılama,
- PC bağlantı kanalından dijital veri işleyişi,
- Kendi kütüphanesi üzerinden kolay kontrol edilebilen ölçüm ayarı,,
- Veri alışverişindeki bant genişliği ayarlama,

şeklindedir. Çizelge 5.3. MMA845X açı ve ivme ölçüm sensörünün teknik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 5.3. MMA845X açı ve ivme ölçüm sensörünün teknik özellikleri

Kart Özellikleri	Veriler
Çalışma gerilimi	3-5V
Ölçüm aralığı	$\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g$
Yenileme sıklığı	1.56 Hz - 800 Hz aralığında
Dijital veri çıkışı	12-bit veya 8-bit
Interrupt pini	2 adet
Uzunluk	14 mm
Genişlik	20 mm
Ağırlık	1.3 g

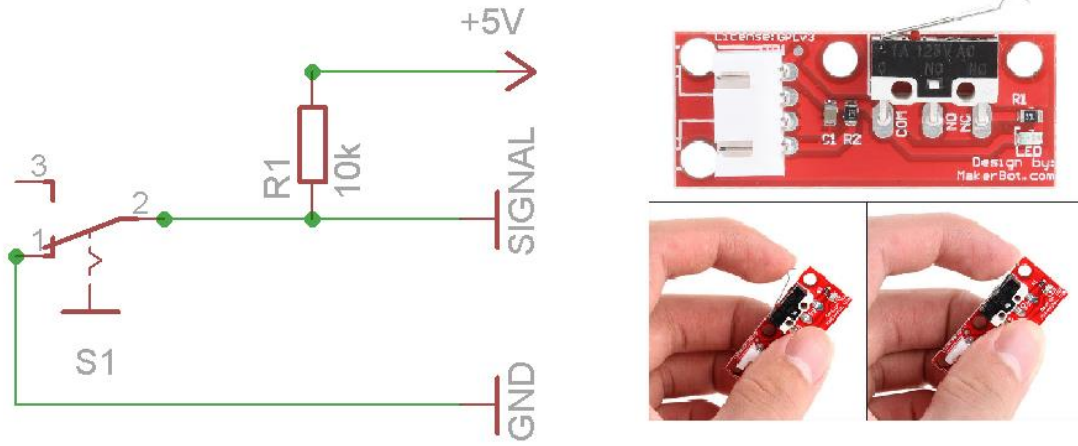
Açı ve ivme sensörleri, veri parametrelerini iki farklı kanal üzerinden iletebilir. Bu kanallar kendi iletim yapılarına göre SPI ve I²C şeklindedir. Yalnız tez çalışmasında kullanılan MMA845X sensörü I²C protokolü üzerinden veri iletimini desteklemektedir. MMA845X sensörü sistemde üç eksenle yapılan hareketin verilerini almak için kullanılmıştır. Sensör kartının güç sarfiyatı düşük olması, besleme kaynağını da Arduino Mega üzerinden almasını sağlamıştır. Şekil 5.8. MMA845X sensörünün master karta bağlantısı görülmektedir.



Şekil 5.8. Denetleyici kart ile MMA845X açı sensörünün bağlantıları

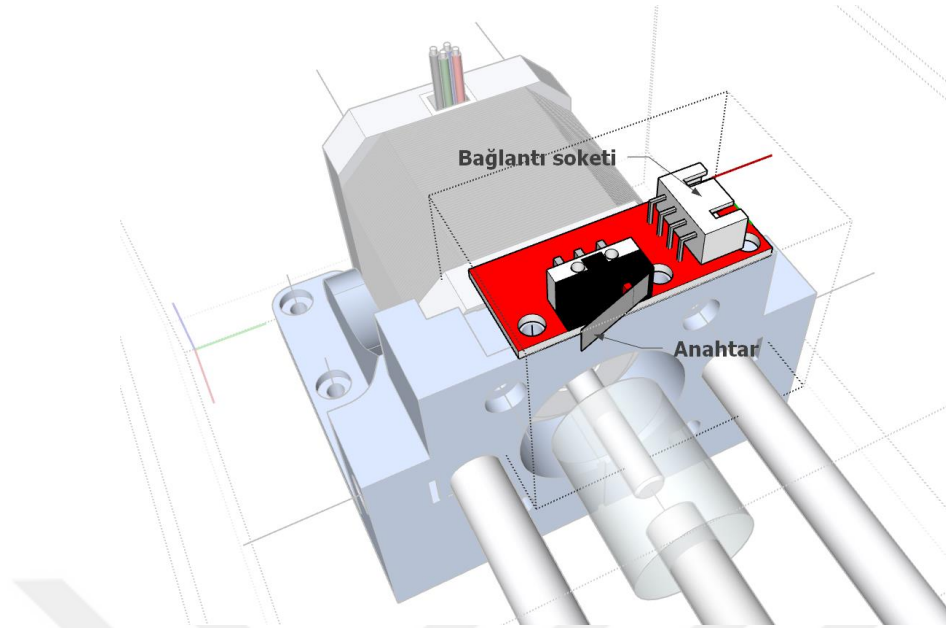
5.3. Sınır Anahtarları ve Bağlantısı

Hareketli sistem modellerinde, sistemin başlangıcı ve bitişinde konum belirleme amaçlı yerleştirilen anahtar devrelerine sınır anahtarları denmektedir. Normal halinde tetikten önce açık veya tetikten önce kapalı tek kontak yapıları sınır anahtarları olabilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan sınır anahtarı normalde açık olan ve tetikleme sonrası tek kontak ile kapanan bir yapıdadır. İki kontaklı ve daha fazla kontaklı yapıya sahip sınır anahtarları da bulunmaktadır. Şekil 5.9. sınır anahtarının kendi için devre şeması ve gerçek görünümü verilmiştir. Sınır anahtar kartının uzunluğu 40mm, genişliği 15mm ve kalınlığı 10mm'dir.



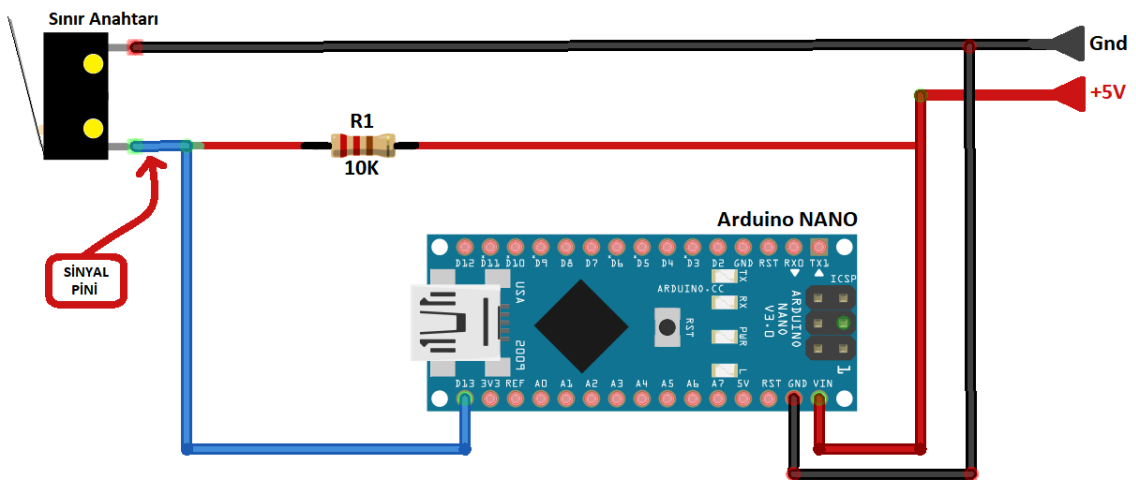
Şekil 5.9. Sınır anahtarı ve şematik gösterimi

Limit switch veya endstop ile de adlandırılırlar. Bu anahtarlama devresi, doğrusal olarak hareketli yapıda olan zemine bağlı mafsalların konumunun sıfırlanmasında kullanılır. Mafsal taşıyıcı, sıfır noktasına gelince sınır anahtarı tetikler ve sınır anahtar kontrol kartına tetik sinyali gönderir. Bu sayede mafsal taşıyıcının sıfır noktasında olduğu verisi işlenir. Şekil 5.10 sınır anahtarının her bir ray düzenekli mafsal taşıyıcı ve konumlandırıcı hareketli mekanizmada bir adet olduğu görülmektedir. Prototipi geliştirilen sistemde her doğrusal sistem için kullanılmakta olup toplamda 6 adet bulunmaktadır.



Şekil 5.10 Sınır anahtarının doğrusal motor sistemi üzerindeki konumu

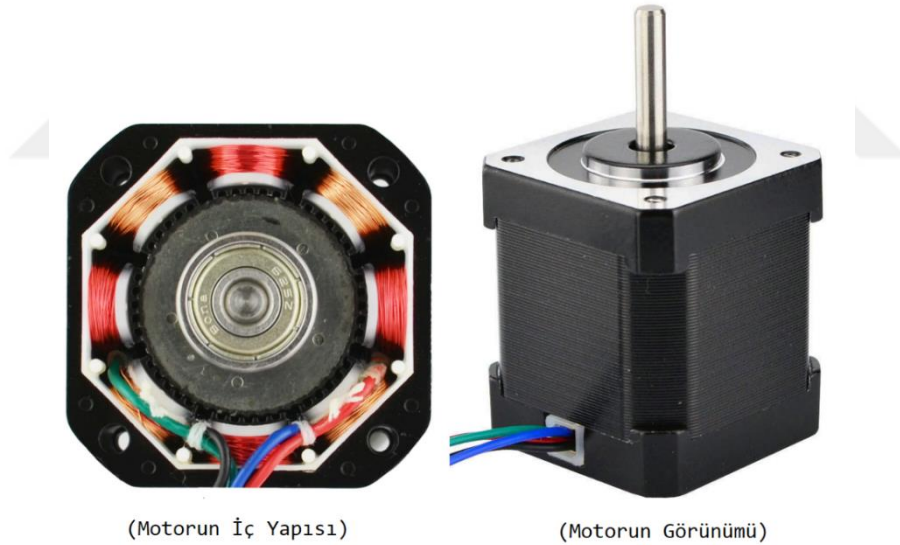
Tez çalışmasında her bir mafsal taşıyıcı ve konumlandırma mekanizmasında bir slave kontrol kartı ve buna bağlı bir sınır anahtar bulunmaktadır. Küçük boyutlu kartın üstünde bulunan telin itilmesi ile anahtar devre kapanmakta ve kontrol kartına tetik sinyali göndermektedir. Bu sayede doğrusal haldeki eksenin son noktasına geldiği verisi işlenir ve o doğrusal eksen üzerindeki hareket sonlanmış olur. Şekil 5.11. görüldüğü üzere, sınır anahtarı Arduino Nano ile aynı voltajla beslenmekte ve sınır anahtarının sinyal çıkış pini Arduino Nano 'nun D13 pinine bağlı olduğu görülmektedir.



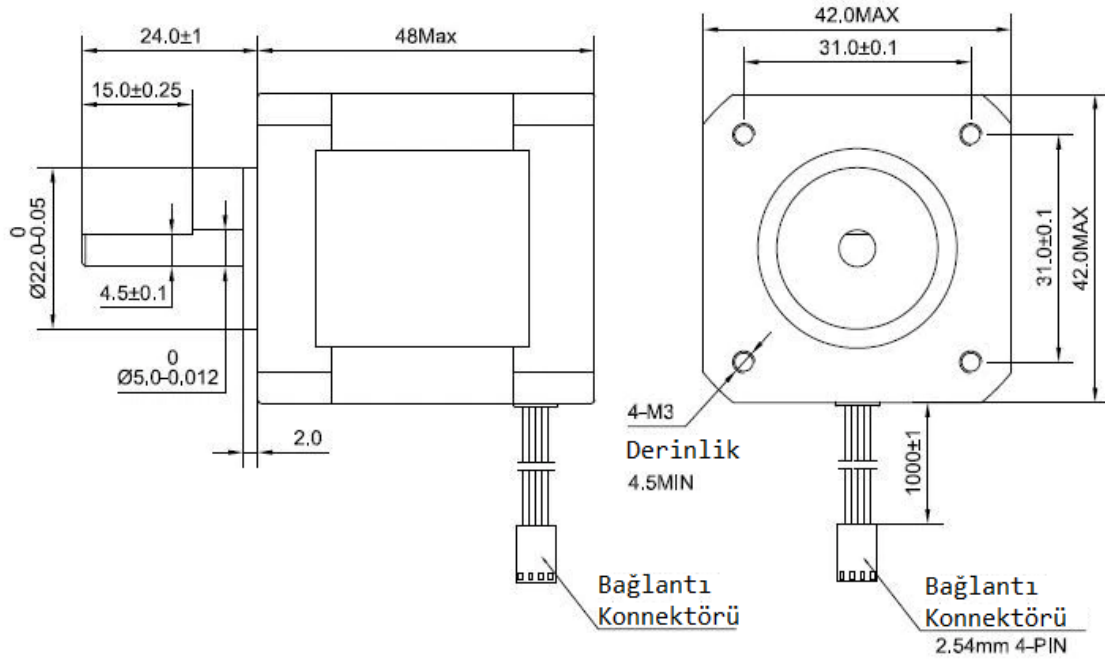
Şekil 5.11. Gömülü kart ile sınır anahtarının bağlantısı

5.4. Step Motorlar

Step motorlar adım adım hassas konumlandırma yapabilmek için kullanılan motorlardır. Yapısı gereği içerisindeki bobinlere uygulanan elektrik sinyali ile motor millinin bağlı olduğu rotorun küçük sabit açısal hareket yapmasını sağlar. Yaptığı açısal hareketlere adım açısı denmektedir. Step motorlarda bu adım hareketlerini sağlarken girişe uygulanan puls sinyallerini kontrol ederek analog çıkış sağlar ve açısal yer değiştirme sağlanmış olur. Bu durum elektrik enerjisinin fiziksel bir harekete çevrilmesidir. Step motorlarda açısal yer değiştirme durumunu sağlamak için girişi ve çıkışı arasındaki elektrik sinyalinin frekans değerlerini farklı değerler ile tanımlayarak sağlanabilir [65]. Bu tez çalışmasında kullanılan step motor ve iç yapısı Şekil 5.12.'de gösterilmektedir. Çalışmada altı adet $59N/cm$ torca sahip step motor kullanılmıştır. Kullanılan 17HS4801 model motorun ölçülendirmeleri ise Şekil 5.13. ile gösterilmiştir.

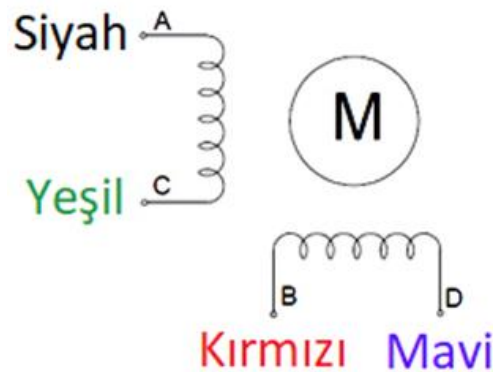


Şekil 5.12. 17HS4801 model nema 17 step motor ve iç görünümü



Şekil 5.13. 17HS4801 model nema 17 step motorun teknik çizimi

Step motorlarda, bobinlere gönderilen sinyallere göre motorun adım hareketleri kontrol edilebilir. Bobinlere gönderilen sinyalin akım yönü ve uygulanış sırası ise motor içerisindeki rotorun hangi yöne doğru adım atacağını belirler. Şekil 5.14 ile motor bobin yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Bobine gönderilen elektrik akımı ve uygulanış sırasına göre motor farklı yönlerde dönüş sağlamaktadır. Motorun dönüş yönü saat yönü için CW, saat yönünün tersi için ise CCW olarak bilinir. Çizelge 5.4. ile yön tayini için gerekli teknik bilgiler ve kontrol tekniği gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Step motor bobin yapısı için şematik gösterim

Çizelge 5.4. Step motor bobin enerji sırasına göre yön tayini

STEP	Bobinler				YÖN	
	A	B	C	D	CW (Saat Yönü)	CCW (Saat Yönünün Ters)
1	+	+	-	-	↑	↓
2	-	+	+	-		
3	-	-	+	+		
4	+	-	-	+		

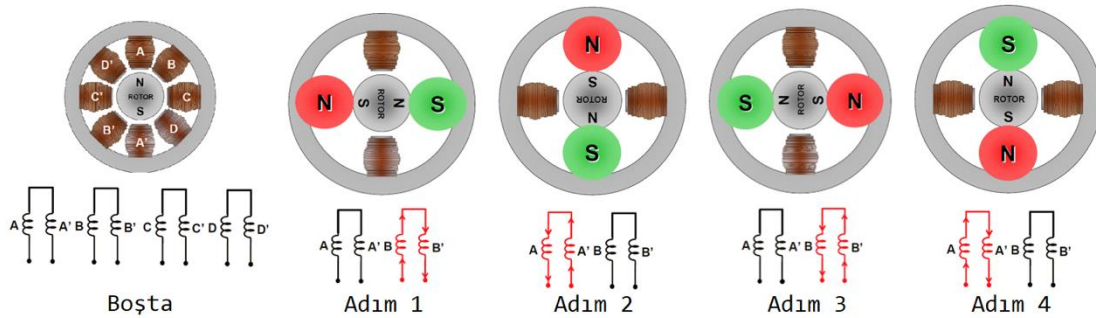
Step motorlar 5 ayrı kategoriye gösterilmektedir. Bunlar;

- Sabit mıknatıslı,
- Değişken relüktanslı,
- Hibrit,
- Hidrolik,
- Lineer step motor

şeklinde sınıflara ayrılmışlardır.

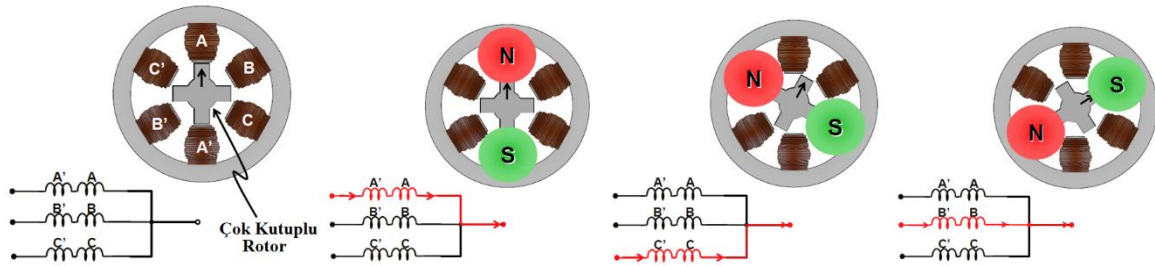
Sabit mıknatıslı step motor çalışma yapısı olarak dört farklı alt kategoriye ayrılmıştır. Bu kategoriler disk tipi, dört fazlı, iki fazlı, orta uçlu sabit mıknatıslı step motorlar olarak sınıflandırılırlar.

Sabit mıknatıslı step motorlardaki rotorlar ise yapısında bulunan sabit mıknatıstan oluşmaktadır. Bu rotor mıknatısı rotor yapısının kutuplarını (N, S) oluşturmaktadır. Bu yapıdaki bir step motorun adım sayısını rotor kutupları ve stator sargısının boyutu ile ilgilidir. Sabit mıknatıslı step motorlar genellikle büyük adım açısı gereken çalışmalarda tercih edilmektedir. Sabit mıknatıslı step motor yapısı ve adım adım rotora etkisi Şekil 5.15. verilmiştir.



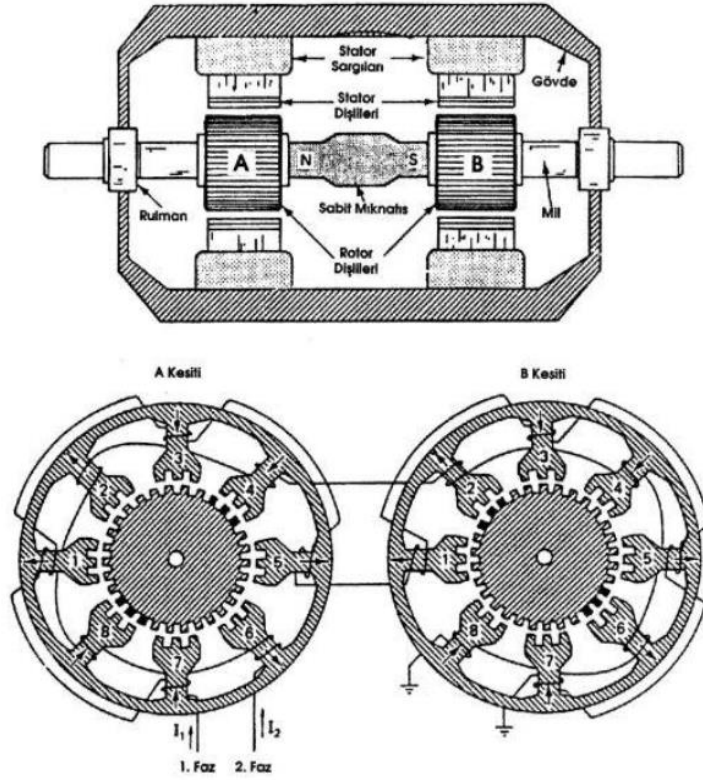
Şekil 5.15. Sabit mıknatıslı step motorların adım hareketleri

Değişken relüktanslı step motor yapısında bulunan rotor sisteminde ferromanyetik maddesi bulunmaktadır. Bu rotor yapısı gereği içerisinde sabit mıknatıs yoktur. Değişken relüktanslı step motorlar çok kutuplu rotorlardan oluşmaktadır. Stator yapısında ise elektromıknatıs ve bobin barındırmaktadır. Değişken relüktanslı step motor yalnızca adımlamalarını mikro seviyesinde ve tam adım şeklinde çalışan model yapısına sahiptirler. Bu sebeple çalışma alanları yüksek hassasiyet gerektiren yerlerle sınırlıdır. Yüksek torklu olmadıkları için endüstri alanında pek fazla tercih edilmezler. Bu değişken relüktanslı motor yapıları Şekil 5.16. gösterilmiştir.



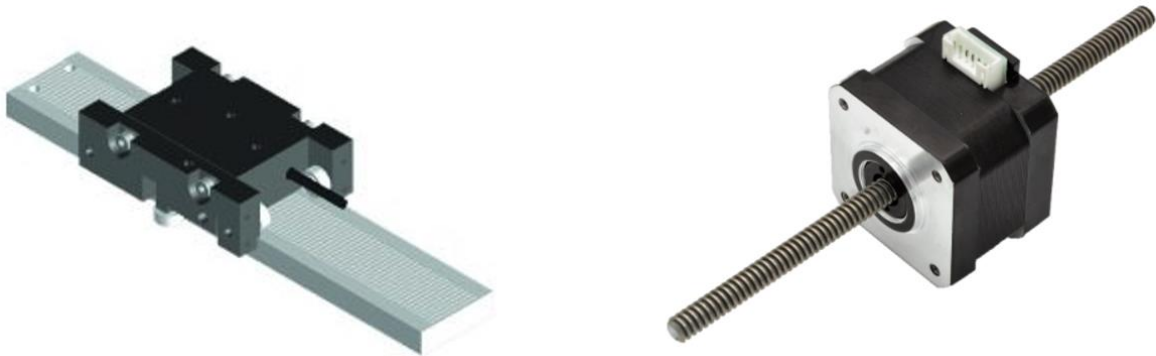
Şekil 5.16. Değişken relüktanslı step motorların yapısı

Hibrit step motorların bu isimle tanımlamalarının sebebi sabit mıknatıslı ve değişken relüktanslı step motorların birleşimi olmasındandır. Bu iki motorun birleştirilmiş hali olduğundan daha gelişmiş bir yapıya sahiptir. Hibrit step motorlar rotor yapılarında barındırdıkları sabit bir mıknatıs vardır. Hibrit model step motorun rotor yapısında ayrıca stator dişlileri ve rotor dişlileri mevcuttur. Rotor dişlileri iki tane olup bunlarda farklı diş sayılarına sahiptirler. Hibrit step motor yapısı Şekil 5.17. gösterilmiştir. Stator yapısı olarak hibrit modelde stator yapısı bakımından değişken relüktanslı step motor stator yapısına benzemektedir. Stator kutup sayısı olarak 8 kutba ayrılmaktadır ve her bir kutup diş sayısı 2-8 arasında değişkenlik göstermektedir.



Şekil 5.17. Hibrit model step motorun yapısı ve kesit görünümü

Lineer step motorların yaptığı mekanik hareket eksen doğruları üzerinde hareket etmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Lineer step motorlar eksen üzerindeki x , y yön veya düzleminde hareketlerini sağlamaktadırlar. Bu motorlar dairesel bir hareket sağlamazlar. Eksen üzerinde hareket ederek elektromanyetik alanı tamamlarlar. Lineer step motor yapısı Şekil 5.18. gösterilmiştir.

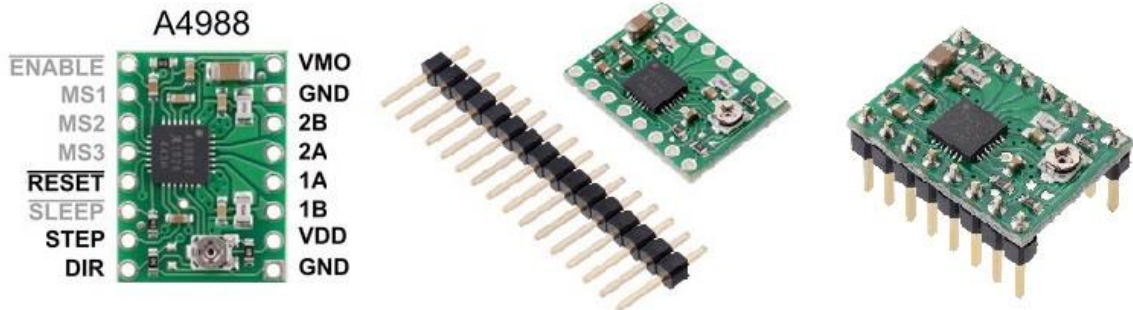


Şekil 5.18. Doğrusal step motora örnek gösterim

5.4.1. Step motorun sürücü entegresi ile kontrolü

Step motorlarının amaca uygun olarak istenilen hız ve yönde çalışması için yapısında olan sargılarına belli aralıklarla darbe sinyalleri göndermek gerekir. Step motorun nasıl hareket edeceği, kendisine uygulandığı darbe parametrelerine bağlıdır. Fazlar üzerine darbe frekansı uygulanırken en basit haliyle bir anahtarlama yapısıyla darbe uygulanabilir. Buradaki iş karmaşıklığını üstlenen devrelere sürücü devresi veya kontrol kartı denmektedir. Günümüz teknolojisine bakıldığında kontrol işlemlerinin daha kolay yapıldığı görülmektedir. Step motorlarının yapısına, çektiği akıma göre üzerinde mikroişlemci taşıyan step motor sürücü kartları piyasaya çıkmıştır. Kartların gelişmesi ile artık step motorlarını tercih edilen hız ve hassasiyetle kontrol etmek kolay hale gelmiştir.

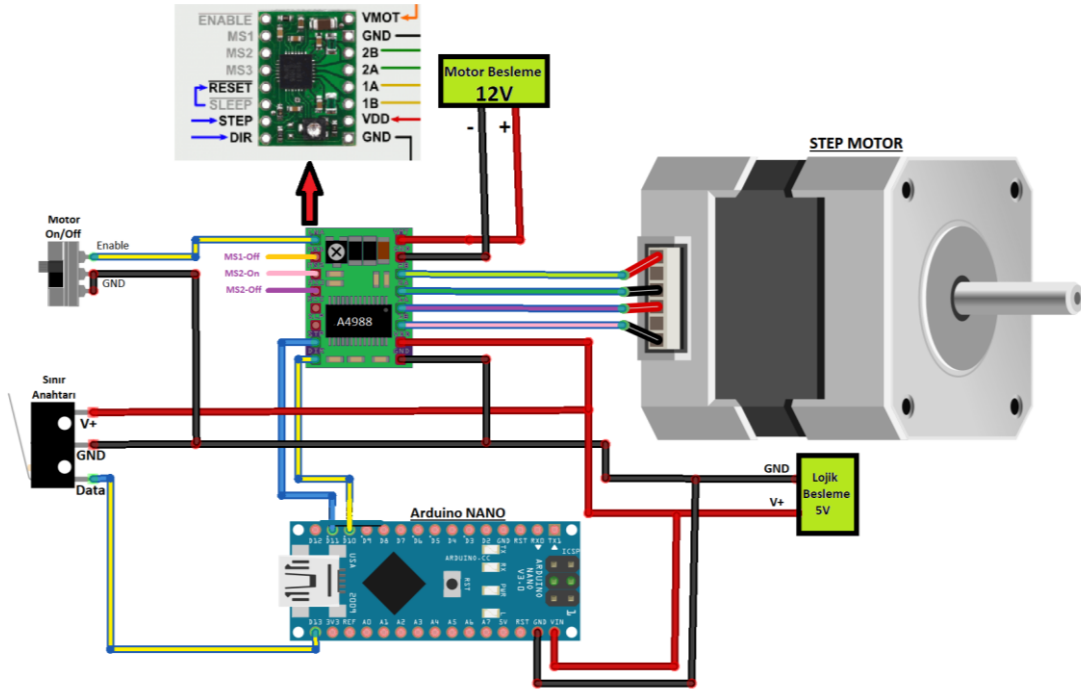
Bu tez çalışmasında kullanılmak üzere tercih edilen Pololu firmasının ürettiği A4988 step motor sürücüsü, bipolar yapısında step motorlarını sürerken her adımdaki çözünürlüğünü 1/16 gibi küçük hassasiyette hareket ettirmemize yarar. Sürücü kartın aynı zamanda aşırı akım korumasına ve yüksek sıcaklığa dayanıklı olduğu üretici firma tarafından test edilmiştir. Besleme olarak ise bağlı olduğu step motorun besleme girdisine göre 8-35 volt arasında ve 1 amper değerinde akım üzerinde soğutucuya gerek kalmadan çalışabilmektedir. Fazla akım çekmesi durumunda soğutucu ve fanlarla desteklenebilir. A4988 step motor sürücü kartı, step motorun yapısındaki her bobin için çekeceği akımı 2 ampere kadar desteklemektedir. Fazla akım çekimlerde sürücü kartta kararsız çalışma olabilmektedir. Şekil 5.19’da A4988 step motor sürücüsü ve bağlantı pinleri verilmiştir.



Şekil 5.19. A4988 step motor sürücüsü ve pin yapısı

Sistemde her step motor bir sürücüye bağlıdır. Her motor sürücüsünde bir Arduino Nano kontrol kartına bağlıdır. Master olarak kullanılan Arduino Mega, slave moddaki dinleyici Arduino

Nano'ya hareket parametrelerini gönderir. Arduino nano ise kendisine bağlı olan A4988 step motor sürücü entegresine hareket parametrelerini kendisine tanımlanmış çalışma uzayını aşmayacak şekilde gönderir. A4988 motor sürücü kartı ise step motoru istenilen hassasiyette konuma getirir. Şekil 5.20. A4988 sürücü kartının ve limit switch'in Arduino Nano 'ya bağlantı şeması verilmiştir.



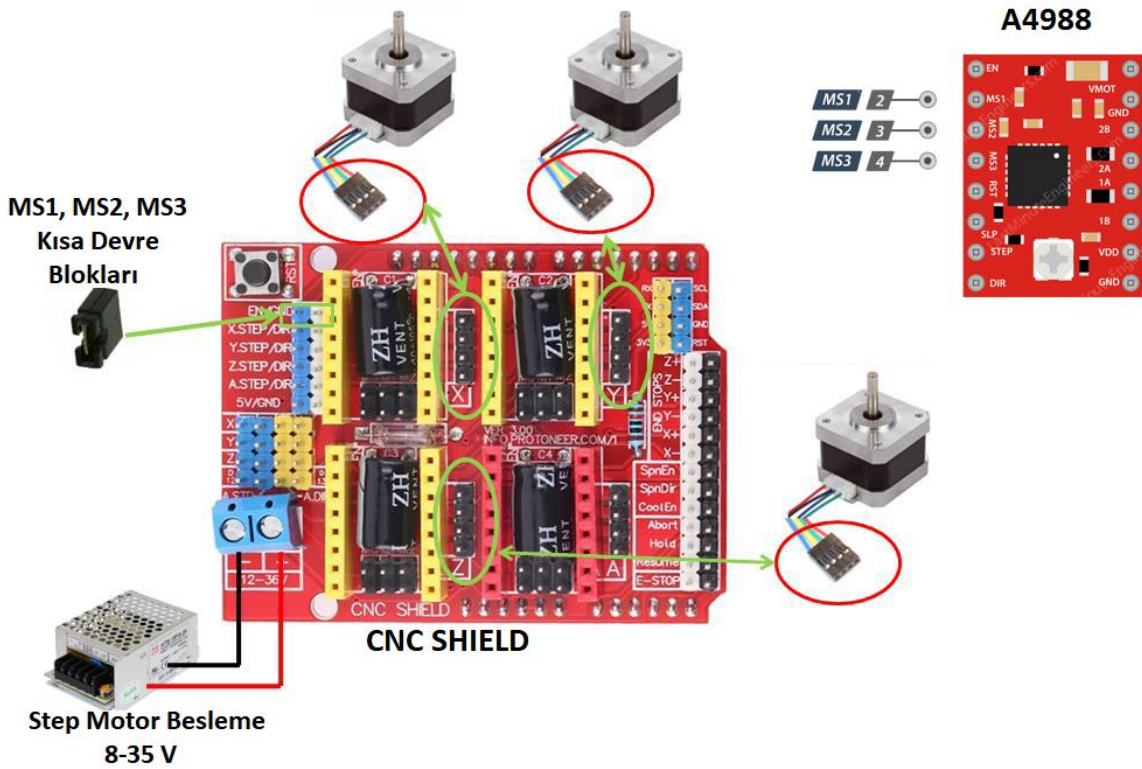
Şekil 5.20. A4988 sürücü kartının denetleyici, motor ve besleme için şematik bağlantısı

5.4.1.1. Mikro adımlama teorisi hassas hareket süreci

Konumsal hassasiyet açısından, hibrit motorlar birçok aşamada tercih edilir, ancak hibrit motorlar her adımda asgari 1.8° hareket edecek olarak üretilir. Bu değer, karşılık gelen hibrit step motorun yaptığı açığı ve stabilitesini belirler. Hassas konumlandırmanın gerekli olduğu birçok uygulamada, 1.8° hareket açısı yetersizdir. Bu sebeple mikro adımlama adında bir teori ortaya çıkmıştır.

Mikro adım ile kontrol teorisinde, adım motorun yapısındaki bobin sargılarına gönderilen bir darbe genişliğindeki sinyal yerine, sinüs benzeri bir sinyal ile adımlar arasındaki geçişin yumuşatılması sağlanır. Buna bağlı olarak daha hassas hareket sağlanır.

Adım motora gönderilen akım şiddetinin stabil ve hassas olmasıyla mikro adımlama gerçekleşir. Tez çalışmasında kullanılan adım motorlarına gerekli darbe genişlik sinyal parametrelerini ve akımı ileten A4988 adım motor sürücüsünde Şekil 5.21. verildiği gibi “MS1, MS2, MS3” kısa devre yapılarak bağlantı sağlayan anahtar yapılar vardır. Bu kısa devre anahtarlama ile bağlı adım motoru 5 farklı kademeye göre hassasiyette kullanabilmekteyiz. Çizelge 5.5.'de ise “MS1, MS2, MS3” anahtar yapıların, kısa devre oluşlarındaki hassasiyet çıktıları görülmektedir. Sistemde “MS1 - MS3” $100k\Omega$ iken MS2 ise $50k\Omega$ direnç değeriyle sisteme etki eder. Bu kısa devre pinlerinin tümü açık anahtar konumunda olduğu sürece, adım motoru tam adım dönmektedir.



Şekil 5.21. CNC Shield ‘ın bağlantıları ve mikrostep pinleri

Bu tez çalışmasında, denge sağlama amaçlandığından step motorların kaç adım gittiği çok önemlidir. Hassas ve hızlı hareket istendiğinden MS2 pini kısa devre yapılmıştır. Böylelikle çalışmadaki step motorlar $\frac{1}{4}$ ‘de bir tur hareket etmektedir. Çizelge 5.5.'de görüldüğü üzere hangi pinler kısa devre olursa, step motorunda tur modu ve hassasiyeti ona göre stabilize olur.

Çizelge 5.5. Mikrostep modu seçimi için pin bağlantı kombinasyonları

MS1	MS2	MS3	Mikrostep Modu
0	0	0	Tam adım
1	0	0	1/2 adım
0	1	0	1/4 adım
1	1	0	1/8 adım
1	1	1	1/16 adım

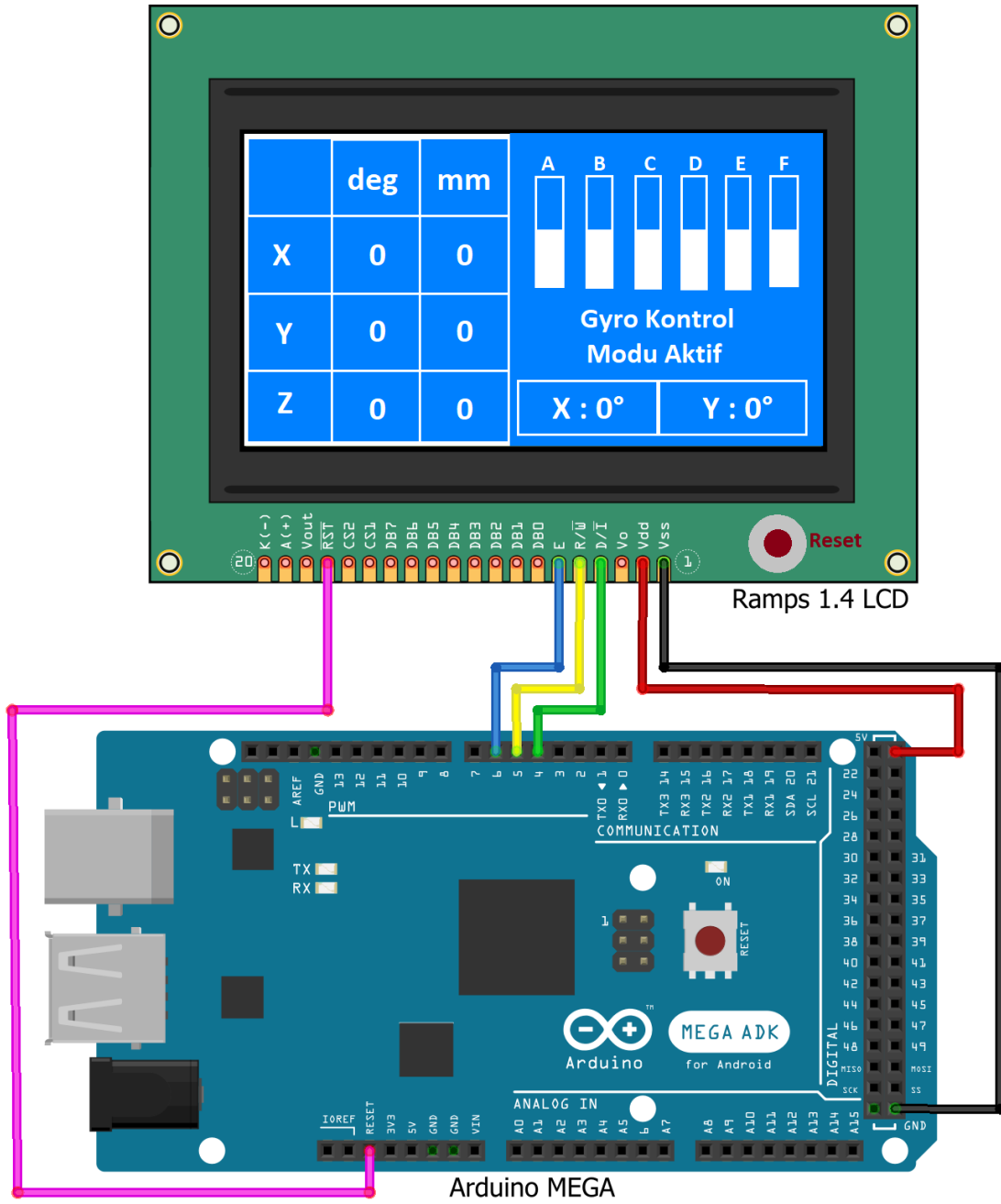
5.5. Kullanıcı Arabirimi Bağlantısı

Bu tez çalışmasında LCD ekran, manipülatör açma değerlerini ve sistemin hangi modda olduğunu çıktı olarak vermek için kullanılmıştır. 128x64 piksel çözünürlüğe sahip LCD ekranda yazı, resim ve şekiller çözünürlük parametresi yüzeyinde ekrana yazdırılabilir. LCD ekranda arka ışığın parlaklık ayarı üzerindeki ayarlı direnç ile değişebilmektedir. Zemin mavi ve yazı rengi ise beyazdır. Çizelge 5.6.'da LCD ekranın özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. LCD panelin teknik bilgileri

LCD Panel Özellikleri	
Üretici Firma	Winstar
Dokunma	Dokunmatik Değil
Çözünürlük	128 x 64
Denetleyici	NT7108
Nokta ebadı (mm)	0.39 x 0.39
Genişlik - Yükseklik - Kalınlık (mm)	75.00 x 52.70 x 8.90
Görüntüleme Alanı (mm)	58.80 x 31.40
Arka ışık / Renk	LED / Beyaz
LCD Modu	STN Negatif Mavi
Tipik Besleme Gerilimi	5V
Arayüz	6800
Çalışma Sıcaklığı	-20°C ~ + 70°C

LCD ekranı kontrol etmek için Şekil 5.22.'de de görüldüğü üzere bağlantısı yapılmıştır. Arduino Mega pinlerine bağlanan LCD ekran talepleri yeterince karşılanmıştır. Ekranda açısal hareketler deg (derece) sütununda, doğrusal hareketler ise mm (milimetre) sütununda gösterilmiştir. Her ekseninde (x , y , z için) hareket ilgili satırında gösterilmiştir. Sistemde Gyro kontrol ve kontrol kolu ile kontrol modları da ekranda gösterilmektedir. Sağ alt köşede sabit zeminin x ve y açıları anlık olarak ekrana çıktı olarak verilmektedir.

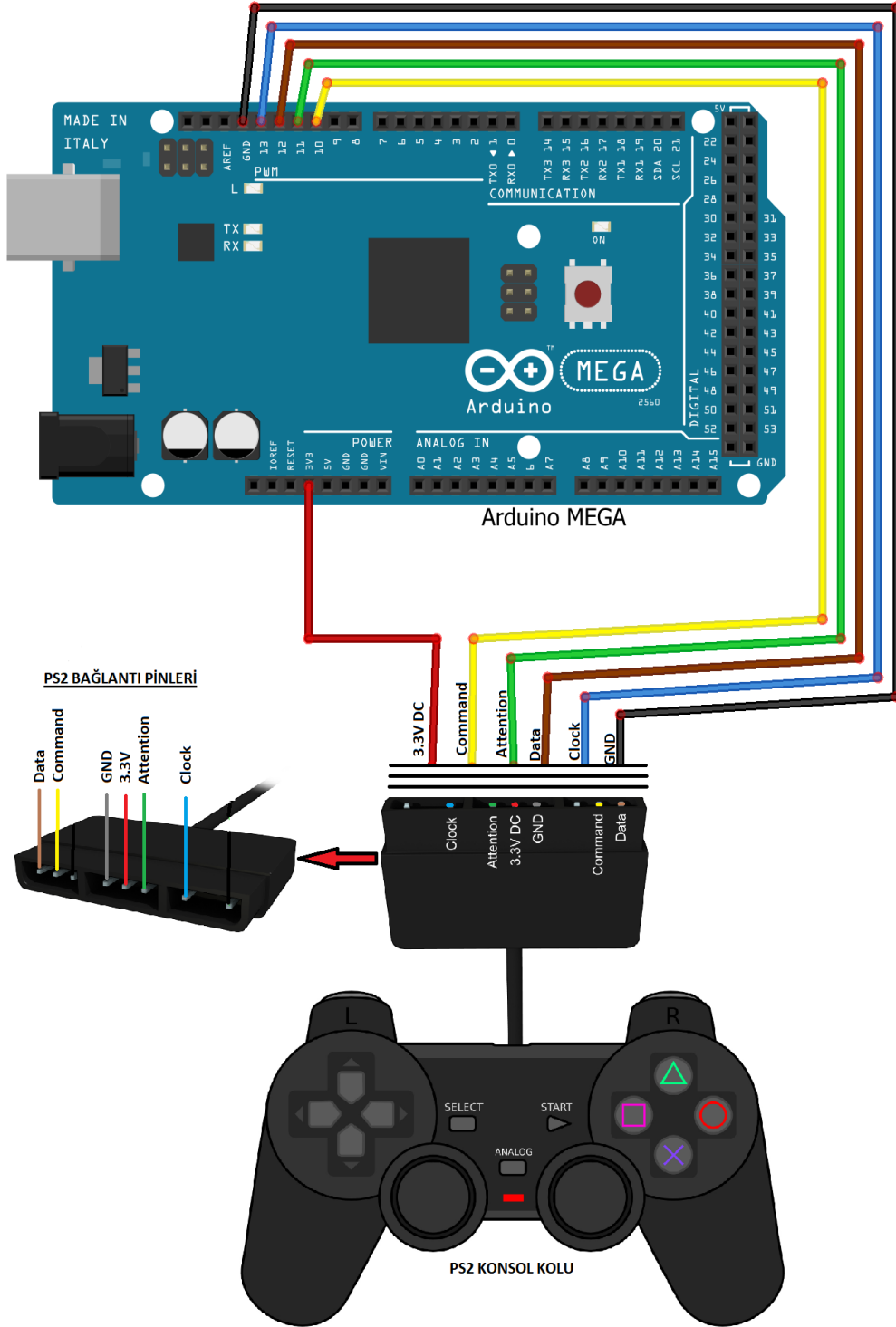


Şekil 5.22. LCD ekranın arayüz tasarımı ve arduino ile bağlantı şeması

5.6. Kontrol Kolu ve Bağlantıları

Bu tez çalışmasında yapılan kontroller kablolu kontrol kolu ile gerçekleştirilmektedir. Kullanılan kontrol kolu oyun konsolları için üretilmiş bir joystick sistemidir. Burada kullanıcı kontrol kolunu kullanırken bastığı tuşlar için veri sinyalleri oluşmaktadır. Bu sinyaller kontrol kolu tarafından alıcı sisteme gönderilmek üzere işlenir ve daha sonra komutlar halinde alıcıya veri iletilir. Bu sistem kontrol kolu yapıları bakımından iki farklı kategoride incelenir. Bu kategoriler analog çalışan kontrol kolları ve dijital çalışan kontrol kollarıdır. Dijital kontrol kol yapısı bakımından x , y koordinatlarında dörtlü şekilde duran tuşlardan herhangi birine basıldığı anda kontrol kolunun iç yapısında bulunan devre kartında kısa devre oluşur. Bu basılma durumu bir komut halini alır ve alıcı gelen bu komuta göre işlem yapar. Dezavantaj olarak z koordinatında kullanıcının butonla sistemi kontrol etmesi oldukça zordur. Analog kontrol kolları yapısı itibarıyla kendi içinde alt iki sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflandırmalar rezistif ve endüktif olarak tanımlanırlar.

Rezistörlü (rezistif) kontrol metodu kullanılarak kontrol kolunun yaylı yapısına göre kullanıcıdan kontrol çubuğuna verilen eğim miktarına göre çıkış birimindeki direnç değişimi durumu ile iki ekseninde farklı analog değerler okunmaktadır. Diğer bir yöntem ise endüktif etkili kontrol yöntemidir. Bu yapı içerisinde kontrol kolu içerisinde iki ekseninde de (x , y) farklı mıknatıslar ve bobin sistemi bulunur. Kullanıcıdan alınan hareketlere göre kontrol edilen manyetik alan etkili çubuğun elektriksel etkisi ile x ve y verileri alınır. Sistemimizde rezistif etkili bir yapı kullanılmış olup 0-255 arası analog veri alınabilmektedir. Analog kolun normal duruşunda alınan veri orta değer olan 127'dir. Şekil 5.23.'te kontrol kolunun Arduino Mega mikrodenetleyici kartına bağlantısı diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 5.23. PS2 pin yapısında kolun doğrudan Arduino Mega ile bağlantıları

5.7. Güç Kaynağı ile Sistemin Beslemesi

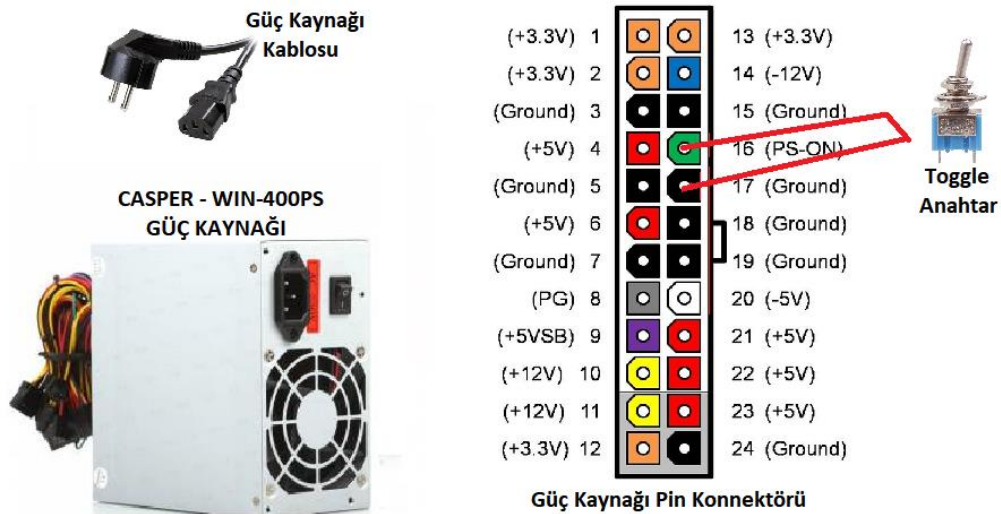
Bu tez çalışmasında sistemin elektriksel güç ihtiyacını karşılayabilmek için, bilgisayar kasalarında kullanılan WIN-400PS modelinde 400W'lık bir güç kaynağı kullanılmıştır. Güç

kaynağının 5V ve 12V besleme çıktılarından faydalanılmıştır. Kararlı çalışması ve motorların çektiği akıma karşı stabil olması sebebiyle tercih edilmiştir. Kart beslemelerinde 5V kullanılmış ve motor beslemeleri için ise 12V kullanılmıştır. Çizelge 5.7.'de güç kaynağının teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.7. 400 Watt besleme kaynağı hakkında teknik bilgiler

Nominal Güç Değeri	400W
Renk	Gri
Tip	ATX 12V
Soğutma Sistemi	12cm Fan
Boyutlar	140 x 150 x 86mm
Koruma	Yüksek-Düşük Gerilim / Güç ve Kısa Devre Koruması
Max. Çıkış Değerleri	12V 18A, +5V 40A
Güç Çıkışları	12V ve 5V
Ürün Kodu	WIN-400PS

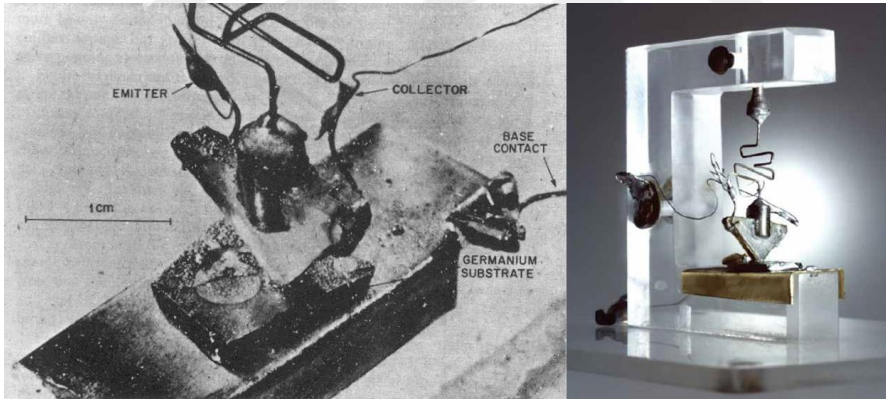
Güç kaynağının çıkış konnektöründen 5V ve 12V alınacak şekilde bağlantı yapılmıştır. Konnektörün 16 numaralı PS-ON pinine Toggle Anahtar bağlanarak GND pini ile bağlantısı sağlanarak çıkıştaki gücün devreye alınması veya devreden çıkarılması gibi işlemler yapılır. Şekil 5.24.'te konnektör pin yapısı ve WIN-400 PS güç kaynağı gösterilmiştir.



Şekil 5.24. Güç kaynağının görünümü ve PS-ON pini ile çalıştırılması

6. YAZILIMSAL KONTROL SÜRECİ

Düşünme yeteneği canlıların bilişsel yetenek göstermesi durumu olarak bilinmektedir. İnsanoğlu icat ettiği birçok yeni alette veya cihazda geçmişten günümüze kadar hep bir faydalılık beklemiştir. Bu durum insana yardımcı olan cihazlar ile başlayarak, insanın yapacağı şeyleri otomatik olarak yapabilir mi fikrini ortaya çıkarmıştır. Bundan 1 asır öncesine kadar icat edilen cihazlara ya da makinalara mekanik birtakım yöntemler ile bazı sıralı işlem fonksiyonları eklenebildiği bilinmektedir. Bu durum elektrikli sistemlerden, elektronik kontrol sistemlerine geçiş sürecine geçerek daha da kontrol edilebilir bir hal almıştır. Elektronik tekil anahtarlama elemanı olan transistörün icadı bu konuda bir devrimdir. Günümüzde kullanılan yonga seteri ve işlemcilerin içerisinde milyonlarca transistör bulundurmaktadır. Transistör içyapısında bulunan yarıiletken yapı sayesinde akımın geçişini anahtarlayabilecek yapıdadır ve bu şekilde yönetilmektedir. İlk transistör 1947 yılında Bell telefon şirketi tarafından geliştirilmiştir (Şekil 6.1.).

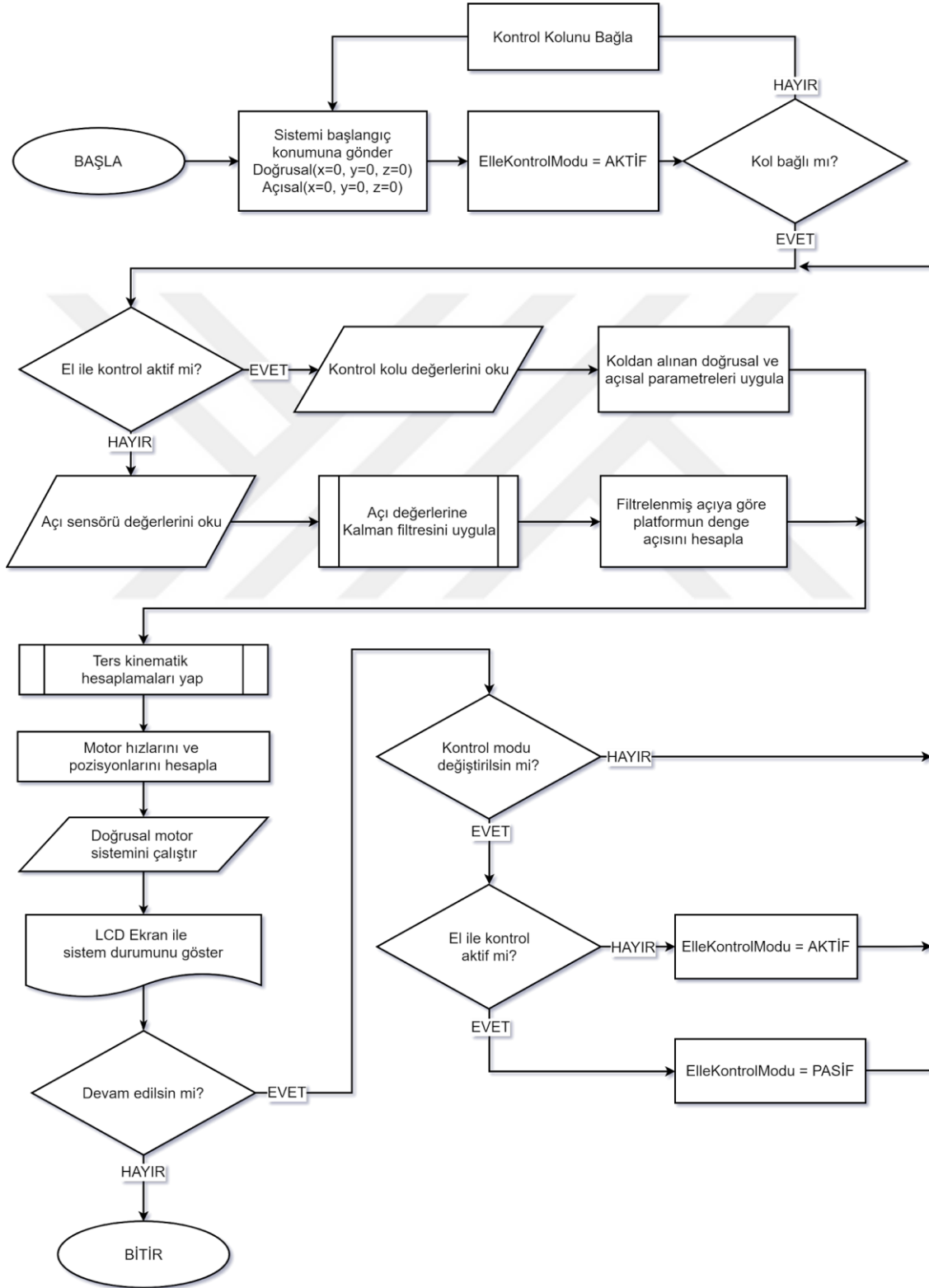


Şekil 6.1. Bell laboratuvarlarında geliştirilen ilk transistör (1947)

Yonga setleri mimarisine göre yüklenen makine kodları sayesinde birçok aritmetik ve matematiksel işlemi yerine getirir. Bu çalışmada kullanılan Arduino Mega ve Arduino nano gibi denetleyici kartlar da üzerlerinde programlanabilir çipler bulundurmaktadır (ATmega 2560 ve ATmega 328P işlemcileri). Bu sayede yazılımsal olarak algoritmalar kurularak ve uygun dilde kod yazılıp işlemciye yüklendiğinde istenilen görevi yerine getirmek mümkündür.

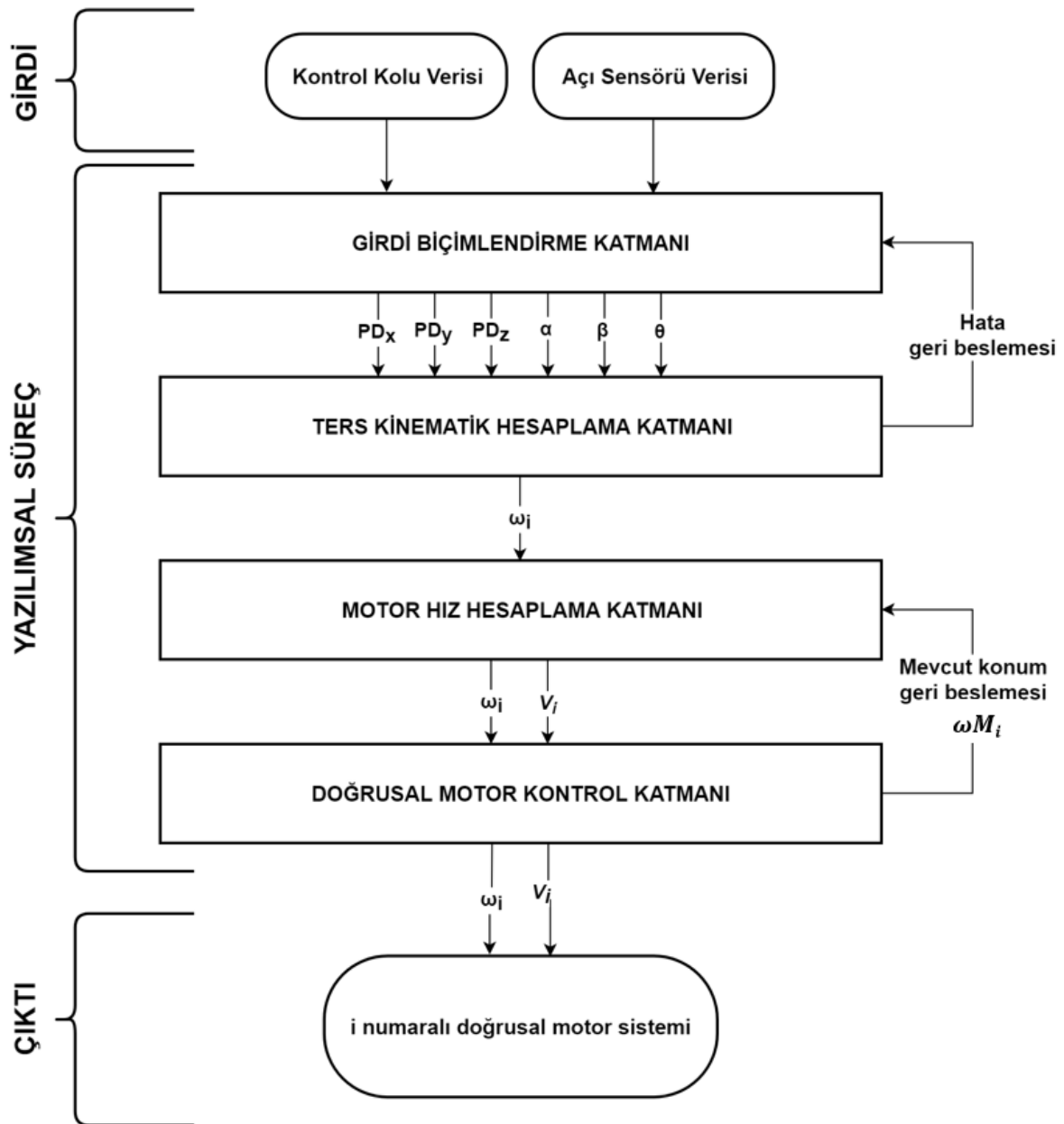
Prototipi geliştirilen sistemde kullanılan cihazlar programlanırken en temel bilgisayar programlama dili olan C programlama diline benzer yapıda olan Arduionun kendi programlama dili kullanılmıştır. Fakat özel donanım kullanımı sağlanan bazı gömülü

kısımların arkasında kontrol ve interruptlarının sağlanması için Python ve C++ gibi dillerden de faydalanılmıştır. Programlama sürecinde öncelikle sistemin çalışma süreci akış diyagramı ile tasarlanmıştır. Platform sisteminin kontrol sürecinin genel akış diyagramı Şekil 6.2. ile gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Genel çalışma sürecine ait akış diyagramı

Sistemdeki girdi parametreleri olan açı sensörü verileri ve kontrol kolu verileri yazılımsal olarak doğrusal veya açısal hareket parametrelerine dönüştürülür. Kinematik hesaplamalar yapılırken genelde değişken girdi parametreleri bunlardır. x , y , z eksenleri için sırası ile PD_x , PD_y ve PD_z doğrusal, α , β , θ ise açısal girdi parametrelerini ifade etmektedir. ω_0 , ω_1 , ω_2 , ω_3 , ω_4 ve ω_5 motor açıklıkları hesaplanır ($i = 0..5$ için i . motorun açıklığı ω_i olarak da gösterilebilir). Motor açıklıklarının motorlara gönderilmesinden önce her motorun hedef konuma varması için gereken hızı (V_i) hesaplanır. Hız ve hedef konum bilgisi doğrusal motor kontrol katmanı ile motorların harekete geçmesi sağlanır (Şekil 6.3.).



Şekil 6.3. Çalışma döngüsü içerisindeki yazılımsal katmanlar

Şekil 6.3. ile gösterildiği gibi sistemin yazılımsal yaşam döngüsü dört temel katmanda gerçekleşmektedir. Bu katmanlar kendi içlerindeki fonksiyonlar ile kalmaya ait görevleri yerine getirmektedir. Girdi biçimlendirme katmanı kontrol kolu ve açı sensöründen aldığı verilere ait düzeltme ve normalizasyon işlemlerini yerine getirerek ters kinematik hesaplama katmanına açısal ve doğrusal parametreler olarak gönderir. Ters kinematik hesaplama katmanı girdiye göre hata denetimi yaparak her doğrusal motorun açıklığı olan ω_i değerini hesaplar. Hız hesaplama katmanında ise motorların mevcut konumdan hedef konuma gitmeleri için gerekli hız oranı ile ilgili hesaplamalar yapılır. Hız hesaplamaları için doğrusal motor sistemlerinin mevcut konumları geri besleme olarak alınır. En son katman ise doğrusal motor kontrol katmanıdır bu katman motorların sürücülerine gerekli PWM sinyallerini istenilen pulse miktarı ile birlikte göndererek doğrusal motorun istenen hızda istenen konuma varmasını sağlar. Bu sayede tüm motorlar hedef konumlarına eşzamanlı olarak varır ve platformun geçiş hareketleri daha yumuşak gerçekleştirilir.

6.1. Sistemin Benzetiminin Gerçekleştirilmesi

Bu tez çalışması kapsamında yapılan prototip cihazın tasarımı ve gerçekleştirilmesi öncesinde iskelet sistem bilgisayar ortamında benzetimlenmiştir. Benzetim, bilgisayar teknolojilerinde kullanılan anlamı ile bir sistem üretilmeden önce dijital ortamda modellenmesi olarak tanımlanmaktadır. Tez gerçekleştirme aşamasında yapılan literatür genel olarak, paralel mekanizmalar ile ilgili çalışma yapan yazarların benzetimde buldukları gözlemlenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen tasarım için tip sentezleme yapılarak matlab ortamında sistemin çalışma uzayının çıkarımını sağlamak için sistemdeki doğrusal motor sistemlerinin konumları, yerleşimi, platformun ters kinematiğe göre hesaplamalarının yapılması sağlanmıştır. Sistemin hareketleri bilgisayar ortamında animasyon şeklinde izlenmiştir. Tasarımdaki gerekliliklerin en uygun şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır.

6.2. Doğrusal Motor Sistemi Kontrolü

Mekanik işlevsellik istenen sistemlerin tümünde doğrusal veya açısal hareket kaynağı olan motorlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu motorlar elektrik, basınç gibi birçok enerji kaynağını dönme veya öteleme hareketine dönüştürmektedir. Motor sistemleri bu anlamda sistemde kas görevi görmektedir. Motorların işlevselliğine göre ve kullanım alanına göre birçok çeşidi

bulunmaktadır. Prototipi gerçekleştirilen doğrusal motor sisteminde konum hassasiyeti nedeni ile step motor kullanımına karar verilmiştir. Sistemde kullanılan motorlar Nema 17 tipi genellikle 3B yazıcılarda sıkça kullanılan bir motordur. Step motor içerisinde bulunan iki adet bobine gönderilen elektrik sinyallerinin sırası ve yönü ile motorun mıknatıslı rotorunun kontrollü şekilde hareket etmesini sağlar. Bobinlerdeki her bir akımsal değişim motorun adım hareketini sağlar. Bobinlere gönderilen sinyaller keskin dijital veriler olduğunda motor 200 pulse ile tam turunu tamamlar. Bu sinyal durumu sinüzoidal yapıda ve farklı fazlarda verilir ise bu durumda motorun 200 değil de 400, 800, 1600, 3200 gibi 2 üssü mikro adım kademesi ile çarpılan değer kadar sinyalde tam turu tamamlaması sağlanır. Bu durumda motorun hareket çözünürlüğü daha da artar, hızı yavaşlar ve bir o kadar da bununla orantılı şekilde torku artmış olur.

Step motorun normal veya mikro adım teorisine göre sürülmesi için elektronik sürücü devre kartı kullanılmıştır. Bu kart üzerinde denetleyiciden alınan sinyaller ile motoru yönetmek için 2 adet pin kullanılmaktadır. Bu pinlerden biri “DIR” diğeri ise “STEP” pinleridir. İki pine de denetleyici tarafından yalnızca dijital olarak 1 veya 0 sinyali gönderilebilmektedir. DIR pini kendisine gönderilen sinyale ile motorun döneceği yön tayinini gerçekleştirir. STEP pini de gönderilen her darbe sinyali için motorun bir adım atmasını sağlar. Bu şekilde sürücünün mikro adım ayarına göre motorun konumlandırılması ve kaç tur attığı ya da kaç tur atmak için ne kadar sinyal göndermek gerektiği arasında bağıntı kurulabilir.

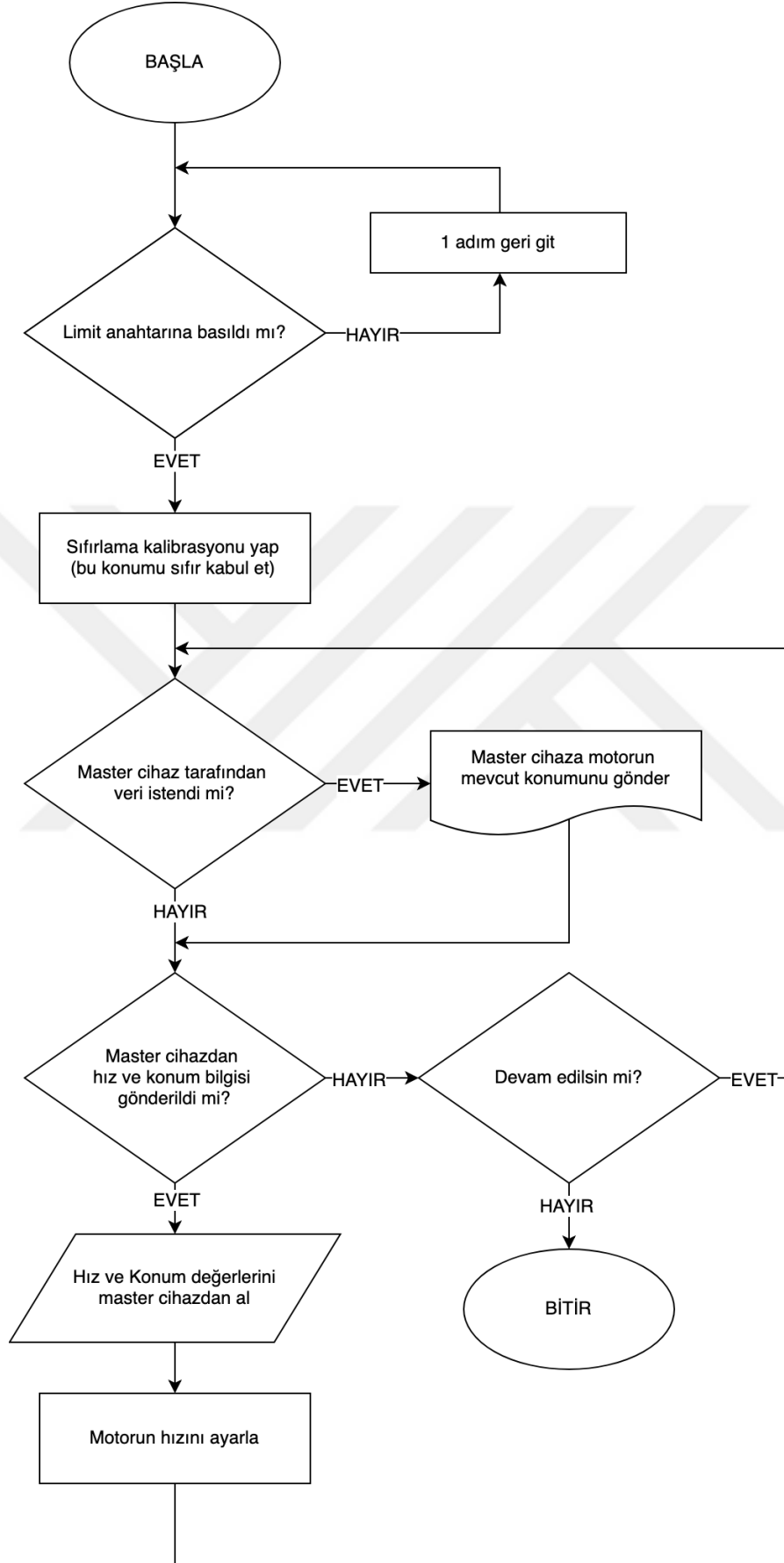
Step motorlar çalışmaya başladıkları anda nerede olduklarını bilmeyen hantal bir yapıları bulunmaktadır. Bu nedenle doğrusal motor sistemi üzerinde başlangıç konumunu tanıtmak amaçlı bir limit anahtarı kullanılmıştır. Bu anahtar sayesinde motor çalışmaya başladığı anda denetleyici tarafından bu anahtara basana kadar doğrusal hareketi sağlar. Anahtara basıldığı konumu hareket eksenine göre orjin kabul eder. Sonraki hareketleri de buna göre konumlandırılır.

6.2.1. Doğrusal motor sisteminin çalışma döngüsü ve kontrol algoritması

Sistemdeki kinematiği sağlamak amaçlı step motordaki dönme hareketinin doğrusal harekete çevirildiği bir sistem tasarlanmıştır. Master ve Slave yapısındaki kontrolcüler bu süreçte birbirleri ile haberleşerek motor konumu ve hızının ayarlanmasını sağlar. Step motorlar geribildirim sağlamadıkları için sisteme ilk enerji verildiğinde kalkış konumunu

bilinmemektedir. Bu sebeple doğrusal motor sisteminin bir ucu sıfır noktası kabul edilmektedir. Bunun için sınır anahtarı kullanılmıştır. Motor sistemi başladığında bu sınır anahtarı ile başlangıç konumunu tanır. Step motorların kontrolü ile slave yetkisi tanımlanmış Arduino nano'lar sorumludur. Sistemde toplamda 6 adet doğrusal motor sistemi bulunmaktadır ve her sistem bir adet Arduino nano ile sürüldüğü için paralel iş bölümü gerçekleştirilmiştir. Arduino nano'ların her biri, kendisine master yetkisindeki ana cihaz olan Arduino Mega'dan komut gönderilmesi ile motorları sürer. Sistemin düşünen beyni master cihazdır. Master, tüm sistemin genel koordinasyonunu sağlar. Master'ın komutları ile çalışan paralel işlem sürecinde doğrusal motor sisteminin koordinasyonu slave cihaz tarafından yapılır. Şekil 6.4. ile doğrusal motor sistemi olan slave cihazın çalışma döngüsü gösterilmiştir.





Şekil 6.4. Slave cihazın doğrusal motor sistemi kontrolüne ait çalışma döngüsü

Burada temel olarak görünüyorki slave denetleyici cihazı sürekli olarak motorun hareketleri ile ilgilenmektedir. Hiçbir şekilde kinematik hesaplama ya da diğer cihazlar ile (kontrol kolu, lcd ekran vb.) hiçbir alakası yoktur. Bu da işlemcinin pwm kullanım performansını arttırarak motor sürücüsüne yüksek frekanslı olarak sürücü sinyalinin gönderilmesini sağlar. Paralel işlem olmadan tek başına Arduino Mega ile de motorlar sürülebilirdi. Fakat yapılan testlerin sonucunda yalnızca bir kaynaktan çok kanallı (6 motor olduğu için 6 kanal) sistemde yüksek frekanslı PWM sinyali üretilmesi için işlemcinin de ona göre güçlü olması gerekmektedir. Gömülü sistemler için ideal olan sürücüler tek başlarına bu durumda yetersiz kalabilmektedir ve çok kanallı yüksek PWM ihtiyacına karşı yetersiz hızda olmaktadır. Bu durumun önüne geçmek amaçlı en önemli nokta olan paralel işlem teorisi kullanılmıştır. Her bir motorun kendisi ile sorumlu bir gömülü sistemi bulunmaktadır. Kontrol sürecindeki yaşanan hız probleminin önüne geçilmiştir.

6.2.2. Doğrusal motor sisteminde konum bazlı hesaplama

Hassasiyetin gerekli olduğu birçok kinematik sistemde konum veya pozisyon ayarlaması yapmak büyük bir ihtiyaçtır. Bu amaçla kullanılan motorlarda genellikle encoder ile geri besleme alınarak konumun bilinmesi sağlanır. Prototipi geliştirilen sistemin genel kullanım amacı çalışma uzayının incelenmesi amaçlı olduğu için motorların yük altında çalışması durumu senaryolaştırılmamıştır. Sistemde kullanılan motorların $59N/cm$ gücüne sahip olması ve adım adım konumun ayarlanabilmesi durumları göz önünde bulundurulduğunda kullanılan step motorlara ek olarak bir konum geri beslemesi yani encoder bağlanmamıştır. Yalnızca başlangıçta sıfırlama kalibrasyonu yapılmıştır bunun için de limit switch kullanılmıştır.

Step motorlar yapısı gereği hassas konumlandırma yapabilmektedir. Bu hassasiyet mikrostep modları ile belirlenmektedir. Aslında mikrostep modunda farklı farklı hassasiyetler var ama her bir kademedeki hassasiyet kendisinden bir önceki hassasiyetin yarısı kadar hareket etmeyi sağlar. Bu sayede bir darbe sinyali ile tek adım atacağına; ayarlanan mikrostep moduna göre yarım, çeyrek ve onun yarısı gibi adım atarak ilerler. Prototip sistemde kullanılan step motor normal durumda (1 darbe sinyali ile 1 tam adım durumu) tam 200 adım ile 360° 'lik bir tam turu tamamlamış olur. Bu durum yarım adım ayarlanmış mikrostep modu için 200 değil de 400 darbe sinyali ile 360° dönmesini sağlar. Bu durum denklem (6.1) ile gösterildiği gibi formülize edilir. Motorun bir tam adımını STP

ile ifade edilir. STP değerinin katsayısı çalışmada kullanılan motor için 1,8 'dir ($STP = 8mm$).

$$[Motorun\ Dönme\ Açısı] = [Mikrostep\ Modu]^{-1} \cdot [Darbe\ Sinyali\ Sayısı] \cdot STP \quad (6.1)$$

Motorun miline ait tur hesabı bu şekilde yapılır. Burada mikrostep modu kapalı ise 1 değerini alır. Yarım tur için 1/2, çeyrek tur için 1/4 gibi 1/8 ve 1/16 değerlerini alabilmektedir. Bu değerleri ayarlamak için motor sürücüsü üzerinde fiziksel olarak elektronik ortamda pinler kısadevre edilir veya açılır. Motorun miline bağlı bulunan trapez vidalı mil motordaki dönme hareketini somun ile vidanın doğrultusunda doğrusal harekete çevirir. Bu hareketin miktarını etkileyen en önemli diğer parametre ise trapez vidaya takılı olan somunun bir tam turdaki hareket miktarı ile belirlenir. Prototip cihazda kullanılan vidaya göre düşünülür ise bu ölçü bit turda 8mm 'dir. Buradan yola çıkarak motorun dönme açısı ile öteleme miktarı arasında aşağıdaki eşitlik çıkmaktadır;

$$[Öteleme\ Miktarı] = \frac{[Motorun\ Dönme\ Açısı] \cdot 8}{360} \quad (6.2)$$

Denklem (6.2) ile gösterildiği gibi motorun dönme açısı tam tur açısı olan 360'a bölünerek kaç tur dönüş yaptığı hesaplanır. 8 ile çarpılarak ise bir turda 8mm hareket ettiği için atılan tura göre kaç mm hareket ettiği hesaplanmış olur. Burada belirtilen öteleme miktarı, tez çalışması içerisinde kinematik hesaplamalarda belirtilen w_i motor açıklığını vermektedir.

6.2.3. Step motorların geri beslemeli hız kontrolünün gerçekleştirilmesi

Paralel mekanizmalar kinematik olarak işlevleri yerine getirmekte ve bu aşamada eyleyici olarak kullanılan motor sistemlerini sıralı veya eş zamanlı farklı hızlarda çalıştırması gerekebilmektedir. Bu durumlarda rassal hız ayarlaması ya da sıralı hızlanmaya göre değil de, tümleşik sistemde bulunan tüm motor sistemlerinin birbirlerine göre hızlarını ayarlamaları gereken durumlar ortaya çıkmaktadır.

Prototipi geliştirilen sistemde altı adet doğrusal motor sistemi yani eyleyici sistem bulunmaktadır. Bu sistemlerin her biri farklı denetleyiciler (slave cihaz olan Arduino nano) ile paralel işlem protokolüne göre sürüldüğü için aralarındaki iletişim ve bağıntıyı master

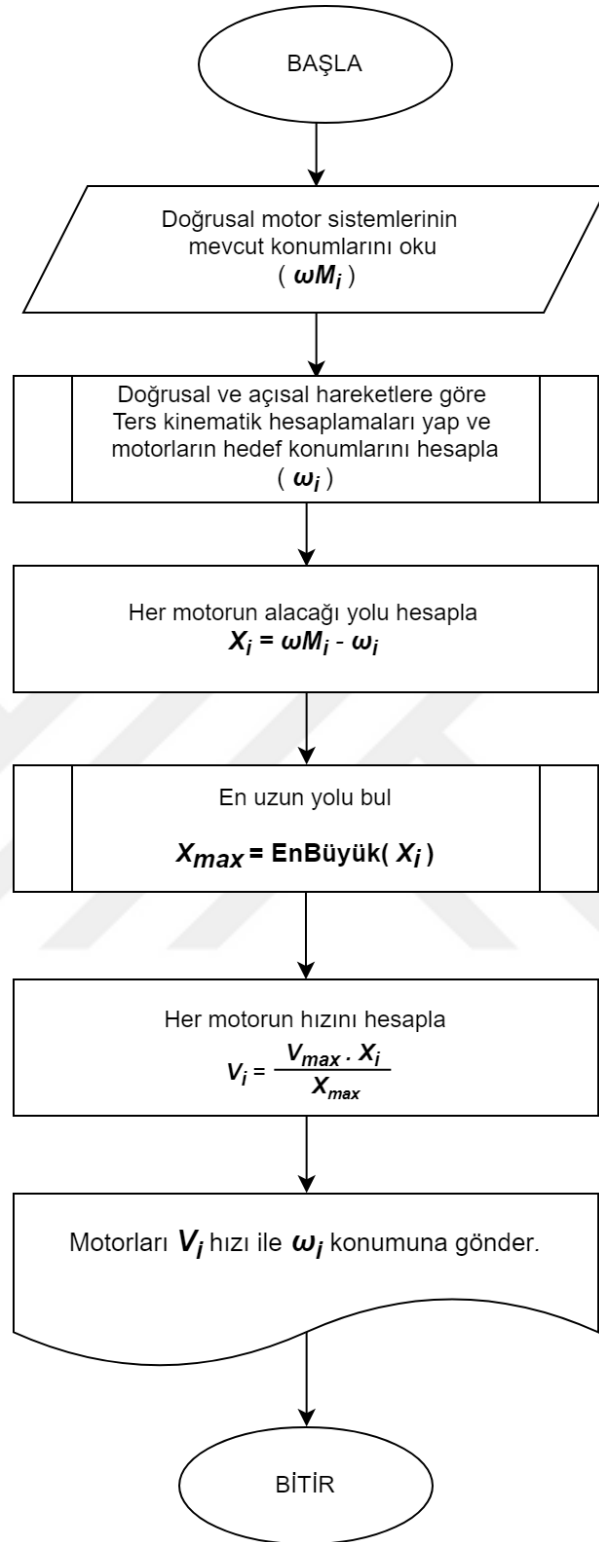
cihaz sağlanmaktadır. Hareketli üst platforma göre yapılan kinematik hesaplamalara göre motorların her birinin gitmesi gereken konum master ile hesaplanmakta ve motorların o konuma sürülmesi için slave cihaza komutlar gönderilmektedir. Şuanki aşamada komut olarak motorlara yalnızca gitmesi gereken konum bilgileri gönderilmektedir. Fakat bu bilgi platformun hareketi doğru bir şekilde yapması için yeterli değildir. Bu durum şu şekilde ifade edilebilir; altı adet motorun her biri için mevcut konum ve gitmesi istenen hedef konum bilgisi bulunmaktadır. Bu motorların bazıları yapılan kinematik hesaplama göre hedef konuma yakındır, diğerleri ise uzaktadır. Yakında bulunan motorlar görevi yerine daha erken getirir fakat hedefine uzaktaki motorlar için çalışma süreci devam etmektedir. Bunun önüne geçmek amaçlı tüm motor sistemlerinin hedef ile mevcut konumları arasındaki uzaklık yani motorun gitmesi gereken yolu bulunur. En uzun yola sahip motor en hızlı, diğer motorlar ise bununla orantılı olarak sürülür. Böylelikle sistem kinematik hesaplama göre her aşamada yaptığı hareketi tüm motorlar için aynı zamanda tamamlamış olur. Bu şekilde platformda yapılan hareketler daha da yumuşatılması ve ara geçişler sağlanmış olur.

Sistemde bulunan motorlara ait hızların hesaplanması adına motorların mevcut konumları (ωM_i) geri besleme olarak alınır. Ters kinematik hesaplamalar yapılarak motorların hedef konumları (ω_i) hesaplanır. Buna göre motorların her birinin alacağı yol bulunur ($X_i = |\omega M_i - \omega_i|$). Alınacak yollar bulunduktan sonra sistemdeki en uzun yol tespit edilir (X_{max}). Denklem (6.3) ile de motorların her birinin hızı hesaplanır.

$$V_i = \frac{V_{max} \cdot X_i}{X_{max}} \quad (6.3)$$

Denklemden gösterilen V_{max} değeri parametrik olarak yazılım tarafından verilebilecek maksimum hız değeridir. Bu değer motor sürücü entegresi ve slave gömülü kartın çalışma frekansına göre belirlenmiştir. V_{max} değeri 4000 olarak tanımlıdır. Bu formüle göre geçerli zaman dilimi içerisinde hedef noktaya en uzak olan motor için en yüksek hız yani 4000 tanımlanır. Diğer motorlar için bununla orantılı olarak hız değerleri alınır. Hesaplama sürecine ait adım adım akış diyagramı Şekil 6.5.'te gösterildiği gibidir.

i=0...6 için



Şekil 6.5. Doğrusal motor sistemi için hız hesaplama algoritması

Tüm bu hesaplamaların sonucunda platformun çalışma uzayı içerisindeki tüm yönelimleri yapılan hesaplamalara göre daha yakın hale getirilmektedir. Bu sayede doğrusal hareketlerdeki eksen kaçıklığı en aza indirilmiştir. Bu gibi ek işlemler kinematik

hesaplamalar dâhilinde de gerçekleştirilerek sistemin hareketleri sonucunda verimliliği daha da arttırılabilmektedir.

6.3. Açı Sensörü ile Kontrol

Paralel mekanizmalar günümüzde birçok alanda yaşanan problemlere uzun vadeli çözüm sunan yenilikler doğurmaktadır. Benzetim sağlamak veya sönmlemek gibi kavramlar da bu yeniliklerin başında gelmektedir. Benzetim sayesinde bir gerçek yaşam problemindeki uzaysal hareketler serbestlik derecesi dâhilindeki kinematik hesaplamalar ile laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilir. Bu, birçok senaryoyu test etmeyi sağlar ve kontrollü olarak tekrarlanması mümkün kılınır. Bu sayede birçok anlamda kazanç sağlanmış olur. Buradan yola çıkarak benzetim; normal koşullarda olmayan ya da tekrarlanması maliyet ve vakit kaybı gibi süreci geri yönde etkileyecek durumlarda istenen bu fiziksel hareketin oluşmasını sağlamaktadır. Bu duruma tam anlamı ile paralel manipülatörün üzerine bir uçak maketi ve bilgisayar destekli simülasyon yazılımları eklenmesi ile pilotluk eğitiminin verilmesi örnek olarak verilebilir. Sönmlemek ise tam anlamı ile tersini ifade eder. Ortada gerçekleşen bir uzaysal hareket vardır. Bu hareketin tersi yönde bir etki veya hareket oluşturularak bu hareket neredeyse yokmuş gibi bir sonuç elde edilir. Bu duruma ise dalgalı denizde yolcu gemisine insanlar binerken veya inerken, geminin üzerine eklenmiş bir platformun iskeleye göre sabit durması sağlanarak yolcuların gemiye daha güvenli şekilde binmesi örnek verilebilir. Burada ivme ve açı ölçümleri yapan sensörlerden faydalanılır. Ölçülen ivme ile sabit konumda durup durmadığı algılanır. Açı verisi ile ise zemine göre yapılan açıyı verir. Zemindeki yapılan ölçümler, hareketli platforma ters kinematik hesaplamaları ile uygulanarak platformun daima dengede duruşunu sağlamak mümkündür.

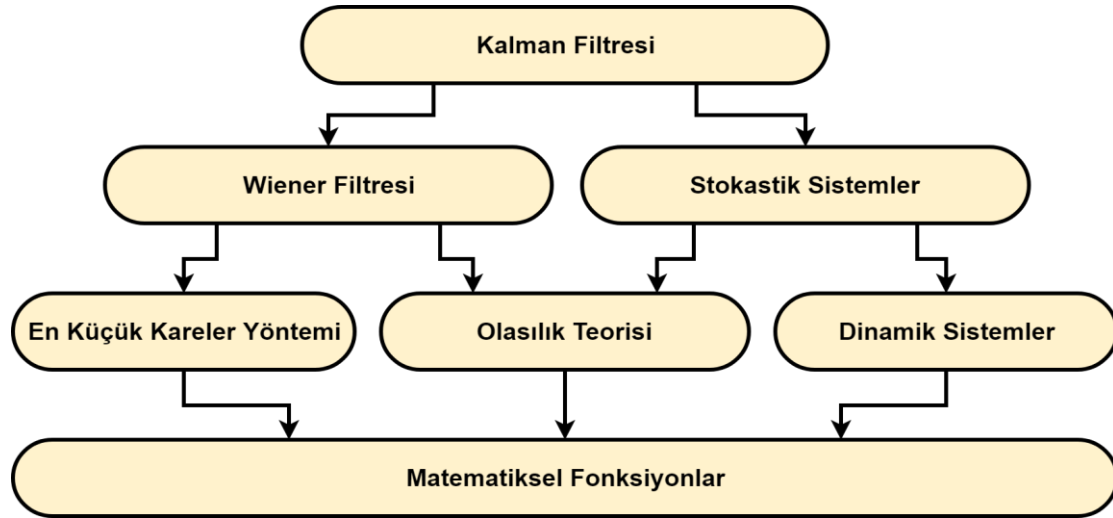
Elektronik alanda birçok sensör bulunmakta ve bu sensörlerden alınan veriler çoğu zaman temiz olmamaktadır. Sinyal verileri içerisinde gürültü barındırır ve bu olması istenmeyen bir durumdur. Bunun için birçok sinyal temizleme yöntemi ve algoritması bulunmaktadır. Geliştirilen prototip sistem üzerinde kullanılan açı sensörü sistemin üzerine entegre durumdadır. Sistem üzerinde bulunan doğrusal motor sistemindeki step motorlarının çalışma esnasında oluşturdukları titreşimlerden kolayca etkilenmektedir. Bu nedenle yapılan ilk iş sensör ile titreşimli zemin arasındaki bağlantının, titreşimin sensöre ulaşmaması için süspansiyon edilerek titreşimin sönmmlenmesidir. Fiziksel olarak alınan önlemler ölçüm sonucunun mümkün olduğunca az gürültülü olmasını sağlar. Fakat tek problem titreşim

değildir. Aynı şekilde etrafta oluşan manyetik alanlar, radyo dalgaları ve sensör veri kablosunun yakınından geçtiği elektrik kabloları dahi çoğu zaman sensörün ölçüm verisinde bir parazit oluşmasına neden olur. Dış etkenlerden kaynaklı tüm sorunlar gözden geçirildikten sonra yazılımsal çözümleme yöntemlerine başvurulur. Ölçüm verisi yazılımsal birtakım algoritmalar ile temizlenerek istenilen amaç doğrultusunda kullanılabilir hale gelir. Bu süreç literatürde genel bir isim olan sinyal işleme olarak adlandırılır. Bu tez çalışmasında açıl sensörü ile ölçülen verideki asıl verinin görülmesine engel olan gürültü sinyalinin temizlenmesi için matematiksel bir altyapıya dayalı kalman filtresinden faydalanılmıştır. Tez çalışmasında prototip cihaz için hazırlanmış bir denge modu bulunmaktadır. Bu mod aktif edildiğinde hareketli üst platform açıl hareketler yaparak dengeyi sağlar ve zemine paralel duruşunu korur.

6.3.1. Kalman filtresi ile sinyalin işlenmesi

Kalman filtresi bir çeşit istatistiksel tahminleme metodudur. Rudolf Kalman tarafından 20. yüzyılın ortalarında geliştirilmiştir ve günümüzde de çok sık kullanılmaktadır. Bu filtre yazılımsal olarak kullanıma ve algoritmalarına dâhil edilmeye elverişli yapıdadır. Döngüsel çalışma alt yapısına sahiptir ve önceki sonuçlar ile sonraki iterasyona (zaman dilimine) ait verilerin tahmin edilmesini sağlayan güçlü bir tahminleme sunar. Bu tahminleme yöntemine göre doğrusal olarak alınan gürültülü veriler belirli bir iterasyona göre girdi olarak alınan verinin geçmişteki hesaplamalarına göre doğruluğunu tahmin etmeye yarar ve güncel değer tahminlemesini yapar. Filtre için kullanılacak veri; bir sensöre ait ölçüm verisi de, ses dalgaları üzerindeki parazitler ve hatta radar sinyalleri vb. olabilir. Filtre hesaplamalarında k geçerli iterasyonu ifade eder. Genel yapı şöyle de tanımlanabilir; bir önceki zaman diliminde yapılan $k - 1$ iterasyonu çözümlerinden faydalanarak geçerli iterasyondaki veriyi (k) tahmin etmek ve geçerli iterasyonun çözümlenmesi ile tahmin edilmiş veriye göre bir sonraki iterasyondaki ($k + 1$) iterasyonundaki verinin tahminini sağlamaktır. Her yeni iterasyona geçildiğinde k geçerli zamana ait indisi ifade etmektedir.

Kalman filtresinin en önemli özelliği kullanılacağı sisteme göre modellenebilir olmasıdır. Algoritma tasarımı sağlanırken matematiksel olarak en uygun şekle sokma sağlanır. Kalman filtresi gürültülü veri üzerinde özyinelemeli olarak tahmin ve düzeltme işlevlerini sürekli yerine getirir. Geçmişte yapılan tahminleme metodları kalman filtresinin alt yapısını oluşturmuştur. Bu yapı Şekil 6.6. ile gösterilmiştir [66].



Şekil 6.6. Kalman filtresinin altyapısı

Kalman filtresi sürekli olarak sonraki işlemde kullanmak üzere geribildirim parametresi üretirek kullanılır. Geri bildirim parametreleri $k - 1$ ile gösterilir. Kalman filtresine hesaplamalarında kullanılan parametreler ve açıklamaları Çizelge 6.1. ile gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Kalman filtresinde kullanılan parametreler ve açıklamaları

Parametre	Açıklama
K_k	Geçerli iterasyona ait kalman kazancı.
X_k	Geçerli iterasyona ait kalman tahmini.
X_{k-1}	Bir önceki iterasyona ait kalman tahmini.
P_k	Geçerli iterasyona ait hata kovaryansı.
P_{k-1}	Bir önceki iterasyona ait hata kovaryansı.
R	Kalman katsayısı.
Z_k	Geçerli iterasyona ait işlenmemiş ölçüm verisi.

Kalman filtresinin çalışması esnasında geribesleme parametresi olarak kullanılan veriler hata kovaryansı ve kalman tahminidir. Başlangıçta bu parametrelerin el ile tanımlanması gerekmektedir ($P_{k-1} = 1, X_{k-1} = 0$). Sonraki iterasyonlarda geri besleme verileri ayrıyeten hesaplanmaktadır. Sensör verileri doğrusal olarak bellekte tutulduğu için her bir veri farklı

bir iterasyonu ifade eder. Kalman filtresi hesaplamalarında her zaman son gelen veri k iterasyonu, bir önceki ise $(k - 1)$ iterasyonudur.

Hesaplama sürecine üç denklemden faydalanılır. Bunlardan birincisi kalman kazancını hesaplamak için kullanılan denklem (6.4)'tür. Kalman kazancını hesaplamak için kullanılır. Bu denklemde kalman kazancı (K_k); önceki iterasyona göre hesaplanmış hata kovaryansının (P_{k-1}), bu hata kovaryansına kalman katsayısının (R) eklenmiş haline bölünmesine eşittir.

$$K_k = \frac{P_{k-1}}{P_{k-1} + R} \quad (6.4)$$

İkinci denklemde ise kalman tahminlemesi yapılır. Denklem (6.5) ile gösterilmiştir. Burada işlenmemiş sensör verisi olan Z_k değeri ile $k - 1$ iterasyonunda hesaplanmış kalman tahmininin (X_{k-1}) farkının kalman kazancı ile çarpımına (K_k) önceki kalman tahmininin eklenmesi ile kalman tahmini güncellenmiş olur. Kalman filtresinin en önemli aşaması burasıdır. Z_k ölçüm değeri, sensör tarafından k anında ölçülmüş ham sinyali ifade eder. Bu sinyal üzerinde gürültüler ve sıçramalar bulunmaktadır. Gerçek hayatta fiziksel olarak mümkün olmayacak hızda değişim gösterir. Bu sebeple kalman filtresinin en önemli özelliği tahminlenen verinin değerinin geri bildirim olarak aldığı verilere göre orantılı hesaplamasıdır. Bu sayede gerçek hayat şartlarına göre gerçekleştirilebilir durumların tahminlemesi yapılır.

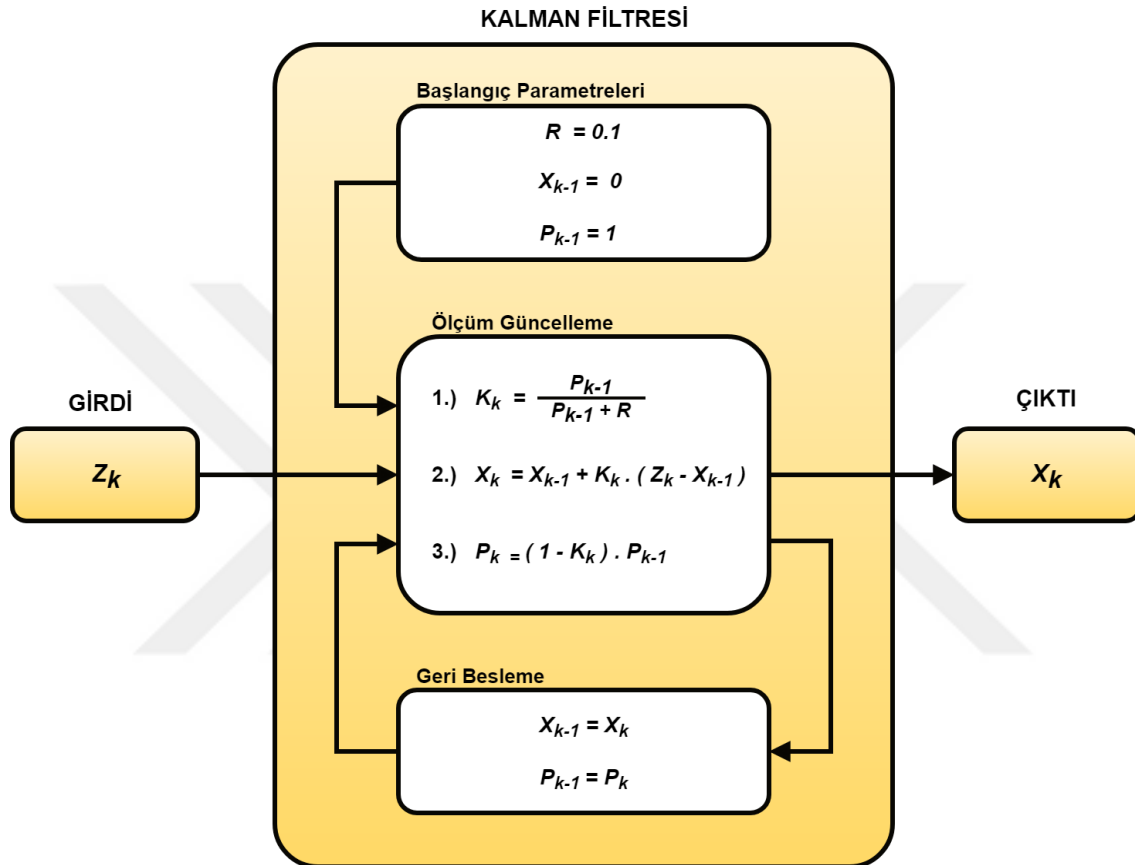
$$X_k = X_{k-1} + K_k \cdot (Z_k - X_{k-1}) \quad (6.5)$$

Bu aşamadan sonra sonraki iterasyonda kalman kazancını bulmak için kullanılmak üzere geri bildirim değeri olarak hata kovaryansı (P_k) hesaplanır (Denklem (6.6)). Bu denklem incelendiğinde geçerli iterasyonda denklem (6.4) ile hesaplanmış kalman kazancı (K_k) 1'den çıkartılarak $(1 - K_k)$ önceki iterasyondan geri bildirim olarak alınmış hata kovaryansı ile çarpılır ve k iterasyonuna ait hata kovaryansı hesaplanmış olur.

$$P_k = (1 - K_k) \cdot P_{k-1} \quad (6.6)$$

Kalman filtresinin çalışma sürecini en iyi anlamak için çalışma sürecini anlatan Şekil 6.7.'nin incelenmesi gerekir. Şekilde de görüldüğü gibi ölçüm güncelleme aşaması için

toplamda 3 girdi (1. veri sensöre ait Z_k , diğer veriler kendi içerisindeki geribesleme ve başlangıç parametreleri) bulunmaktadır. Her ölçülen veri için her seferinde yeni hesaplama yapılır. Girdi olarak k iterasyonunda ölçülen işlenmemiş sensör verisi Z_k için yapılabilecek en iyi tahminleme yapılarak çıktı olarak X_k değeri üretilir.



Şekil 6.7. Kalman filtresinin k iterasyonuna ait çalışma döngüsü

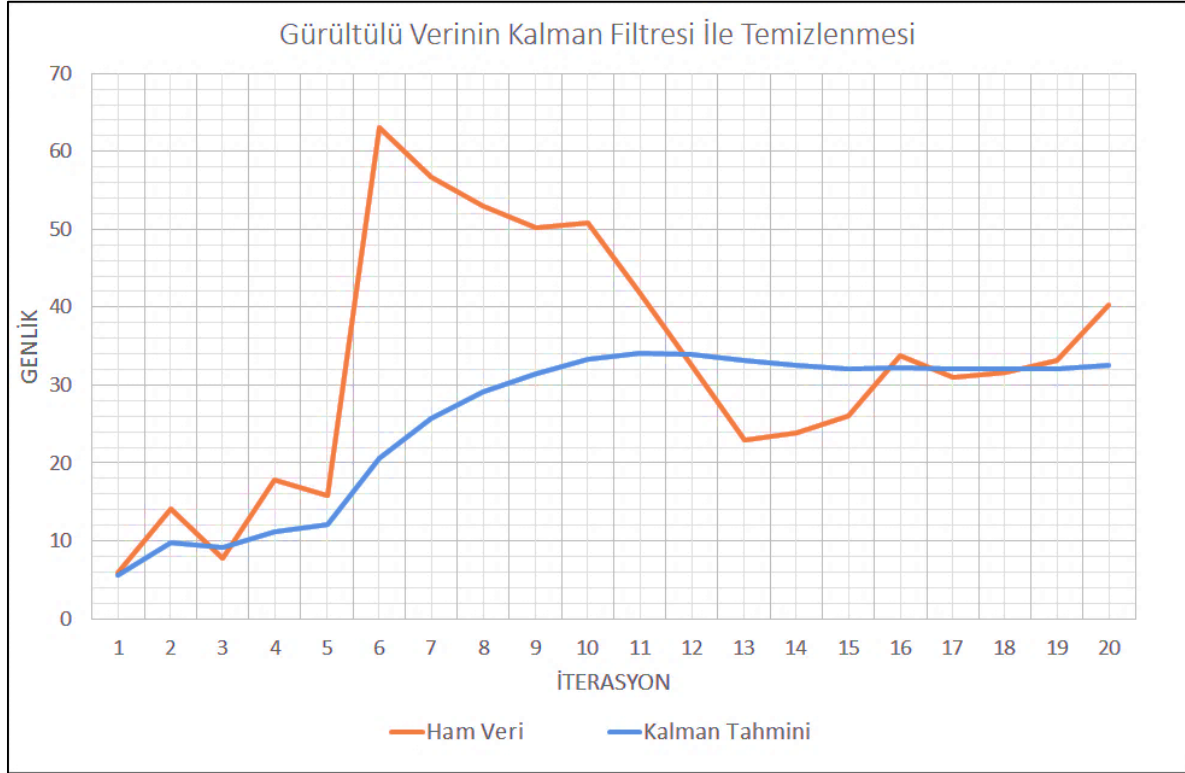
Örnek veriler ile kalman filtresinin çalışmasını ön izlemesini sağlamak amaçlı Çizge 6.2. ile gösterilen veriler gerçek denklemler ile hesaplanmıştır. Sistemin yapısı gereği başlangıç iterrasyonu olan $k = 1$ durumunda geribildirim olarak girilen önceki kalman tahmini ve önceki hata kovaryansı sırası ile 0 ve bir olarak girilmiştir. Buna göre her farklı zaman diliminde tahmin güncellenmiştir.

Çizelge 6.2. 20 adet örnek veri için kalman filtresi ile detaylı hesaplanmış çıktı tablosu

k İterasyon (Zaman Dilimi)	Girdi				K_k Kalman Kazancı	P_k Hata Kovaryansı	Çıktı
	Z_k Ölçüm Verisi	R Kalman Katsayısı (Sabit)	Geri Bildirim				X_k Kalman Tahmini
			X_{k-1} Önceki Kalman Tahmini	P_{k-1} Önceki Hata Kovaryansı			
1	5,88	0,1	0	2	0,952	0,095	5,6
2	14,1	0,1	5,6	0,095	0,488	0,049	9,746
3	7,79	0,1	9,746	0,049	0,328	0,033	9,105
4	17,76	0,1	9,105	0,033	0,247	0,025	11,242
5	15,85	0,1	11,242	0,025	0,198	0,02	12,154
6	63,05	0,1	12,154	0,02	0,165	0,017	20,567
7	56,71	0,1	20,567	0,017	0,142	0,014	25,694
8	53,03	0,1	25,694	0,014	0,124	0,012	29,089
9	50,2	0,1	29,089	0,012	0,11	0,011	31,422
10	50,76	0,1	31,422	0,011	0,1	0,01	33,346
11	41,9	0,1	33,346	0,01	0,09	0,009	34,12
12	32,53	0,1	34,12	0,009	0,083	0,008	33,988
13	22,9	0,1	33,988	0,008	0,077	0,008	33,139
14	23,91	0,1	33,139	0,008	0,071	0,007	32,482
15	26,07	0,1	32,482	0,007	0,066	0,007	32,056
16	33,83	0,1	32,056	0,007	0,062	0,006	32,166
17	30,93	0,1	32,166	0,006	0,059	0,006	32,094
18	31,56	0,1	32,094	0,006	0,055	0,006	32,064
19	33,22	0,1	32,064	0,006	0,052	0,005	32,125
20	40,33	0,1	32,125	0,005	0,05	0,005	32,534

Çizelge 6.2. incelendiğinde her bir dalgalanma yaşanan ham veri için bir sonraki tahminin yönünü ve artış miktarını ona göre asıl veriye yakınsadığı görülmektedir. Çizelge 6.2.

hesaplamalarındaki girdi ve çıktı sinyali Şekil 6.8. ile grafiğe aktarılmıştır. Grafiğe göre ham veri sinyalindeki sert iniş ve çıkışların yumuşatılmasının oldukça başarılı olduğu görülmektedir.



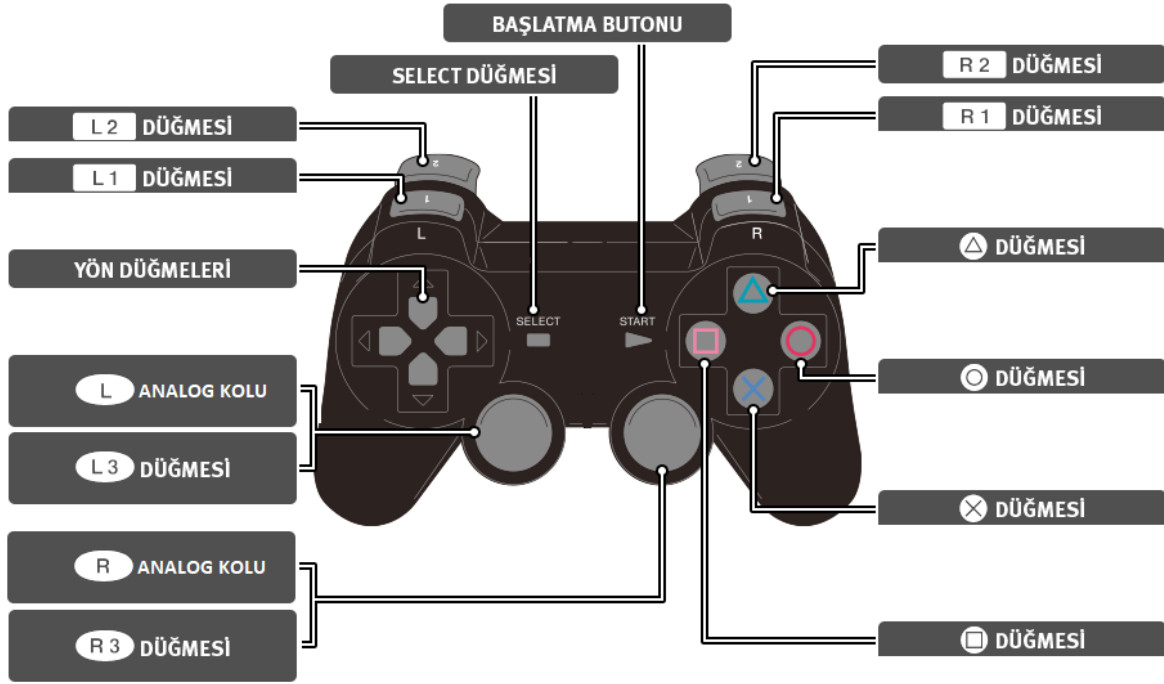
Şekil 6.8. 20 adet örnek veri için kalman filtresi girdi ve çıktı grafiği

Sonuçlar incelendiğinde görülüyor ki kalman filtresi gürültülü sinyallerin üzerinde bulunan gürültüyü azalttığı ve sinyali daha temiz ve yumuşak yaptığı görülmektedir. Sistemin daha karmaşıklaşması durumunda yüksek doğruluk oranına sahip sonuçlar almak için daha iyi bir modelleme yapmak faydalı olacaktır.

6.4. Kontrol Kolu ile Platformun Yönetimi

Gelişen teknoloji ile insan hayatına giren tüm elektronik ve elektromekanik sistemler bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu kontrol mekanizması yeri geldiğinde tamamen kullanıcıdan alınan komutlar ile çalışırken, zaman zaman ise yarı otomatik ya da tamamen otomatik kontrol sağlayabilecek seçenekler de sunmaktadır. Kontrol mekanizmaları bu neden ile kullanılacağı sistemin fonksiyonelliğini oldukça arttırmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında prototipi geliştirilen sistemde, konsol kolu kullanılarak sisteme girdi parametreleri uygulanmıştır. Sistemin kola ait gerekli tüm adaptasyonları sağlanarak doğrusal ve açısal hareketler sağlanmıştır. Kol üzerinde sağda ve solda olmak üzere iki eksenli analog analog kollar bulunmaktadır. Tez çalışma boyunca kullanılan kontrol kolu Şekil 6.9. ile gösterilmiştir.



Şekil 6.9. Prototip sistem denetiminde kullanılan kontrol kolu ve tuş bilgileri

Şekil 6.9. ile gösterilen kontrol kolu ile cihazın açı sensörü ile otonom açı modu aktifleştirilerek açısal denge korunumu veya kol ile kontrol modu aktifleştirilerek manuel kontrol işlevleri yerine getirilebilir. Ayrıca platforma yazılımsal olarak tanımlanan test hareketlerini başlatmak, yazılımsal olarak resetlemek gibi işlevler de kol ile gerçekleştirilebilmektedir. Kol üzerinde bulunan tüm tuşların görev atamaları Çizelge 6.3. ile gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Kontrol koluna ait tuşlar ve prototip sistemdeki görevleri

GİRİDİ			GÖREV	GÖREV AÇIKLAMASI	
VERİ TÜRÜ	VERİ ARALIĞI	ADI			
Analog	0-255	L Analog Kolu (Yatay Parametresi)	Açısal Hareket Sağlamak	Platformun Y eksenindeki açısal hareketini sağlar.	
		L Analog Kolu (Düşey Parametresi)	Açısal Hareket Sağlamak	Platformun X eksenindeki açısal hareketini sağlar.	
		R Analog Kolu (Yatay Parametresi)	Doğrusal Hareket Sağlamak	Platformun Y eksenindeki doğrusal hareketini sağlar.	
		R Analog Kolu (Düşey Parametresi)	Doğrusal Hareket Sağlamak	Platformun X eksenindeki doğrusal hareketini sağlar.	
	0-127	YUKARI Yön Düğmesi	Doğrusal Hareket Sağlamak	Açısal Hareket Sağlamak	Platformun Z eksenindeki doğrusal hareketini sağlar.
		AŞAĞI Yön Düğmesi			
		SAĞ Yön Düğmesi	Platformun Z eksenindeki açısal hareketini sağlar.		
		SOL Yön Düğmesi			
Dijital	1-0	L1 Düğmesi	Doğrusal Hareket Kilidi	Z ekseninde yapılan doğrusal hareketin kademeli ya da gerçek zamanlı olmasını sağlar.	
		L2 Düğmesi	Açısal Hareket Kilidi	Z eksenindeki açısal hareketin kademeli ya da gerçek zamanlı olmasını sağlar.	
		L3 Düğmesi	Açısal Hareket Kilidi	X ve Y eksenlerindeki açısal hareketin kademeli ya da gerçek zamanlı olmasını sağlar.	
		R1 Düğmesi	Doğrusal Hareket Kilidi	X ve Y eksenlerindeki doğrusal hareketin kademeli ya da gerçek zamanlı olmasını sağlar.	
		R2 Düğmesi	Açısal Hareket Kilidi	X ve Y eksenlerindeki açısal hareketin kademeli ya da gerçek zamanlı olmasını sağlar.	

	R3 Düğmesi	Doğrusal Hareket Kilidi	X ve Y eksenlerindeki doğrusal hareketin kademeli ya da gerçek zamanlı olmasını sağlar.
	ÜÇGEN Düğmesi	Kilit Modu Aktifleştirme	Tüm doğrusal ve açısal hareketlerin kademeli hareketi aktif edilir.
	ÇARPI Düğmesi	Kilit Modu Pasifleştirme	Tüm doğrusal ve açısal hareketlerin gerçek zamanlı hareketi aktif edilir.
	KARE Düğmesi	Demo Çalışma	Demo olarak platformun kare şeklinde hareketi sağlanır.
	DAİRE Düğmesi	Demo Çalışma	Demo olarak platformun daire şeklinde hareketi sağlanır.
	SELECT Düğmesi	Kontrol Modları Arası Geçiş	Açı sensörü ile otonom kontrolü modu ve el ile kontrol modu arasındaki geçişi sağlar.
	BAŞLATMA Düğmesi	Sıfırlama	Cihazın komple baştan başlatılmasını sağlar.

Çizelge 6.3. incelendiğinde Şekil 6.9.'de gösterilen tüm tuşların görevleri ve bu tuşlarının Arduino'ya gönderdiği veri türleri gibi bilgilerin detayları gösterilmiştir. Veri türü için burada sinyal tipi demek de yerinde olur. Analog ve dijital veri tipinde sinyaller alınmaktadır. Dijital veriler bir verinin olup olmadığının bilgisini taşırken, analog veriler ise bir verinin niceliğinin ne kadar olduğunu vermektedir. Buradan şu çıkarım yapılır; dijital sinyal için "0=sinyal yok" veya "1=sinyal var" bilgisini taşır, analog sinyal ise örneğin 256 çözünürlük için (8 bit) 0 ile 256 arasında değişik değerler alabilmektedir yani ara değerler de bulunur. Kontrol kolu üzerinde bulunan L ve R analog kolları her biri ayrı ayrı yatay ve düşey hareket parametrelerini üzerinde bulundurur. Bu parametreler analog kolun o eksendeki eğimine göre 0-255 arası farklı değerler almaktadır. Normal duruş pozisyonunda 127 değeri alınmaktadır. Yön tuşları ise normalde buton görünümündedir fakat üzerlerinde basınç miktarına göre çıkış parametresini değiştirebilecek basınç sensörü de bulunduğu için 7 bit çözünürlükte çıkış vermektedir. Bu aralık ise 0 ile 127 arası değişmektedir. Normal duruş pozisyonunda (Tuşa herhangi bir basınç uygulanmadığında) çıkış parametresi 0 olarak okunur.

Platform ile yapılabilen doğrusal ve açısal hareketlerin yapılması esnasında bu hareketlerin kilitli mi, kilitsiz mi yapılacağı gibi özel bir durum vardır. Bu özellik hareket kilidi özelliğidir. Hareket kilidi hangi eksen için doğrusal veya açısal hareket yaparken aktif ise bu hareket sağlanırken koldan gönderilen komut yalnızca artış sağlar ve kol bırakıldığında eski

konuma dönmez. Kilit modu pasif yapıldığında yapılan hareket kol bırakıldığında bellekte tutulmaz ve eski konuma (başlangıç konumuna) geri döner. Açısal hareketlerin kilit modunu aktif veya deaktif etmek için L2, L3, R2 düğmeleri kullanılır. Doğrusal Hareketlerin kilit modu için ise L1, R1, R3 tuşları kullanılır. Sistemin tüm kontrol kilitleri tek seferde üçgen düğmesi ile aktif, çarpı düğmesi ile de pasif konuma getirilebilmektedir.

Sistem çalışma sürecinde çalıştırılmak üzere iki adet demo yüklenmiştir. Bu demolardan biri; gömülü program içerisinde belirtilen kenar uzunluğunda bir kare çizme hareketi yapmasını sağlar. Diğeri ise; belli bir zaman gecikmesi ile 0 ile 360 derece arasında gezinen bir parametrelerin kosinüsü ile platformun x konumunu, sinüsü alınarak ise y eksenindeki konumu bulunarak platform hareketi bu bağımlılıklara göre sağlanmıştır. Gömülü yazılım içerisinde belirtilmiş bir yarıçapa göre çizim yapılır. Bu demo çalışmalar daha da arttırılabilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında paralel mekanizma olan Stewart Platform Mekanizması (SPM) için tip sentezleme yapılarak, yeni bir model önerisi üzerinde yapılan araştırma ve uygulamalara yer verilmiştir. Üzerinde çalışmalar yapılan stewart platform mekanizmalarının daha iyi anlaşılması için öncelikle genel hususlardan bahsedilmiştir. Genel mekanizma türleri olan seri ve paralel mekanizmalar hakkında bilgi verilerek bu mekanizmalar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Stewart platform mekanizması için literatürdeki yapılan çalışmalar irdelenerek platform modeli için yapılan diğer bağ yapısı ve çözüm tekniği önerilerinden bahsedilmiştir. Sistemin mobilitesi hakkında bilgi verilerek çalışma uzayı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada tip sentezleme ile oluşturulan 6x3 bağlantı tipinde altı serbestlik dereceli Stewart Platform Mekanizması geliştirilmiştir. Bu modelin kinematik hesaplamaları yapılırken ileri kinematik hesaplamaların zorluğu ve hesaplama sürecinin uzun olması dikkate alınarak ters kinematik yöntemlerle platformun kontrol hesaplamaları yapılmıştır. İleri kinematik ile yapılan hesaplamalar ve tez çalışması kapsamında geliştirilen prototip cihazın çalıştırılması başarı ile gerçekleştirilmiştir.

Tip sentezleme sonucu ortaya çıkan platform mekanizmasının çözüm kümesine ulaşmak için gerekli geometrik çözüm yöntemlerinden faydalanarak, Matlab ortamında benzetimi sağlanmıştır. Yazılımsal olarak sistem kinematiği analiz edilmiş ve platform için öteleme-dönme hareketlerini sağladığı en uygun model gereklilikleri belirlenmiştir. Belirlenen sistem ölçülendirmelerine göre Sketch Up Pro 2018 3B modelleme yazılımı ile katı model tasarımları yapılmıştır. Tasarım çıktıları üç boyutlu yazıcıda basılıp montaj işlemleri gerçekleştirilerek gerçek metrik boyutlarda sistemin tümleşik son haline ulaşılmıştır.

Yapılan çalışmada ters kinematik hesaplamalardan faydalanılarak, bilgisayar ortamında benzetimi gerçekleştirilen durumlar tez kapsamında geliştirilen prototip cihaz üzerinde denenmiştir ve çalışması izlenmiştir. Kinematik hesaplamalara göre sistemin istenen fonksiyonları yerine getirmesi sağlanarak, çalışma uzayı içerisindeki testler yapılmıştır. Sistem kinematiği için istenmeyen durum olan tekillik için benzetim sürecinde tekillik kontrol analizleri gerçekleştirilerek matematiksel olarak çözüm yoluna gidilmiş ve mekanik

tasarıma ait temel iskeletin oluşumu sağlanmıştır. Geliştirilen prototip cihaza ait mekanik tasarım, elektronik kontrol ve yazılımsal denetim süreci gibi uygulamalardan bahsedilerek, yapım süreci hakkında yol gösterici bilgilere yer verilmiştir. Bağlantı kollarının çalışma uzayı sınırlarına uygun olarak özel küresel mafsal sistemi tasarlanarak uygulanmıştır. Prototip cihazın çalışma sürecinde denetimini sağlamak amaçlı kontrol kolu ve aç sensöründen faydalanılmıştır. Manuel ve otomatik gerçekleşen kontrol sürecinde aç sensöründen okunan bilgilerinin noise (gürültülü) ve üzerinde spike (sinyaldeki atlama) gibi istenmeyen sinyal karmaşaları içermesi sebebiyle bir çeşit tahminleme yöntemi olan kalman filtresinden faydalanılarak tez içerisinde detaylı çözüm yolu modeli ve örneklere yer verilmiştir. Tez çalışması kapsamında kullanılan sensör tipi ve veri boyutuna göre; kalman filtresi matematiksel olarak modellenerek gömülü sistem olan Atmega2560 denetleyiciye göre yazılımı geliştirilmiş ve çalışmaların stabil olduğu gözlenmiştir.

Çalışma kapsamında 6 adet eyleyici kullanılarak sistem kinematiğini sağlamak için hassas konumlandırma gerçekleştirilmiştir. Bunun için eyleyicilerin kontrolünde mikroadımlama teorisinden faydalanılmıştır. Kullanılan Atmega 2560 mikrodenetleyicinin sistemdeki eyleyicileri tek başına kontrol etmesi durumunda 16 MHz olan işlemci hızında, eklenen motor sayısı ile orantısız olarak hız düşümü yaşandığı tespit edilmiştir. Tek motor kontrol edildiğinde 40 mm/s hızında çalıştığı görülmekte fakat ikinci motor eklendiğinde bu hareket hızı 20 mm/s hızına düşmüştür. Bu hız düşümünün sisteme eklenen üçüncü ve dördüncü motorlarda da sırasıyla 13 mm/s ve 10 mm/s şeklinde orantılı düştüğü gözlemlenmiştir. Bu hız problemini çözmek amaçlı I²C protokolü ile paralel haberleşme sağlanarak sisteme dâhil edilen 6 adet Atmega328P ve Atmega2560 denetleyicileri arasında master-slave yapısı kullanılmıştır. Bunun sonucunda sistemdeki tüm doğrusal motorların kontrol hızı 40 mm/s olarak ölçülmüştür. Buradaki sonuçları elde etme sürecinde step motorları kontrol ederken Çizelge 5.5. 'teki 1/4 adım ayarlı mikrostep modu kullanılmıştır. Bu moddayken hareketli platform üzerine yerleştirilen 18 kg'a kadar yük bindirilerek hareket tutarlılığı gözlemlenmiştir. 18 kg üzerindeki ağırlıklarda ise takılmalar ve çalışmasında stabil olmayan durumlar gözlemlenmiştir. Mikrostep modu 1 yani tam tur yapıldığında doğrusal motor sisteminin hareket hızınının 160 mm/s olması beklenirken takılmalar ve çalışmasında stabil olmayan durumlar gözlemlenmiştir. Mikrostep modu 1/2 yapıldığında doğrusal motor sisteminin hareket hızı 1/4'e göre 2 katına çıkarak 80 mm/s hızına yükselmekte olduğu fakat motor sisteminin katı model tasarımından dolayı takılmalar ve çalışmasında stabil olmayan durumlar gözlemlenmiştir. Bu modda platforma yük eklendiğinde motorların hiç

çalışmadığı görülmüştür. Mikrostep modu 1/8 yapıldığında doğrusal motor sisteminin hareket hızının 20 mm/s'a düşerek platformun taşıyabileceği yük miktarının 30 kg'a çıktığı gözlemlenmiştir. 1/16 mikrostep modu için ise hız 10mm/s değerine düşerek taşıma kapasitesinin 41 kg olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda mikrostep modu ile step motorun hızı artırıldığında azami taşıma yükünün azaldığı, hızı azaltıldığında ise taşıyabileceği yükün arttığı görülmüştür. Yük altında çalışacak sistemler için yavaş/güçlü mikrostep modu, hız istenen fakat gücün önemsiz olduğu mekanizmalarda ise hızlı/güçsüz mikrostep modu önerilir.

Prototipi geliştirilen sistem için Matlab ortamında x, y ve z eksenlerine göre ulaşılabilir konumların analizi için Şekil 2.9.'da perspektifi gösterilen çalışma uzayı elde edilmiştir. Elde edilen bu çalışma uzayı 2 mm çözünürlükte nokta bulutlarından oluşmaktadır. Çözünürlüğün artırılması ile doğru orantılı olarak çalışma uzayı analiz süreci üssel olarak artmaktadır. Elde edilen çalışma uzayı düzlemsel olarak incelendiğinde, hareketli üst platformun sınır kısımlarına doğru yaptığı hareketlerde daralmalar görülmüştür. Bunun nedeni ise platformdaki doğrusal motor sistemlerinin kendilerine tanımlı sınırlarının bulunmasıdır. Hesaplanmış çalışma uzayına ait elde edilen grafikler nokta bulutu şeklinde x-y eksenleri için Şekil 2.10.'da, x-z eksenleri için Şekil 2.11'de ve y-z eksenleri için Şekil 2.12.'de gösterilmiştir. Doğrusal motorların sınırları dâhilinde gerçekleşen ve platforma göre yapılan doğrusal hareketlerin çalışma uzayı ön izlenmiştir. Çalışma uzayı içerisindeki global eksen takımı olan x, y ve z eksenlerine göre doğrusal olarak ulaşılabilir negatif ve pozitif uç nokta analizleri Çizelge 2.3. 'deki sonuçları vermiştir.

Çalışma uzayı etkilerinin sistem tasarımına göre değiştiği görülmüştür. Yapılan analizde gösterilen çalışma uzayına sistemdeki her bir aksamın iskelet yapısındaki ufak değişimler olumlu ya da olumsuz olarak etkileri vardır. Çalışma uzayını etkileyen en önemli parametrelerin; motor yolu uzunluğu, bağlantı kollarının uzunluğu, mafsalların birbirlerine uzaklığı, platform yarıçapı ve doğrusal motor sistemlerinin yerleşimi olduğu tespit edilmiştir.

Literatürdeki bacak boyu değişen sistemlere göre karşılaştırma yapıldığında; bacak boyu değişen sistemlerin çalışma uzayı büyüklüğünün bütünleşik sistem hacmine göre yaklaşık %60'lara çıkabilirken, tez çalışmasındaki sistemde elde edilen çalışma uzayı, sistem bütününe göre %30'lara ancak çıkabilmektedir.

Platform mekanizmalarının uzaysal hareket edebilme kabiliyetleri nedeni ile çalışmalar gerçek ortamda ve sanal ortamda yapılabilmektedir. Fakat bilgisayar ortamında yapılan benzetimler ile gerçeğe uyarlanmış sisteme göre daha hızlı sonuçlar elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamındaki yeni model sistemin, bağlantı kollarının uzunluğu sabit ve alt mafsalları merkeze doğru doğrusal hareket sağlamaktadır. Bu sistemin çalışma uzayı analizi incelendiğinde kol uzunluğu değişen yapıdaki SPM modellerine göre daha küçük, daha yavaş ve çalışma gösterdiği görülmektedir. Sistem bütünlüğüne göre incelendiğinde tasarlanan cihaz daha büyük, yavaş fakat daha güçlü yapıda olduğu görülmüştür. Sistemdeki doğrusal eyleyiciler vidalı mil ile hareket sağladığı için güçlü yapıda olup buna istinaden daha yavaştır. Doğrusal hareketin kayışlı yâda kremayer mekanizması ile sağlanması durumunda daha hızlı hareket elde edilir. Bu durumda güçsüzlük durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışma uzayı bakımından küçük hareketleri yapması ile uç işleyici de yeterince hassas işlemler sağlayabildiği söylenebilir. Bu konuda yapılan araştırmalar ve çalışmalar bizi daha ileriye götürür. Bu bağlamda gelecekte sistem dinamiği daha iyi olan geliştirmeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Merlet, J.P. (2006). *Parallel Robots (Second Edition)*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 261-312.
2. Gosselin, C. and Angeles, J. (1990). Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chains. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Canada, 281-283.
3. Güneri, B. (2007). Complete Dynamic Analysis of Stewart Platform Including Singularity Detection. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 1-9.
4. Dasgupta, B. and Mruthyunjava, T.S. (2000). The Stewart Platform manipulator: a review. *Mechanism and Machine Theory*, 15-40.
5. Gourin, C.G. and Terris, D.J. (2007). *Robotics in surgery: history, current and future applications*, 1st ed., Nova Science Publishers Inc., New York, 3-12.
6. Braun, E.U., Mayer, H., Knoll, A., Lange, R. and Bauernschmitt, R. (2008). The Must-Have in Robotic Heart Surgery: Haptic Feedback, *Medical Robotics*, I-Tech Education and Publishing, Vienna, 9-21.
7. Nethery, J.F. and Spong, M.W. (1994). Robotica: a Mathematica package for robot analysis. *IEEE Robotics Automation Magazine*. 1, 13-20.
8. Bingul, Z., Koseyaporn, P. and Cook, G.E. (2002). Windows-based robot simulation tools, 7th Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, 2-5.
9. Kucuk, S. (2012). Simulation and design tool for performance analysis of planar parallel manipulators. *Simulation*. 88, 542-556.
10. Wang, A. (2007). Reconfigurable kinematics of General Stewart Platform and simulation interface. Master Thesis, University of Windsor, Canada.
11. Ding, Z.Q. (2005). A unified Robotic Kinematic Simulation Interface, Master Thesis, University of Windsor.
12. Fichter, E.F. (1986). A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction. *The International Journal of Robotics Research*. 5, 157-182.
13. Faugère, J. and Lazard, D. (1995). Combinatorial classes of parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*. 30, 765-776.
14. Anlı, E., Alp, H., Sait, N.Y. ve Özkol, İ. (2005). Paralel Mekanizmaların Kinematiği, Dinamiği ve Çalışma Uzayı. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi Cilt 2 Sayı 1*, 19- 36.

15. Dafaoui, E.M., Amirat, Y., Pontnau, J. and Francois C. (1998). Analysis and design of a six- DOF parallel manipulator, modeling, singular configurations, and workspace. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 14, 78-92.
16. H. Hunt, K. (1983). Structural kinematics of in-parallel-actuated robot arms. *Trans ASME J Mech Trans Auto Des. Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design*. 105, 705–712.
17. Pritschow, G., Eppler, C. and Lehner, W.D. (2002). Highly dynamic drives for parallel kinematic machines with constant arm length, *Proc. 1st Int. Colloq. Collaborative Res. Center, Braunschweig, Germany*.
18. Lazard, D. (1993). Generalized Stewart platform: How to compute with rigid motions?. *Proc. of IMACS ACA, Lille, France*.
19. Mourrain, B. (1993). The 40 generic positions of a parallel robot, *International symposium on Symbolic and algebraic computation. New York, USA*.
20. Tsai, L.W. (1999). *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. John Wiley & Sons. New York.
21. Chen, C.T. (2012). Reconfiguration of a parallel kinematic manipulator for the maximum dynamic load-carrying capacity, *Mechanism and Machine Theory* 54, 62–75.
22. Clerc, J.P., Tol, U.A. and Wiens, G.J. (2002). Deburring Using A Micro/Macro Parallel Kinematic Machine. *Proc. Conference on Recent Advances in Robotics*.
23. Pollard, W. L. (1942). Position Controlling Apparatus. US Patent No: 2.286.571. June 16.
24. Kucuk, S. ve Gungor, B.D. (2016). Inverse kinematics solution of a new hybrid robot manipulator proposed for medical purposes. 2016 Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO), Antalya, pp. 1-4.
25. Yao, W. (2008). Symbolic Kinematics and Dynamics Analysis and Control of a General Stewart Parallel Manipulator. Department of Mechanical and Aerospace Engineering State University of New York at Buffalo, New York.
26. Alper, G. (2010). İnsan-Makine Arayüzü Olarak 3x3 Stewart Platformunun Empedans Kuvvet Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
27. Xiao-Shan, G. and Deli, L. (2003). Generalized Stewart Platforms and Their Direct Kinematics. Institute of Systems Science, AMSS Academia Sinica, Beijing, China.

28. Renk, G. and Rudiger, D. (1997). Active Acceleration Compensation Using a Stewart-Platform on a Mobile Robot. Institute for Real Time-Systems and Robotics University of Karlsruhe.
29. Ulrich, S., Bernhard, K., Holger, W., Tobias, O. and Gerd, H. (2005). Sensorized and Actuated Instruments for Minimally Invasive Robotic Surgery. German Aerospace Center, Institute of Robotics and Mechatronics, Germany.
30. Ersel, Ö., M. Burak, G., İlhan, B., ve Tuna, B. (2001). Hidrolik Simülasyon Tasarımı. II. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi.
31. Kirkwood, W.J., White, S.N., Brown, M., Henthorn, R., Jensen, S., Salamy, K., Peltzer, E.T. and Brewer, P. (2003). Precision underwater positioning for in situ laser Raman spectrographic applications. USA. 838-843.
32. Fasse, E.D. and Broenink, J.F. (1999). A Spatial Impedance Controller for Robotic Manipulation. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1-12.
33. Broenink, J.F., Visser, M. and Tiernejo, M.L.J. (1998). Simulation of Sliding Mode Impedance Control for a 6 DOF Anthropomorphic Robot. Proceeding of the 12th European Simulation Multiconference. Manchester UK. 561-565.
34. Jinno, M., Ozaki, F., Tatsuno, K. and Takahashi, M. (1995). Development of a Force Controlled Robot for Grinding, Chamfering and Polishing. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1455-1460.
35. Yoshikawa, T. (1990). Foundation of Robotics Analysis and Control. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
36. Salisbury, J.K. (1980). Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates. Proceeding 19th IEEE Conference on Decision and Control, December. 95-100.
37. Benali, A., Richard, P. and Bidaud, P. (1999). Design, control and evaluation of a six DOF force feedback interface for virtual reality applications. Robot and Human Communication - Proceedings of the IEEE International Workshop. Paris. 338 - 343.
38. Hogan, N. (1985). Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I-II-III. Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control. 1-24.
39. Peng, Z. (1992). Compliant Motion Control of Manipulators. Thesis of Doctor of Philosophy, Niigata University, Niigata Japan.
40. Lin, J., Chen, C.W. (2009). Computer-aided-symbolic dynamic modeling for Stewart-platform manipulator, Robotica vol.27, 331–341.

41. Kızır, S., Bingül, Z., Oysu, C. ve Küçük, S. (2011). Development and Control of a High Precision Stewart Platform, *SDU International Journal of Technological Sciences* Vol. 3, No 1/Special Issue, 51-59.
42. Barbosa, M., Solteiro, P.E. and Lopes, A. (2010). Optimization of Parallel Manipulators Using Evolutionary Algorithms. 10.1007/978-3-642-13161-5_11.
43. Gao, Z., Zhang, D. and Ge, Y. (2010). Design optimization of a spatial six degree-of freedom parallel manipulator based on artificial intelligence approaches. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 26, 180-189.
44. Kosinska, A., Galicki, M. and Kedzior, K. (2003). Designing and optimization of parameters of delta-4 parallel manipulator for a given workspace, *Journal of Robotic Systems*. 20, 539-548.
45. Su, Y.X., Duan, B.Y., Peng, B. and Nan, R.D. (2001). A real-coded genetic optimal kinematic design of a Stewart fine tuning platform for a large radio telescope, *Journal of Robotic Systems*. 18, 507-516.
46. Jiang, Q. (2008). Singularity-free workspace analysis and geometric optimization of parallel mechanisms, Phd Thesis, Université Laval, Faculté Des Sciences Et De Génie, Québec, Canada.
47. Hay, A.M. and Snyman, J.A. (2005). A multi-level optimization methodology for determining the dextrous workspaces of planar parallel manipulators. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 30, 422-427.
48. Cha, S.H., Lasky, T.A. and Velinsky, S.A. (2006). Kinematic redundancy resolution for serial-parallel manipulators via local optimization including joint constraints. *Mechanics Based Design of Structures and Machines: An International Journal*. 34, 213-239.
49. Ou, F.M. (2005). A physical oriented methodology for the synthesis of functional alternatives of mechanism systems. Phd Thesis, Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan City, Taiwan.
50. Alp, H. (2007). Sezgisel yöntemlerle paralel mekanizmaların çalışma uzayı analizi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
51. Cwiakala, M. (1986). Workspace of a Closed-Loop Manipulator. *ASME Journal of Mechanical Design*.
52. Bonev, I.A. and Ryu, J. (2001). A new Approach to Orientation Workspace Analysis of 6-DOF Parallel Manipulators. *Mechanism and Machine Theory*. 36, 15-28.

53. Arai, T., Cleary, K., Nakamura, T., Adachi, H. and Homma, K. (1990). Design, analysis and construction of a prototype parallel link manipulator. Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems Towards a New Frontier of Applications. 1, 205-212.
54. Gosselin, C. (1990). Determination of the workspace of 6-d.o.f parallel manipulators. ASME Journal of Mechanical Design. 112, 331-336.
55. Kim, D. and Chung, W. (1999). Analytic Singularity Equation and Analysis of Six-Dof Parallel Manipulators Using Local Structurization Method. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 15, 612-622.
56. Jo, D.Y. and Haug, E.J. (1989). Workspace analysis of multibody mechanical systems using continuation methods. ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, Automation Design. 111, 581-589.
57. Haug, E.J., Luh, C-M., Adkins, F.A. and Wang, J-Y. (1996). Numerical Algorithms for Mapping Boundaries of Manipulator Workspaces. Journal of Mechanical Design. 118, 228-234.
58. Wang, L-CT. and Hsieh, J-H. (1998). Extreme reaches and reachable workspace analysis of general parallel robotic manipulators, Journal of Robotic Systems. 15, 145-159.
59. Wan, Y. and Wang, S. (2003). Kinematics Analysis and Simulation System Realization of Stewart Platform Manipulator. Canada. 10-12.
60. Chablat, D. and Wenger, P. (1998). Moveability and collision analysis for fully-parallel manipulators. Paris. 61-68.
61. Bingü, Z., ve Küçük, S. (2005). Robot tekniği 1. Birsen Yayınevi,, İstanbul, 275 -282.
62. Kızıllhan, A., Toz, M., Aliustaoğlu, C. ve Bingül, Z. (2007). Gezgin robot tasarımı ve hareket planlaması. TOK'07 Bildiriler Kitabı , İstanbul, 371 -376.
63. Merlet, J.P. (1998). Determination of the Presence of Singularities in 6D Workspace of a Gough Parallel Manipulator, Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
64. Merlet, J.P. (1993). Direct Kinematics of Parallel Manipulators. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 6.
65. Xiaochun, G. and Biyuan, S. (2014). Application Research of Stepper Motor Control with TMS320F2812, Applied Mechanics and Materials Vols. 556-562 pp 2544-2548.
66. Welch, G. and Bishop, G. (2001). An Introduction to the Kalman Filter. University of North Carolina at Chapel Hill Department of Computer Science. Chapel Hill.



EKLER

EK-1. Matlab'de çalışma uzayı analizi kodu [calismaUzayiAnaliz.m]

```

clear all; clc;

d_p=186; % platformun ölçülendirmesi
d_maf=38; % platformun ölçülendirmesi

L=290; % çubuğun uzunluğu
h_z0=228; % platformun en alçak hali

d_mot=76; % motorların arasındaki mesafeninYarısı
omega_min=160; % motorun kalkış alanından merkeze olan mesafesi
omega_d=165; % motorun gidip gelebileceği maksimum mesafesi

alfa=deg2rad(0);
beta=deg2rad(0);
teta=deg2rad(0);

PD_x=0;
PD_y=0;
PD_z=0;

LimitTest=80
artisMiktar=10
noktaBoyut=300
pause on;
yuzde=0;
LimitTest=LimitTest+(artisMiktar-mod(LimitTest,artisMiktar));
gidilecekSayi=length([-artisMiktar:-artisMiktar:-LimitTest ,
0:artisMiktar:LimitTest])^3;
sayac=0;

for PD_x=[0:-artisMiktar:-LimitTest , artisMiktar:artisMiktar:LimitTest]
    for PD_y=[0:-artisMiktar:-LimitTest ,
artisMiktar:artisMiktar:LimitTest]
        for PD_z=[0:-artisMiktar:-LimitTest ,
artisMiktar:artisMiktar:LimitTest]
            sayac=sayac+1;
            yuzde=fix((sayac/gidilecekSayi)*10000)/100;
            disp(sprintf('Yüzde: %5.2f \t X = %d \t Y = %d \t Z = %d
',yuzde, PD_x, PD_y, PD_z));

            fi=atan((d_maf/2)/d_p);
            r_P=sqrt(d_p^2 + (d_maf/2)^2);

            epsilon=[deg2rad(60)-fi, deg2rad(300)+fi, deg2rad(300)-fi,
deg2rad(180)+fi, deg2rad(180)-fi, deg2rad(60)+fi];

            Px=r_P*cos(epsilon+teta)*cos(beta) + PD_x;
            Py=r_P*sin(epsilon+teta)*cos(alfa) + PD_y;
            Pz=r_P*(sin(epsilon)*sin(alfa) -
cos(epsilon)*sin(beta))+h_z0+PD_z;

            hold on;

            BSteta = tan((d_mot/2)/omega_min); r_Mbas =
sqrt((d_mot/2)^2 + omega_min^2);
            BTteta = tan((d_mot/2)/(omega_min+omega_d)); r_Mbit =
sqrt((d_mot/2)^2 + (omega_min+omega_d)^2);

```

EK-1. (devam) Matlab'de çalışma uzayı analizi kodu [calismaUzayiAnaliz.m]

```

M_bas__Mbit=zeros(3,2,6); % motorların başlangıç ve bitiş x
değerleri (x/y, başla/bitir, motorNo)
BSdelta=zeros(1,6);
BTdelta=zeros(1,6);

delta=[0, 0, deg2rad(240), deg2rad(240), deg2rad(120),
deg2rad(120)];

for i=1:1:6
    BSdelta(i)=delta(i)+(BSteta*(mod(i,2)-mod(i+1,2)));
    BTdelta(i)=delta(i)+(BTteta*(mod(i,2)-mod(i+1,2)));
    M_bas__Mbit(1,:,i)=[cos(BSdelta(i))*r_Mbas,
cos(BTdelta(i))*r_Mbit]; % x değerleri
    M_bas__Mbit(2,:,i)=[sin(BSdelta(i))*r_Mbas,
sin(BTdelta(i))*r_Mbit]; % y değerleri
end

%(x/y/z, başlangıç/bitir, motorNo)
ucgen_dusey=zeros(3,2,6);
ucgen_dusey(1,1,:)=Px; ucgen_dusey(1,2,:)=Px;
ucgen_dusey(2,1,:)=Py; ucgen_dusey(2,2,:)=Py;
ucgen_dusey(3,1,:)=Pz;

BC = L*sin(acos(Pz/L));

kose_x1=zeros(1,6); kose_y1=zeros(1,6);
kose_x2=zeros(1,6); kose_y2=zeros(1,6);
x_sabiti=zeros(1,6); y_sabiti=zeros(1,6);
c_sabiti=zeros(1,6); nokta_X = zeros(1,6);
nokta_Y = zeros(1,6);

d= zeros(1,6);
muAcisi=zeros(1,6);

for i=1:1:6
    kose_x1(i)=M_bas__Mbit(1,1,i);
kose_x2(i)=M_bas__Mbit(1,2,i);
    kose_y1(i)=M_bas__Mbit(2,1,i);
kose_y2(i)=M_bas__Mbit(2,2,i);
    x_sabiti(i)=kose_y2(i)-kose_y1(i); y_sabiti(i)=(-
1)*(kose_x2(i)-kose_x1(i));
    c_sabiti(i)=(kose_y2(i)*(kose_x2(i)-kose_x1(i)) -
(kose_x2(i)*(kose_y2(i)-kose_y1(i))));
    nokta_X(i)=Px(i); nokta_Y(i)=Py(i);
    d(i)=(abs(x_sabiti(i)*nokta_X(i) + y_sabiti(i)*nokta_Y(i)
+ c_sabiti(i)) / sqrt((x_sabiti(i)^2) + (y_sabiti(i)^2)));
    muAcisi(i)=acos(d(i)/BC(i));
end

ucgen_yatay=zeros(3,2,6);
ucgen_yatay(1,1,:)=ucgen_dusey(1,1,:);
ucgen_yatay(2,1,:)=ucgen_dusey(2,1,:);
for i=1:1:6
    sigma=delta(i)+ (deg2rad(90)-muAcisi(i))*(mod(i+1,2)-
mod(i,2));
    ucgen_yatay(1,2,i) = ucgen_dusey(1,1,i)+BC(i)*cos(sigma);
    ucgen_yatay(2,2,i) = ucgen_dusey(2,1,i)+BC(i)*sin(sigma);
end

```

EK-1. (devam) Matlab'de çalışma uzayı analizi kodu [calismaUzayiAnaliz.m]

```

L_Cubuk=zeros(3,2,6);
L_Cubuk(1,1,:)=ucgen_dusey(1,1,:);
L_Cubuk(2,1,:)=ucgen_dusey(2,1,:);
L_Cubuk(3,1,:)=ucgen_dusey(3,1,:);
L_Cubuk(1,2,:)=ucgen_yatay(1,2,:);
L_Cubuk(2,2,:)=ucgen_yatay(2,2,:);

C=zeros(3,6); % x/y/z , motorNo
motorAciklik=zeros(1,6);
hataBayragi=zeros(1,6);

for i=1:1:6
    C(1,i)=L_Cubuk(1,2,i); C(2,i)=L_Cubuk(2,2,i);
    C(3,i)=L_Cubuk(3,2,i);
    if sqrt(C(1,i)^2+ C(2,i)^2)>=r_Mbas
        motorAciklik(i)=sqrt((M_bas__Mbit(1,1,i)-C(1,i))^2 +
(M_bas__Mbit(2,1,i)-C(2,i))^2 +(M_bas__Mbit(3,1,i)-C(3,i))^2);
    else
        motorAciklik(i)=-sqrt((M_bas__Mbit(1,1,i)-C(1,i))^2 +
(M_bas__Mbit(2,1,i)-C(2,i))^2 +(M_bas__Mbit(3,1,i)-C(3,i))^2);
    end
    if (0 <= motorAciklik(i)) && (motorAciklik(i)<=omega_d)
        hataBayragi(i)=0;
    else
        hataBayragi(i)=1;
    end
end

if sum(hataBayragi) ==0
    nokta = scatter3(PD_x,PD_y,PD_z+h_z0, '.');
    nokta.SizeData =noktaBoyut;
    nokta.MarkerEdgeColor = 'b';
    pause(0);
    xlabel('X');
    ylabel('Y');
    zlabel('Z');
    xlim([-150,150]);
    ylim([-150,150]);
    zlim([0,300]);
    grid on;
    view(135, 45);
end
zoom(1);
end
end
end
end

hold off;

```

EK-2. Arduino'da Master I²C haberleşme kodu [I²C_Baglanti.ino]

```

#include <Wire.h>
int gelenVeri = 0;
void I2C_Setup() {
  Wire.begin();
  Serial.begin(9600);
}

void veriGonder(int konum, int hedef) {
  konum = constrain(konum, motorMin, motorMax);
  byte gonder[2];
  gonder[0] = (konum >> 8) & 0xFF;
  gonder[1] = konum & 0xFF;
  Wire.beginTransmission(hedef);
  Wire.write(gonder, 2);
  Wire.endTransmission();
}

void hesaplananVerileriGonder() {
  int motorNo = 0;
  motorHizlariHesapla();
  for (motorNo = 0; motorNo < 6; motorNo++) {
    hizKonumGonder(motorHizlar[motorNo], motorIsteneKonumlar[motorNo],
motorNo);
    //veriGonder(gonderKonum, motorNo);
  }
}

void hizKonumGonder(int hiz, int konum, int hedef) {
  konum = constrain(konum, motorMin, motorMax);
  hiz = constrain(hiz, hizMin, hizMax);
  byte gonder[4];
  gonder[0] = (hiz >> 8) & 0xFF;
  gonder[1] = hiz & 0xFF;
  gonder[2] = (konum >> 8) & 0xFF;
  gonder[3] = konum & 0xFF;
  Wire.beginTransmission(hedef);
  Wire.write(gonder, 4);
  Wire.endTransmission();
}

int veriAl(int kaynak) {
  Wire.requestFrom(kaynak, 2);
  byte a, b;
  while (Wire.available()) {
    a = Wire.read();
    b = Wire.read();
  }
  gelenVeri = a;
  gelenVeri = (gelenVeri << 8) | b;
  return gelenVeri;
}

void mevcutVeIsteneMotorKonumlariniOku() {
  int i = 0;
  for (i = 0; i < 6; i++) {
    motorMevcutKonumlar[i] = veriAl(i);
    motorIsteneKonumlar[i] = map(getMotorAciklik(i), hesaplananMin,
hesaplananMax, motorMin, motorMax);
  }
}

```

EK-3. Arduino'da Slave I²C haberleşme kodu [I²C_Baglanti_nano.ino]

```
#include <Wire.h>

void I2C_Setup() {
  Wire.begin(slaveNo);
  Wire.onReceive(veriGeldiginde);
  Wire.onRequest(veriIstendiginde);
}

void veriGeldiginde(int veri) {
  byte a, b, c, d;
  while (Wire.available()) {
    a = Wire.read();
    b = Wire.read();
    c = Wire.read();
    d = Wire.read();
  }
  int hiz = 0;
  gelenVeri = c;
  gelenVeri = (gelenVeri << 8) | c;
  hiz = a;
  hiz = (hiz << 8) | b;
  gelenVeri = constrain(gelenVeri, altLimMesafe, ustLimMesafe);

  setMotorHiz(hiz);
}

void veriIstendiginde() {
  int gercekKonum = getKonum();
  byte gonder[2];
  gonder[0] = (gercekKonum >> 8) & 0xFF;
  gonder[1] = gercekKonum & 0xFF;
  Wire.write(gonder, 2);
}
```

EK-4. Arduino'da kalman filtresi ile açı sensörü verisi temizleme kodu [Kalman_Filtresi.ino]

```

#include <Wire.h>
#include <Accelerometer.h>
#include <AccelerometerMMA8451.h>

AccelerometerMMA8451 acc(0);

#define pi 3.1415926535897932384626433832795
#define veriSayisiAsil      25 // bellekte tutulacak veri sayısı
                               (işlenmemiş sinyal)

double sonVerilerAsil[veriSayisiAsil][2];
double aci_kalman_tahmini[2] = {0, 0};
double hata_kovaryansi[2] = {1, 1};
double kalman_katsayisi[2] = {0.1, 0.1};
double onceki_kalman[2] = {0, 0};

double rad2deg(double veri) {
    return (180 / pi) * veri;
}

void GYRO_Setup() {
    Serial.begin(9600);
    acc.standby();
    acc.setDynamicRange(AccelerometerMMA8451::DR_4G);
    acc.activate();
}

double getAci_X() {
    double olcum = rad2deg(acc.readXg()) + 1.5;
    return yuvarla(-olcum);
}

double getAci_Y() {
    double olcum = (rad2deg(acc.readYg()));
    return yuvarla(-olcum);
}

double yuvarla(double sayi) {
    if (((int)(abs(sayi) * 100) % 1) <= (50)) {
        return floor(sayi);
    } else {
        return ceil(sayi);
    }
}

double getAciHam(int aciNo) {
    switch (aciNo) {
        case 0:
            return getAci_X();
            break;
        case 1:
            return getAci_Y();
            break;
    }
}

```


EK-4. (devam) Arduino'da kalman filtresi ile açu sensörü verisi temizleme kodu [Kalman_Filtresi.ino]

```
double getAciKalman(int aciNo) {
    return aci_kalman_tahmini[aciNo];
}

void kalmanFiltre() {
    int i = 0, j = 0;
    for (j = 0; j < 2; j++) {
        for (i = veriSayisiAsil - 1; i > 0; i--) {
            sonVerilerAsil[i][j] = sonVerilerAsil[i - 1][j];
        }
        sonVerilerAsil[0][j] = getAciHam(j);
    }

    for (i = 0; i < 2; i++) {
        hata_kovaryansi[i] = 1.0;
        kalman_katsayisi[i] = 0.1;
        oncesi_kalman[i] = 0.0;
        for (j = 0; j < veriSayisiAsil; j++) {
            double kalman_kazanci = hata_kovaryansi[i] / (hata_kovaryansi[i] +
kalman_katsayisi[i]);
            aci_kalman_tahmini[i] = oncesi_kalman[i] + (kalman_kazanci *
(sonVerilerAsil[j][i] - oncesi_kalman[i]));
            hata_kovaryansi[i] = (1 - kalman_kazanci) * hata_kovaryansi[i];
            oncesi_kalman[i] = aci_kalman_tahmini[i];
        }
    }
}
```

EK-5. Arduino'da motor hız hesaplama kodu [Hiz_hesapla.ino]

```

#include <Wire.h>

void motorHizlariHesapla() {
    mevcutVeIstenenMotorKonumlariniOku();
    yolUzunluklariBul();
    enUzunYolBul();
    hizBul();
}

void yolUzunluklariBul() {
    for ( i = 0 ; i < 6 ; i++ ) {
        yolUzunluklari[i] = abs(motorMevcutKonumlar[i] -
motorIstenenKonumlar[i]);
    }
}

void enUzunYolBul() {
    X_Max = yolUzunluklari[0];
    for ( i = 0 ; i < 6 ; i++ ) {
        if (X_Max < yolUzunluklari[i]) {
            X_Max = yolUzunluklari[i];
        }
    }
}

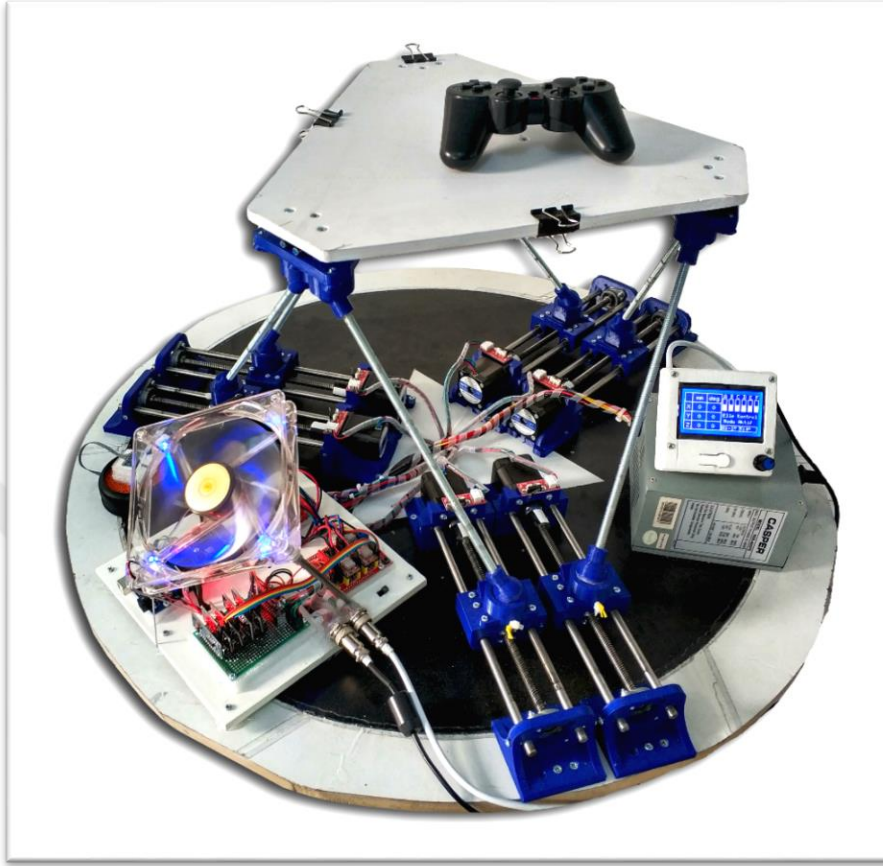
void hizBul() {
    for ( i = 0 ; i < 6 ; i++ ) {
        motorHizlar[i] = ceil(hizMax * (yolUzunluklari[i] / X_Max));
    }
}

int veriAl(int kaynak) {
    Wire.requestFrom(kaynak, 2);
    byte a, b;
    while (Wire.available()) {
        a = Wire.read();
        b = Wire.read();
    }
    gelenVeri = a;
    gelenVeri = (gelenVeri << 8) | b;
    return gelenVeri;
}

void mevcutVeIstenenMotorKonumlariniOku() {
    int i = 0;
    for ( i = 0 ; i < 6 ; i++ ) {
        motorMevcutKonumlar[i] = veriAl(i);
        motorIstenenKonumlar[i] = map(getMotorAciklik(i), hesaplananMin,
hesaplananMax, motorMin, motorMax);
    }
}

```

EK-6. Tez çalışması kapsamında yapılan prototip sistemin genel görünümü, kontrol kolu ve LCD ekran fotoğrafları



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Öztürk, Volkan
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 1994 - Ardahan
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : -
 Faks : -
 e-mail : vozturk@gelisim.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	İstanbul Gelişim Üniversitesi	2017
Önlisans	İstanbul Gelişim Meslek Yüksekokulu	2014
Lise	Kıraç İMKB Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-	İstanbul Gelişim Üniversitesi - Uzaktan Eğitim Birimi	Yazılım Uzmanı
2014-2015	SUNNY (Atmaca Elektronik)	Üniversite Stajı
2012-2013	Koroza Ambalaj	Lise Stajı

Yabancı Dil

Dil	Okuma	Yazma
İngilizce	İyi	İyi

Hobiler

Satranç oynamak, Kitap okumak, Hobi elektroniği.



GELİŞİM GELİŞMEKTİR...