

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PALETLİ MOBİL MANİPÜLATÖR TASARIMI VE MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mustafa Tolga YAVUZ
(518111026)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

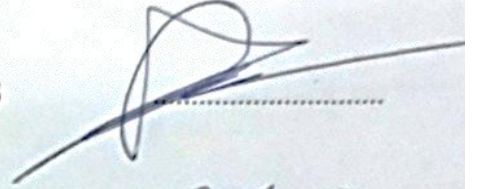
Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ

HAZİRAN 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518111026 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **M. Tolga YAVUZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“PALETLİ MOBİL MANİPÜLATÖR TASARIMI VE MODELLENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi



Jüri Üyeleri : **Y. Doç. Dr. Murat YEŞİLOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Levent GÜVENÇ
Okan Üniversitesi



Teslim Tarihi : **5 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **6 Haziran 2014**

Yitip giden gençliğime,

ÖNSÖZ

Bilgi berekkettir...

Mayıs 2014

Mustafa Tolga Yavuz
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	3
1.3 Hipotez	6
2. MOBİL MANİPÜLATÖRÜN BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI	7
2.1 Mobil Platform Tasarımı	7
2.2 Manipülatör Tasarımı	24
3. MOBİL MANİPÜLATÖRÜN ELEKTRİKSEL DONANIMI	31
3.1 Elektronik Kontrol Kartları	31
3.2 Güç Sistemi	35
3.3 Eyleyiciler	37
3.4 Algılayıcılar.....	41
4. DİNAMİK MODELLENME	45
4.1 Mobil Manipülatörün Kinematik Modellenmesi.....	45
4.1.1 Uzaysal operatör cebri	45
4.1.2 Manipülatör kinematik modeli.....	49
4.1.3 Mobil platform kinematik modeli	56
4.1.4 Mobil manipülatör kinematik modeli	61
4.2 Mobil Manipülatörün Kinetik Modellenmesi	62
4.2.1 Manipülatör kinetik modeli.....	62
4.2.2 Mobil platformun kinetik modeli.....	68
4.2.3 Mobil manipülatör kinetik modeli	71
5. HAREKET KONTROLÜ VE BENZEŞİMİ	73
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
7. KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ.....	95

KISALTMALAR

BD	: Bilgisayar Destekli
BDT	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CPU	: Merkezi İşlemci Birimi
EKF	: Geniştirilmiş Kalman Filtresi
I/O	: Giriş Çıkış
IMU	: İvme Ölçme Ünitesi
MM	: Mobil Manipülatör
MP	: Mega Piksel
MÖ	: Milattan Önce
PID	: Orantı İntegral Türev Denetim
PWM	: Sinyal Genişlik Modülü
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
UOC	: Uzaysal Operatör Cebri

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Mobil platform ebatlar.....	9
Çizelge 2.2 : 7075 alüminyum alaşımın mekanik özellikleri.	19
Çizelge 4.1 : Paletlerin çeşitli yüzeyler üzerindeki yanal kayma sürtünmesi değerleri.	70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Çeşitli tipteki robotlar.....	2
Şekil 1.2 : Mobil robotlarda sık kullanılan tekerlek çeşitleri.....	2
Şekil 1.3 : Mobil robotlardaki sürüş çeşitleri.....	2
Şekil 1.4 : Hibrid mobil robot.....	4
Şekil 1.5 : Mobil robot.....	4
Şekil 1.6 : Ticari mobil manipülatörler: (a)Telemax. (b)Chaos. ...	5
Şekil 1.7 : Akademik mobil manipülatörler: (a)Good Samaritan. (b)Resquake.	5
Şekil 2.1 : Mobil manipülatör.....	7
Şekil 2.2 : Mobil platform: (a)Önden Bakış. (b)Üsten Bakış.....	8
Şekil 2.3 : Hareket kipleri.....	9
Şekil 2.4 : Hareket kipleri (Devam).....	10
Şekil 2.5 : İki tekerlekli ve paletli tekerlekli mobil robot çeşitleri	11
Şekil 2.6 : Palet kollarındaki süspansiyon sistemi.....	12
Şekil 2.7 : Ana tahrik kasnağındaki süspansiyon sistemi.....	12
Şekil 2.8 : Mobil platform bileşenler.....	13
Şekil 2.9 : Mobil platform gövde çeşitleri.....	14
Şekil 2.10 : Mobil platform 3B model normal hal paletli hareket kipi.....	15
Şekil 2.11 : Mobil platform 3B model ters hal paletli hareket kipi.	16
Şekil 2.12 : Palet kollarındaki engel aşma kipindeki açısal hareket girişleri.	16
Şekil 2.13 : Palet kollarındaki engel aşma kipi için tanımlı tork girişleri.	17
Şekil 2.14 : Palet kollarındaki tırmanma kipi için tanımlı açısal hareket girişleri ..	17
Şekil 2.15 : Palet kollarındaki tırmanma kipi için tanımlı tork girişleri.....	18
Şekil 2.16 : Palet kollarındaki yunuslama kipi için tanımlı açısal hareket girişleri ..	19
Şekil 2.17 : Palet kollarındaki yunuslama kipi için tanımlı tork girişleri.....	19
Şekil 2.18 : Ön palet kollarına etkiyen kuvvetler neticesindeki şekil değişimi.....	20
Şekil 2.19 : Ön palet kollarına etkiyen kuvvetler neticesindeki gerilme dağılımı.....	20
Şekil 2.20 : Arka palet kollarına etkiyen kuvvetler neticesindeki şekil değişimi.....	21
Şekil 2.21 : Arka palet kollarına etkiyen kuvvetler neticesindeki gerilme dağılımı..	21
Şekil 2.22 : Et kalınlığı artırılmış arka palet kollarındaki gerilme dağılımı.....	22
Şekil 2.23 : Et kalınlığı artırılmış arka palet kollarındaki şekil değişimi.	22
Şekil 2.24 : Çelik malzeme atanmış arka palet kollarındaki şekil değişimi.	23
Şekil 2.25 : İç kiriş eklenmiş arka palet kollarındaki gerilme dağılımı.....	23
Şekil 2.26 : İç kiriş eklenmiş arka palet kollarındaki şekil değişimi.	24
Şekil 2.27 : Beş serbestlik dereceli manipülatör bileşenler.	25
Şekil 2.28 : Manipülatörün uzuvları arası güç iletimi.	25
Şekil 2.29 : Yüksüz durumda manipülatör uzuvlarındaki açısal hareket girişleri....	26
Şekil 2.30 : Yüksüz durumda manipülatör uzuvlarına etkiyen torklar.....	26
Şekil 2.31 : 0.5 kg yük altında manipülatör uzuvlarına etkiyen torklar.	27
Şekil 2.32 : 1 kg yük altında manipülatör uzuvlarına etkiyen torklar.	27
Şekil 2.33 : Manipülatör uzuvlarına etkiyen kuvvetler neticesindeki şekil değişimi.28	

Şekil 2.34 : 1 kg yük altında manipülatör uzuvlarına etkiyen torklar.....	29
Şekil 3.1 : Donanım şeması	32
Şekil 3.2 : Raspberry pi model b ve mimarisi.....	33
Şekil 3.3: Raspberry pi model b bağlantı şeması.....	33
Şekil 3.4 : Arduino mega 2560 ve teknik özellikleri.	34
Şekil 3.5 : Kuru akü ve li-po pil.....	36
Şekil 3.6 : 16'lı 5v röle ve 5v 3a voltaj regülatör kartı.	36
Şekil 3.7 : Manipülatöre ait pololu enkoderlı redüktörlü dc motor	37
Şekil 3.8 : Bilek uzvuna ait çeşitli tipteki towerpro servo motorlar.	38
Şekil 3.9 : Platforma etkiyen kuvvetlerden motor seçimi.....	38
Şekil 3.10 : Paletlere ait zheng enkoderlı redüktörlü dc motor.	39
Şekil 3.11 : Palet kollarına ait zheng enkoderlı redüktörlü dc motor.	39
Şekil 3.12 : Mc33926 dc motor sürücü ve devre şeması	40
Şekil 3.13 : Maestro 6 kanallı servo motor sürücü kartı.	40
Şekil 3.14 : 2 Kanallı manyetik palet enkoderları.	41
Şekil 3.15 : Sensörler : (a) 6 eksen ivme ve gyro sensörü. (b) 3 eksen ivme ölçer. ..	41
Şekil 3.16 : Ultrasonik ve kızılötesi mesafe sensörü.	42
Şekil 3.17 : Raspberry pi kamera modülü.....	42
Şekil 3.18 : Sensörler : (a) Ateş algılayıcı. (b)Yanıcı gaz. (c) Barometrik basınç. (d)Nem sensörleri.	42
Şekil 4.1 : Mobil robot dinamik model bileşenleri.	45
Şekil 4.2 : Rijit cismin kinematiği.	46
Şekil 4.3 : Rijit cismin kinematik diyagramı.	47
Şekil 4.4 : Rijit kolların kinematik diyagramı.	49
Şekil 4.5 : Eylemsiz çerçevede paletli mobil robot.	50
Şekil 4.6 : n-uzuvlu açık zincirli sabit platformlu seri manipülatör.	50
Şekil 4.7 : Mobil robot üzerindeki manipülatör.....	52
Şekil 4.8 : Başlangıç durumunda manipülatör üzerindeki eksen takımları.	53
Şekil 4.9 : Manipülatör ait dönme ve uzuv vektörleri.	53
Şekil 4.10 : Mobil platformun paletli kipteki hareketi.....	56
Şekil 4.11 : Mobil platformun düzlemsel hareketteki kinematik modeli.	57
Şekil 4.12 : Platforma ait dönme ve öteleme vektörleri ile dönel ve prizmatik eklemler.	59
Şekil 4.13 : i. uzva etkiyen kuvvetler.....	62
Şekil 4.14 : Mobil platformun düzlemsel hareketteki kinetik modeli.	69
Şekil 4.15 : Paletlerdeki dönme direnci M_R ve normal basınç dağılımı	70
Şekil 5.1 : Mobil platform kontrol sistemi.....	73
Şekil 5.2 : Recurdyn benzeşim ortamındaki test sahasında mobil manipülatör.	74
Şekil 5.3 : Kontrolörsüz platformun tanımlanan doğrusal hareket için yörüngesi.	74
Şekil 5.4 : Kontrolörsüz mobil platform için dönme açısı değişimi	75
Şekil 5.5 : Pıd kontrolörlü platformun doğrusal hareket için takip ettiği yörünge	75
Şekil 5.6 : Pıd kontrolörlü mobil platform için dönme açısı değişimi	76
Şekil 6.1 : Durgun haldeki platformdaki manipülatör için tanımlanan hareket : (a)İlk konum. (b)Son konum.	77
Şekil 6.2 : Ouc ile hesaplanan uzuv hız ve ivmelerini gözlemlemek amacıyla oluşturulan simulink blok diyagram	78
Şekil 6.3 : Msc Adams'da manipülatör uç noktasına ait ölçülen uzaysal hız	79
Şekil 6.4 : Simulinkde manipülatör uç noktasına ait uzaysal hız girişi	80
Şekil 6.5 : Msc Adams'da manipülatör uç noktasına ait ölçülen uzaysal ivme	81

Şekil 6.6 : Simulinkde manipölatör uç noktasına ait uzaysal ivme girişı	82
Şekil 6.7 : Uoc ile hesaplanan uzuv açısal hızları	83
Şekil 6.8 : Euler lagrange ile hesaplanan uzuv açısal hızları	83
Şekil 6.9 : Msc Adams programında ölçülen uzuv açısal hızları	84
Şekil 6.10 : Uzuv-1 ve uzuv-2 için hesaplanan açısal hızlar	85
Şekil 6.11 : Uzuv-3 ve uzuv-4 için hesaplanan açısal hızlar.....	86
Şekil 6.12 : Uoc ile hesaplanan uzuv açısal ivmeler	87
Şekil 6.13 : Euler lagrange ile hesaplanan uzuv açısal ivmeleri	87
Şekil 6.14 : Uzuv-1 ve uzuv-2 için hesaplanan açısal ivmeler.....	88
Şekil 6.15 : Uzuv-3 ve uzuv-4 için hesaplanan açısal ivmeler.....	89
Şekil 6.16 : Msc Adams programında ölçülen uzuv açısal ivmeler	90

SEMBOL LİSTESİ

$\vec{a}$	: Uzaysal Bias Terimi
$\mathbf{A}(\mathbf{q})$	: Kısıt Matrisi
$\vec{b}$	: Uzun Artık Vektörü
$\mathbf{C}$	: Koriolis İvmesi
δ_M	: Manevra Kabiliyeti
δ_s	:Yönlendirme
δ_m	: Hareket Yeteneği
$\vec{F}$	: Uzaysal Kuvvet Vektörü
$\tilde{F}$	: Genişletilmiş Uzaysal Kuvvet Vektörü
$\vec{h}$	: Dönme Vektörü
$\vec{H}$	: Uzaysal Dönme Vektörü
$\tilde{H}$	: Genişletilmiş Uzaysal Dönme Vektörü
$I_{3 \times 3}$	: 3x3 Birim Matris
$\mathbf{J}$	: Atalet Momenti
$\mathbf{J}$	: Jakobyen Matrisi
$\mathbf{J}^{-1}$	: Jakobyen Matrisin Tersisi
$\vec{l}$	: Uzun Vektörü
$\mathbf{M}$	: Kütle Matrisi
$\times$	: Vektörel Çarpım Operatörü
$\mathbf{O}_{3 \times 3}$	: 3x3 Sıfır Matris
$\mathbf{q}$	: konfigürasyon vektörü
$\emptyset$	: Dönme Açısı
$\wedge$	: Çarpımsal Simetri Operatörü
Φ	: Genişletilmiş Yayılım Matrisi
$\tilde{\Phi}$	: Yayılım Matrisi
$\vec{r}$	: Yer Değiştirme Vektörü
$\vec{r}_{./}$	: Bağlı Yer Değiştirme
τ	: Tork vektörü
$\vec{v}$	: Hız Vektörü
$\vec{v}_{./}$	: Bağlı Hız Vektörü
$\vec{V}_t$	: Uç Noktası Uzaysal Hız Vektörü
$\vec{V}$	: Uzaysal Hız Vektörü
$\tilde{V}$	: Genişletilmiş Uzaysal Hız Vektörü
$\vec{w}$	: Açısal Hız Vektörü
μ_r	: Yuvarlanma Direnci

PALETLİ MOBİL MANİPÜLATÖR TASARIMI VE DİNAMİK MODELLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, dış ortamlarda kullanılmak üzere paletli mobil manipülatör tasarımının yapılması, aracın dinamik modelinin sistematik bir şekilde uzaysal operatör cebirinden faydalanılarak çıkarılması ele alınmıştır. Tasarlanan aracın mobil platformu üzerinde konstrüktif açıdan hareket kabiliyetini yani mobilitesini mevcut mobil robotlara göre artıracak bir takım iyileştirmeler yapılmış ve üzerine yerleştirilen algılayıcılar ile de çevresiyle olan etkileşimine karşı yarı otonom özellik kazandırılmış böylece üzerine gömülü olarak yerleştirilen manipülatörün sonsuz bir çalışma uzayında çeşitli görevleri yerine getirirken manipülasyon potansiyeli artırılmıştır. Lakin aracın artan karmaşık yapısı, dinamik platformla manipülatör arasındaki dinamik etkileşimden ve holonomik olmayan kısıtlardan kaynaklanan bir takım problemleri doğurmakta, bunun neticesinde de aracın dinamiğini açıklayacak yeni dinamik ifadelerle başvurulmasına zorunlu kılmaktadır. Bundan ötürü tasarlanan aracın dinamik modeli, robot dinamiğinde yeni bir yöntem sayılabilecek primitif olarak sunduğu çözüm ile paralel veya seri uzuvlu açık zincirli mekanizmalar ile kapalı çevrimli veyahut ağaç topolojisine sahip karmaşık mekanizmaların ifadelerini temel dinamik prensiplere göre uzaysal olarak etkili bir şekilde kolayca çıkarmayı sağlayan uzaysal operatör cebri ile açıklanmaktadır. Bu yöntem basitçe, birbirine bir eklemlerle bir noktadan bağlanmış bağıl hareket etmekte olan uzuvların bağıl hız denklemlerindeki vektörel çarpım ifadelerini matematiksel ara bir işlemle, doğrusal bir operatör ile, iki matrisin skaler çarpımına dönüştürmekte; bulunan ifadenin n -uzuvdan oluşan sistemler üzerinde uygulanmasıyla da tüm sistemin hareketi açıklayan uzaysal ifadelerin elde edilmesi şeklinde açıklanabilir. Bulunan bu ifadelerin basit matematiksel deyimlerle ifade edilişi ve sade fiziksel anlatımından dolayı n -uzuvdan oluşan sistemlerde uzaysal olarak kendini tekrar eden ifadelerden faydalanılarak uzaysal operatör cebri için etkili döngüsel algoritmalar geliştirilebilir. Bu döngülerin hesaplanma karmaşıklığı da serbestlik derecesi ile doğrusal olarak artmakta olduğundan düşük serbestlik dereceli sistemlerde daha etkili gerçek zamanlı benzetimler olasıdır. Elde edilen ifadeler aracılığıyla aracın verilen bir yörüngeyi takip etmesi problemi, mobil platform üzerindeki holonomik olmayan kısıtların korunduğu durumdaki kısıtlar ve ani dönme merkezine göre oluşturulan kinematik tabanlı modelin PID kontrolünün yapılması ile çözülmekte olup matematiksel ifadelerden hareketi açıklayan algoritmaların simülasyon programında tanımlanan araç modeli üzerine kontrol bloğuyla birlikte etkilmesiyle bu çalışma tamamlanmaktadır.

TRACKED MOBILE MANIPULATOR DESIGN AND DYNAMICAL MODELLING

SUMMARY

Etymologically, the word robot is used for autonomous or manual mechatronic systems having sensors, controller, motors and drivers which are creating body links moving wanted objects at the present time, while firstly used for human effort serving in factory instead of artificial people in Karel Capek's play named as Rossum's Universal Robots. Advancing technology up to developing semiconductor technology cause an acceleration in the robotic field and beginning the trip of robot B.C. 2500 in Egypt becomes an indispensable part of our lives due to operating ability in a hazardous environment, providing high precision and yield, low producing costs in manufacturing, continuity and endurance. They can be classified fixed and mobile according to locomotion ability of base platform, also they can be classified industrial, medical, social, specialist according to usage fields. In this study, mobile specialist robots are examined, which are not fixed to a physical point or location, and can move freely in a defined environment as serving predefined duties. Meanwhile, they vary according to locomotions such undulated, tracked, biped etc. and wheel and locomotion type under the ground robots title. If wheel type classification is discussed, there are to be fixed, centered oriented, swedish, offset centered oriented and screw as wheel type. Similarly, there are few different locomotion mechanism used in ground wheeled robots which are differential, omni-directional, ackerman, steered wheels, synchronous. In the past two decades, there has been observed a growing research in the mobile robotics due to various reasons which some of them told above. Some of these reasons can be ordered as urban search and rescue, explosive ordnance disposal, military missions, hazardous environment exploration such as nuclear areas or collecting datas in planet exploration missions etc. Up to these facts focus on this field, it is compulsory to consider new design and methods for modelling of mobile platforms with manipulator. Therefore, many academic and industrial mobile robots were designed and demonstrated until now and will continue from now on. For these reasons described, design and modelling of domestic mobile robot with domestic labor and capital is the inevitable need for every nation. In this graduation study, presentation of tracked skid-steered mobile manipulator operating on various rough terrains and dynamical modelling in a systematic way by using spatial operator algebra is aimed and realized by the help of various computer aided designing and simulation softwares which are Dassault Catia and Solidworks, Siemens Nx Unigraphics, Ansys, Msc Adams and Functionbay Recurdyn used to complete this study virtually in design and modelling steps before manufacturing first prototype. After that, algorithm of spatial operator algebra tested over the virtual prototype running realistic virtual environment by the help of Matlab/Simulink software communicating computer aided design and simulation softwares mentioned above.

Before starting to tell design process and modelling algorithm, some facts have to be clarified, one of them is electrical and electronic components. During this study, stock parts were used instead of redesign circuits which are used to control trajectory, actuators and include classical unmodelled based control algorithms with dynamical model of skid steered tracked mobile manipulator. Also, current and voltage consumed via actuators are controlled by these stock subelectronic components (arduino mega 2560) containing avr microcontroller working in the service of main computer circuit (raspberry pi model b) containing arm microprocessor. In mechanical design process, attention has been paid to some cases related to arm and track system mechanism, manipulability, maneuverability that is combination of steerability and mobility. Mobility of the platform is combined with manipulability of embeded manipulator mounted on the platform. Hence, the mobile platform provides mobility while the 5 dof manipulator provides manipulation. In this way, manipulability of embeded manipulator mounted on platform increases while performing a various tasks in an unlimited working space. To increase maneuverability in tough zones, which thoroughly depends on robot's locomotion and dimensions, various locomotion modes were defined such as climbing, flipper, obstacle overcoming etc. by dividing track systems into two part which is consisting of two sub-arm and dimensions of platform were optimized as much as no empty volume in the body of platform. Meanwhile, differential steering system was preferred due to simple and robust structure under variable loads. In fact, working zone terrain is efficient on this choice due to soft and rough structure. The other case paid attention is place of mass center which determines instantaneous center of rotation, consumed energy by track arm actuators and stability during a motion. Therefore, power pack and various actuators driving arm links and tracks were placed specific positions in the platform inner body to obtain the center of mass at the middle of platform. The final design consideration is structure of track system in which smooth motion ability of bi-wheel type mobile robots and robust structure to slipping are combined. Also, added suspension system containing torsional and pressure spring with aeral damper between platform and track arms provides robustness towards to disturbance effects due to terrain conditions. At the end of mechanical design process, strength of overall structure of mobile manipulator were controlled by finite elements software and inner polyamid supports were required to increase endurance of manipulator and track arms manufactured from a thin sheet metal. In dynamical modelling step, increased complexity of robot causes some problems due to interaction between manipulator and platform, and nonholonomic constraints, so applying new solution methods governing robot dynamics is necessary to obtain dynamical model of robot. Also, nonlinear, coupled equations of dynamics and difficulties to meet the requirements of real time simulation obligates that. Therefore, dynamical model of designed robot can be expressed more efficient and a simplified way by help of spatial operator algebra which is an almost new method based on basic fundamental dynamic principles between two relatively moving rigid links. In this method, relative velocity relation between links attached to each other via a joint is presented with scalar product instead of vectoral product by using operator called as spatial operator and applied over whole system to explain spatial velocity equation in matrix form. In other words, dynamical equation of motion for complex system is expressed in a concise and systematic formulation via spatial operators. Also, spatial operator algebra provides high level frameworks for describing the dynamic behaviour of robot and for control and trajectory design algorithms. The only drawback of this method is singularity problem of jacobian

matrix if jacobian is not square. In these cases, jacobian matrix transform into pseudo jacobian matrix via additional calculation to obtain square matrix. However, fast solution algorithm for real time systems and easily modelling abstract expressions of high level structures via link and rotation vectors and ease of implementing are some advantages of this recursive method. Furthermore, distribution of velocity, acceleration and forces through rigid links are shown via propagation matrix which can present an obvious physical interpretations. As a final step, this study based on spatial operator algebra method algorithm were simulated via both Msc Adams and Matlab/Simulink by communicating them each other and results were discussed with Euler Lagrange based algorithms. Also, trajectory control of platform was observed and compared under PID controller and without controller in the light of kinematic equations by assuming conserved nonholonomic constraints and this study was concluded via implementing control algorithm to mobile robot simulink block. Briefly, maneuverability on the mobile platform is increased by improving it structurally when compared existing mobile robots in this area. So, new design based on this fact were realized and almost new dynamical modelling method, spatial operator algebra, were used over the system to make quick calculations for real-time operating. Therefore, fast decisions can be taken for collecting datas from environment via sensors. In these fast decisions, working frequency of main electronic circuits is efficient, so raspberry pi providing interface between user and robot was preferred to other ones. In addition to mentioned above, some problems were come accross due to singularity of jacobian matrix which causes faulty resuts and so decomposition of matrix applied to overcome this problems.

1. GİRİŞ

Etimolojik olarak Karel Čapek'in "*Rossum'un Akıllı Robotları*" adlı tiyatro oyununda fabrikalardaki insan işgücünün yerini alan akıllı makineler için kullandığı **robot** tabiri, günümüzde "*duyargaları, kontrol sistemleri, motor ve sürücülerden oluşan eyleyicileri ve bedensel uzuvları ile nesneleri istenildiği şekilde hareket ettirmek için kullanılan otonom veya kumanda edilen mekatronik sistemler*" için kullanılmakta olup [22], M.Ö. 2500'lü yıllarda Mısır'da başlayan serüveni yarı iletken teknolojisinin gelişmesi ile paralel olarak gelişen teknolojiyle birlikte ivme kazanmış hayatımızın her alanında işgücü maliyetlerini azaltması, tehlikeli ortamlarda çalışabilmesi, yüksek hassasiyet ve verim sağlaması, sürekliliği vb. gibi avantajlarından ötürü, çağımızın vazgeçilmez ihtiyaçlarından olmuştur.

Kullanım alanlarına göre, endüstriyel, medikal, servis, uzman, sosyal robotlar olarak sınıflandırılabilirken hareket kabiliyetlerine göre de sabit ve gezer tabanlı olmak üzere iki alt başlığa ayrılabilir (bkz. Şekil 1.1). Bu başlıklardan incelenecek olan gezer veyahut mobil robotlar, fiziksel bir noktaya sabitlenmemiş serbest hareket imkanına sahip, tanımlanmış bir çevrede gerçekleştirmeleri istenen fonksiyonlara göre hareket ederek görevlerini yerine getirebilen daha karmaşık kontrollere, daha yüksek performanslı ve daha çok tipte sensöre ihtiyaç duyan robotlardır [25]. Hareket sistemlerine göre tekerlekli, paletli, ayaklı ve uçan veya yüzen (undulating) şeklinde çeşitlilik gösteren mobil robotlar, bu kabiliyetlerine göre insanların çalışması için uygun olmayan sahalardaki görevleri rahatlıkla yerine getirebilirler.

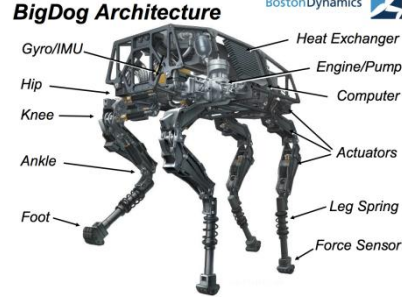
Bu amaçla mobil robotların üzerine manipülatör eklenmek suretiyle bilgisayar ve çeşitli sensörlerle donatılmış platformun hareketliliği ile manipülasyon yeteneği biraraya getirilerek üretimde, nükleer reaktör bakımında, inşaat, enkaz ve gezegen keşiflerinde veyahut arama kurtarma amaçlı görevlerini yerine getirebilen yüksek potansiyelli robotlar elde edilir. Lakin bu durumun yapısal karmaşıklığı artırmasından ötürü mobil manipülatörde platform ile manipülatör arası dinamik etkileşim, nonholonomik kısıtlar, farklı bant genişlikleri ve serbestlik derecesindeki fazlalıktan kaynaklanan bir takım sorunlar meydana gelmektedir [1].



(a)



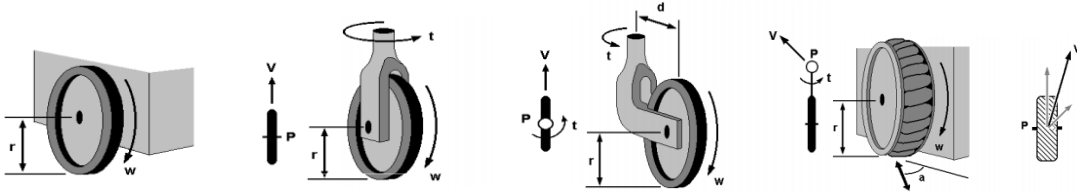
(b)



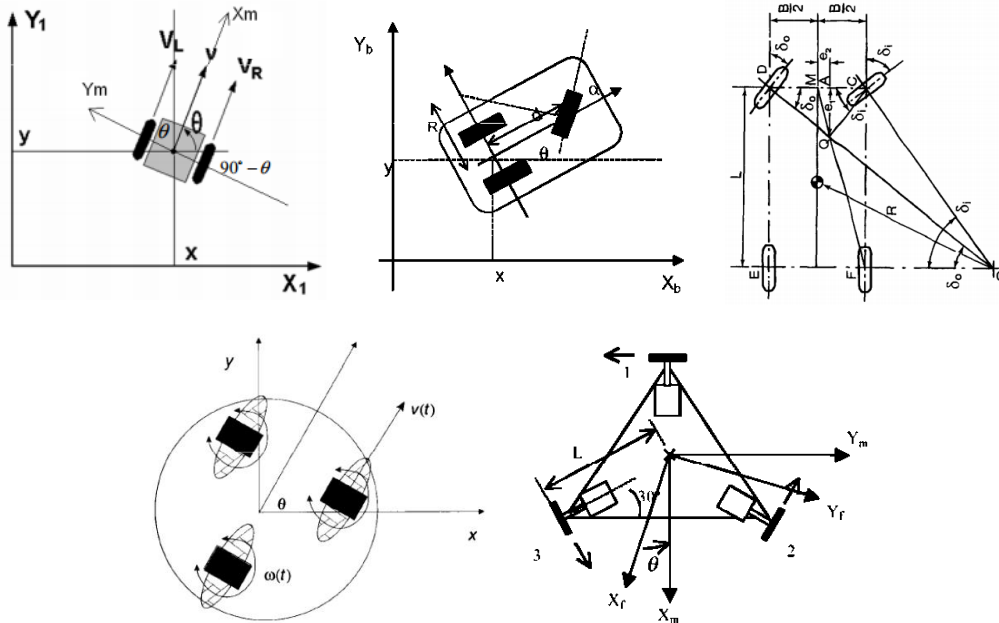
(c)

Şekil 1.1: Çeşitli tipteki robotlar : (a)Endüstriyel puma560. (b)Medikal davinci. (c)Uzman bigdog.

Bu arada, karasal mobil robotların hareketinde yüksek verim sağlamasından dolayı tercih edilen tekerlekli yapılar; tekerlek tipleri, yerleşimleri ve yönlendirmelerine göre alt sınıflara taksim edilmektedir. Teker tipleri olarak sabit, dönel merkezli, ötelenmiş merkezli, isveç ve vida teker vb. (bkz. Şekil-1.2) öne çıkarken yönlendirme olarak da diferansiyel sürüşlü, yönlendirmeli tekerli, ackerman sürüşlü, senkron sürüş ve tüm yönlü sürüş tipleri vardır (bkz. Şekil-1.3). Tekerlek yerleşimi ise tekerlek tipi,sayısı ve yönlendirme çeşidinin kombinasyonlarıdır.



Şekil 1.2: Mobil robotlarda sık kullanılan tekerlek çeşitleri



Şekil 1.3: Mobil robotlardaki sürüş çeşitleri

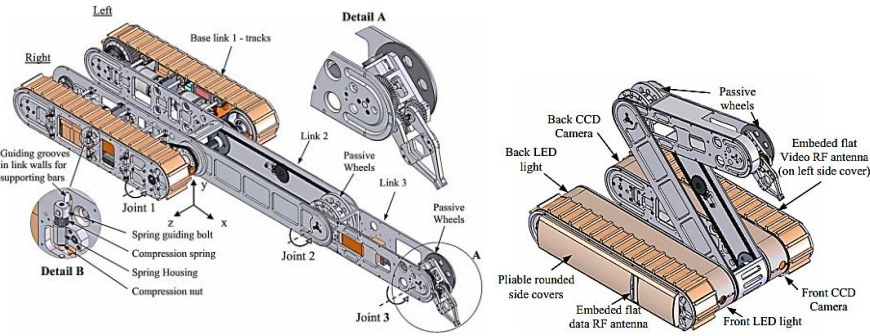
1.1 Tezin Amacı

Bu tezin gayesi engebeli ve pürüzlü zeminlerde yüksek hareket kabiliyetine sahip üzerine yerleştirilen duyargalar ile engeller karşısında yarı otonom karar alabilen paletli mobil manipülatörün tasarlanması ve dinamik modellenmesidir. Tasarım safhasında mevcutlarına nazaran hareket kabiliyetini artıracak konstrüksiyon geliştirilerek yapısal olarak kararlı olması, modelleme safhasında da benzer şekilde rekürsif sistemler için uygulabilen algoritmalarından biri olan uzaysal operatör cebirinden faydalanarak etkili ve basit bir çözüme gidilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca aracın basitçe hareket kontrolü yapılarak tanımlanacak olan yörüngesinden minimum seviyede sapması için kinematik tabanlı PID kontrol yapılarak sonuçlar gözlenmekte, benzeşim programlarından faydalanarak da imalat öncesi kontrüksiyonun mukavemeti ve hareket esnasındaki dinamiği hakkında fikir edinmek diğer gayelerdir.

1.2 Literatür Araştırması

Geçmiş yıllarda mobil manipülatörler üzerine pek çok çalışma yapılmasına rağmen tasarım ve hareket kabiliyeti açısından yenilikçi pek az araç geliştirilmiş, dinamik modelleme bakımından da mevcut model yaklaşımların tekrarı sunulmuştur. Bu araçların platformlarının dinamik modelleri, Bekker'ın [2] paletli taşıtlar için geliştirdiği esaslara dayanmakta iken manipulatör kısımlarının çözümleri de DH parametrelerinden hareketle yapılmaktadır. Lakin her ne kadar az kullanılsa da algoritmik açıdan rekürsif bir çok yöntem mevcuttur. Teorik esasları detaylı olarak Bölüm 4'de anlatılmakta olan uzaysal operatör cebri bunlardan bir tanesidir. Temelleri doksanlı yıllarda Rodriguez, Kreutz-Delgado ve Jain tarafından atılan bu methodun elemanları olan liner işleçler, ait olduğu çalışma uzayını açıklamak için kullanılan kuvvet, moment, hız ve ivmeler ile temsil edilmekte olup manipülatörün uzuvları boyunca uzaysal olarak kendini yineleyerek manipülatörün dinamiğini, kontrolünü ve yörünge tasarım algoritmalarını açıklamak için yüksek seviyeli iskelet yapı oluşturur. Böylece manipülatör gibi çoklu rijit cisimlerden oluşan sistemlerin kavramsal ve soyut ifadeleri basitleştirilerek fiziksel olarak anlaşılabilir bir hal alır. Bu durum uzaysal işleçlerin özlü ve sistematik formülasyonundan kaynaklanmakta, etkili hesaplama algoritmalarının geliştirilmesini sağlamaktadır [6,7].

Bu yöntemin sağladığı getirilerden ötürü Zhixiang ve Hongtao tarafından düzlemsel bir yüzeyde hareket etmekte olan 3 serbestliğe sahip manipülatör taşıyan mobil robot üzerine yapılan çalışmalarında uzaysal operatör cebirinin sunduğu algoritmaların benzeşim programının sunduğu çözüme göre 10 saniyelik iyileştirme sağladığını rapor etmişler, bundan dolayı da UOC algoritmaların gerçek zamanlı benzeşim için daha etkili olduğunu dile getirmişlerdir [8]. Yapılan diğer çalışmalarda ise daha çok mobil robot tasarımı üzerine odaklanılmış, araç dinamiği mevcut yöntemlere göre açıklanmıştır. Araç tasarımı üzerine yapılan çalışmalardan biri olarak Ben-Tzvi tarafından tasarlanan hibrid uzuvlu mobil manipülatör ön plana çıkmaktadır (bkz. Şekil 1.4).Yaptığı çalışmada manipülatörün tek başına sağladığı manipülasyon yeteneği ile platformun sağladığı mobilitayı kendi aralarında takas edilebilecek yeni tasarım sunmakta, iki ayrı modülü tek bir çatı altında hibrid olarak birleştirmektedir. Böylece manipülatörün lokomasyon yeteneği de kazandığını belirtmektedir [9,11]. Tasarım odaklı gerçekleştirilen bir diğer çalışma ise Yang, Duan ve Zhao tarafından paletli, ayaklı, tekerlekli vb. birden fazla hareket kipinde çalışmak üzere yapılan MOBIT adlı mobil robottur (bkz. Şekil-1.5). Birbirinden bağımsız hareket edebilen kolları sayesinde istenen hareket kipinde çalışabilmekte ve engebeli yol koşullarına adaptasyon sağlayarak çeşitli görevleri rahatlıkla yerine getirebileceği beyan edilmektedir [10].

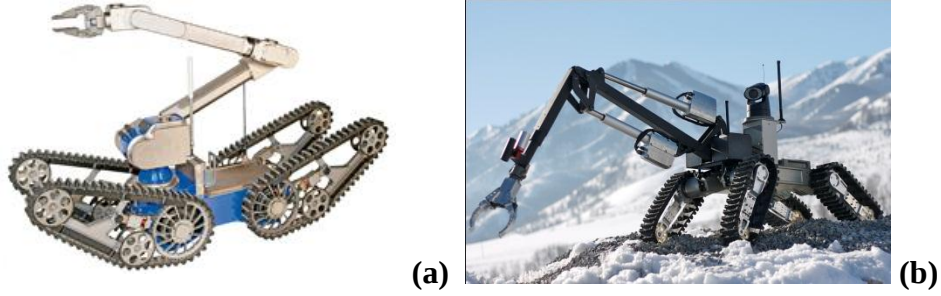


Şekil 1.4: Hibrid mobil robot [9,11]



Şekil 1.5: Mobit robot [10]

Benzer hareket yeteneğinden hareketle tasarlanan ticari mobil manipulatörlerde mevcuttur. Buna örnek olarak, Cobham, Tardec vb. firmalardan tarafından üretilmekte olan Telex, Chaos vb. robotları verilebilir.



Şekil 1.6: Ticari mobil manipulatörler: (a)Telex. (b)Chaos.

Değınmeden geçilemeyecek bir çalışmada Colorado Eyalet üniversitesi tarafından tasarlanan Good Samaritan adlı robottur. Üç çubuk mekanizmasının sağladığı esneklikle arama kurtarma amaçlı tasarlanan araçta palet kolları istenilen konuma getirilerek hareket kabiliyeti artırılmakta, ağırlık merkezinin değışimi ve palet pozisyonlarına bağılı olarak engellerle mücadelesini kolaylaştırmakta olduğı söylenmektedir [24, 17]. Ayrıca Moosavian ve ekibinin yürüttüğü çalışmada ise araç manevra kabiliyetinin araç boyutları ve hareket sistemine bağılı olduğı sonucu ortaya konmuş, simetrik tasarımın ileri ve ters yöndeki hareketine etkisi belirtilmiştir [13].



Şekil 1.7: Akademik mobil robotlar: (a)Good Samaritan [24]. (b)Resquake [13].

Araç dinamiğı üzerine yapılan çalışmalara tekrar dönülecek olursa, yanal kayma ile yönlendirilen mobil robotların engebeli yol koşulları için dayanıklı mekanik yapısından ötürü daha elverişli olduğı Arslan tarafından belirtilmekte olup kayma esnasındaki yol ile araç arasındaki etkileşimden çıkarılan dinamik modelin sistemdeki belirsizlikler ve bozuculardan ötürü uyarlamalı PD kontrol veya dayanıklı kontrol ile kontrol edilmesi yönünde salık verilmektedir [12]. Bu düşüncesinde aracın modelindeki holonomik olmayan kısıtların tam olarak sağlanamaması, varsayımlar altında geçerli olması etkilidir.

Bu belirsizliklerden bir tanesi Tokyo Denki Üniversitesi tarafından modelleme üzerine yapılan çalışmada, kaymasız çizginin yol ile palet tırnakları arasındaki temas şartlarına bağlı olup bunu tahmin etmenin zor olmasından ötürü kaynaklandığı ve aracın otonom olarak kontrolünü zorlaştırdığı belirtilmektedir [14]. Lakin bu duruma karşı Longoria düşük hızlarda hareket olması durumunda kaymaya neden olan centrifüj kuvvetin ihmal edilebileceğini belirtmekte, bundan dolayı da kaymasız çizginin yerinin değişmeyeceği çıkarımı yapılabilmektedir [15]. Modellemedeki esas sorun olarak arazi ile taşıt arasındaki tabiatı gereği doğrusal olmayan etkileşimlerden kaynaklanan yatay ve boylaması doğrultulardaki sürtünme kuvvetlerindeki belirsizliğin ise EKF ile tahmin edilebileceğini dile getirmektedir [15].

1.3 Hipotez

Mobil manipülatörlerin dinamik modeli, gerçek zamanlı simülasyonu ve kontrolü için UOC kullanarak daha etkili bir şekilde yapılabilir. Tasarımı yapılan aracın belirli bir yörüngeyi -doğrusal yörünge- takip etmesi problemi dinamik modeldeki parametrik ifadelerin tasarım üzerinden benzeşim programı vasıtasıyla elde edilmesi neticesinde üzerine uygulanan PID kontrol ile gözlenecek, aracın amortisör sistemi ile filtreleme yapmadan hatanın azaltılmasına çalışılacaktır.

2. MOBİL MANİPÜLATÖRÜN BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI

Hatırlanacağı üzere mobil manipülatörler sınırsız bir çalışma uzayına sahip bir platform ve manipülatörden oluşan karmaşık yapılar olarak tanıtılmıştı. Bu karmaşık üst sistemi dikey yönde daha az karmaşık alt sistemlere ayırarak teknik sistemin konstrüktif geliştirme süreci kolaylıkla incenebilir. Son hali Şekil 2.1’de verilmekte olan teknik yapının bilgisayar destekli tasarım safhasındaki platform ve manipülatörün tasarımları, hangi kısıtlar altında gerçekleştirildiği, dinamik ve yapısal analizi ile imalat prosedürü bu bölümde irdelenecektir.



Şekil 2.1: Yanal yönlendirmeli paletli mobil manipülatör

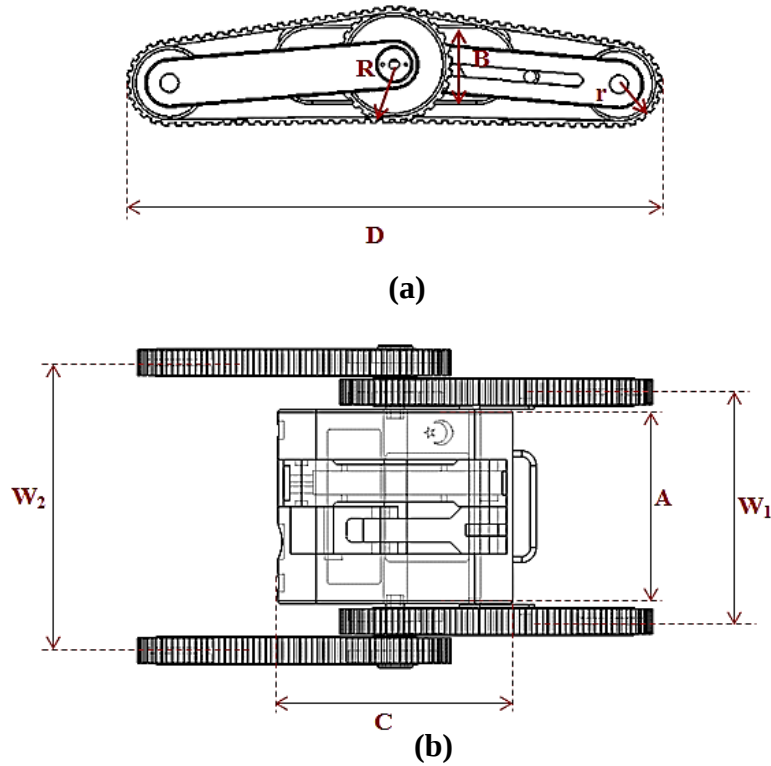
2.1 Mobil Platform Tasarımı

Arama kurtarma, enkaz ve gezegen keşifleri vb. görevleri yerine getirmek üzere mobil manipülatörün gezer tabanının veyahut platform olarak tabir edilen mobil robot kısmının engebeli zeminlerde yüksek hareket kabiliyetinde tasarlanması bu

çalışmanın temel isterlerinden biridir. Mobil robotlarda manevra kabiliyeti (maneuverability) olarak sunulan ve yönlendirilme (steerability) ile hareket yeteneğinin (mobility) birleşimi olan bu özellik aracın boyutlarına ve hareket sistemine (locomotion) doğrudan bağlıdır. Dolayısıyla diferansiyel sürüşlü yanal yönlendirmeli aracın tasarımındaki etmenlerden ilki olarak bu özellik karşımıza çıkmaktadır. Aracın manevra kabiliyeti,

$$\delta_M = \delta_s + \delta_m = 0 + 2 = 2$$

denklemini ile verilmekte olan şekilde hesaplanır. Aracın manevra kabiliyetini belirleyen etmenlerden biri olan boyutları Şekil 2.2 ve Çizelge 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.2 : Mobil platform : (a) Önden bakış. (b) Üsten bakış.

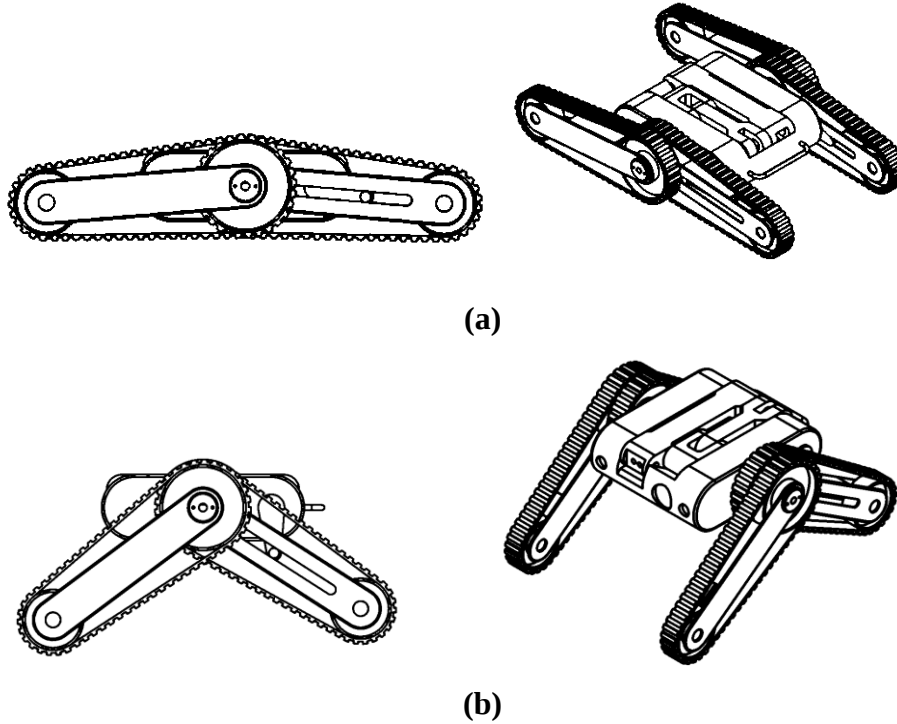
Aracın manevra kabiliyetini belirleyen diğer etmen olan hareket sistemi (locomotion) platformun yüksek esnekliği ve çok yönlülüğü ile farklı hareket kiplerindeki hareketleri gerçekleştirebilmesine olanak sağlamalıdır. Birbirinden tam bağımsız olarak hareket edebilen ön palet kolları ve gövdeye göre kısmi bağımlı hareket edebilen arka palet kolları ile araç, yol koşullarına göre *Paletli*, *Engel Aşma*, *Tırmanma*, *Yunuslama* olmak üzere dört farklı hareket kipinde çalışabilirken, tanımlanan hareket kipleri için aracın üzerinde bulunan ultrasonik, kızılötesi ve eğim algılayıcı duyargalar tarafından yol üzerindeki engel ve engebeler algılanarak

otonom olarak gerçekleştirilmesiyle bu amaç yerine getirilmektedir. Aracın hareket kipleri Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 verilmektedir.

Çizelge 2.1 : Mobil platform ebatlar.

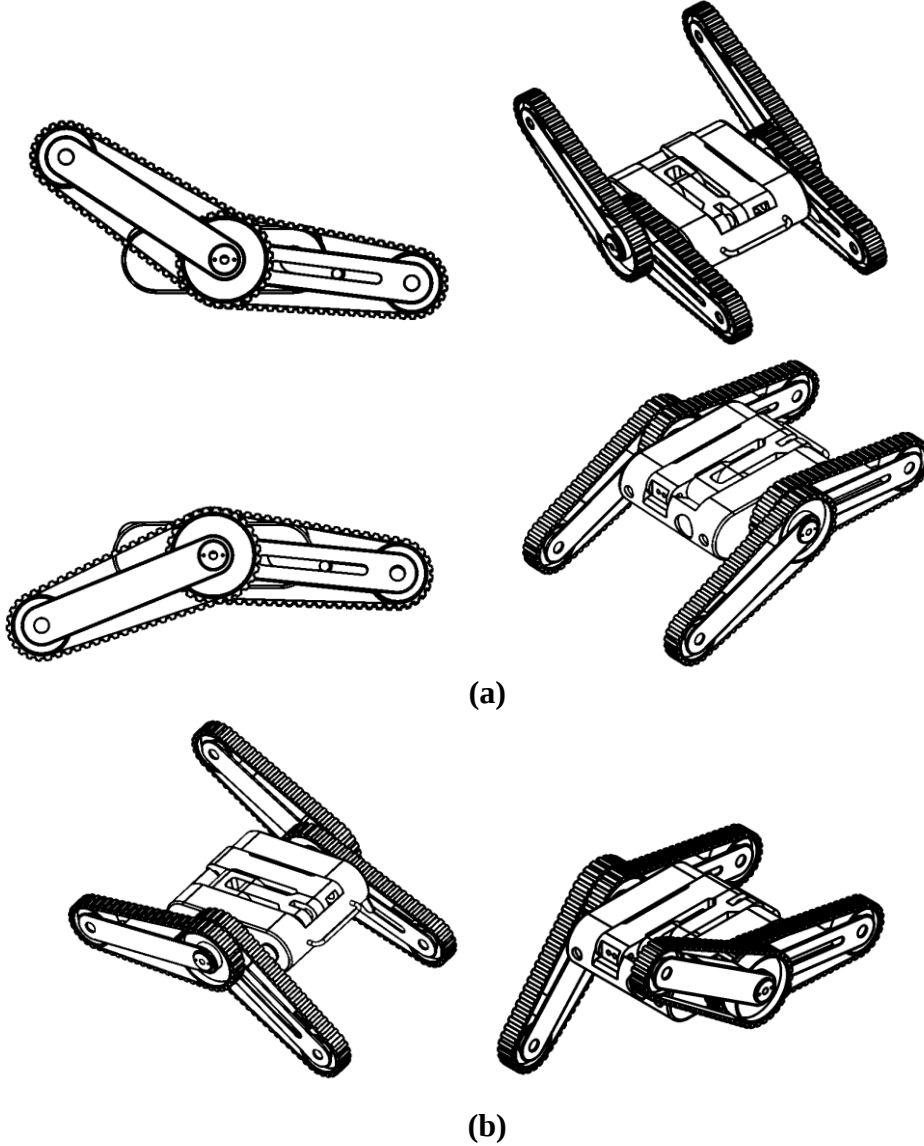
Sembol	Değer [mm]	Açıklama
A	330	Platform Gövde Genişliği
B	130	Platform Gövde Yüksekliği
C	380	Platform Gövde Uzunluğu
D	800	Toplam Palet Uzunluğu
d	50	Palet Genişliği
L	360	Palet Kol Uzunluğu
W₁	420	Arka Paletler Arası Mesafe
W₂	474	Ön Paletler Arası Mesafe
r	40	Küçük Kasnak Yarıçap
R	75	Tahrik Kasnağı Yarıçap

Verilmekte olan hareket kiplerine ne amaçla tanımlandığının anlaşılabilmesi açısından kısaca değinmekte fayda vardır. Paletli hareket modu, araca yumuşak, dengesiz, ıslak veya bataklık zeminde manevra kabiliyeti sağlamak niyetiyle tanımlanmaktadır.



Şekil 2.3: Hareket kipleri : (a) Paletli kip. (b) Engel Aşma kipi.

Ayrıca bu modda eğimli yol veya merdiven tırmanmak da mümkündür. Araç kollarındanki ve tahrik kasnaklarındaki süspansiyonlar ile bu tip yollardan araca etkiyen deplasmanların gövdeye aktarımını azalmaktadır. Engel aşma modu ise platform gövdesini yoldan yukarı kaldırılması ile yol üzerindeki engellerle etkileşimini engelleyerek engebeli zeminlerde rahat hareketini olanaklı kılmak maksadıyla tanımlanmaktadır. Böylece daha dengeli gövde duruşu yani postür elde edilir. Bir diğer hareket modu olan tırmanma modu ise merdiven veyahut eğimli yol gibi zemin koşullarında, paletli modun engeli aşmak amacıyla ön paletlerinin yukarı kaldırılması veya engel olmadığı durumlarda aşağı indirilerek yola teması sağlaması amacıyla kullanılmaktadır. Son olarak tanımlanan hareket kipi ise aracın paletleri ile yol üzerinde hareketi sağlayamadığı durumlar için tanımlanan yunuslama (flipper) modudur.

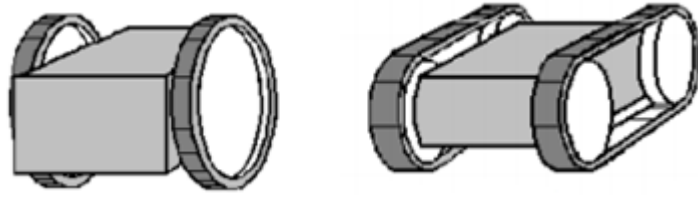


Şekil 2.4: Hareket kipleri : (a)Tırmanma kipi. (b)Yunuslama kipi.

Bu modun tanımlanmasındaki amaç çamur, bataklık veya karlı zemin gibi ortamlarda paletlerin hareketinin yetersiz olduğunun gözlemlenmesinden ötürü yumuşak zeminlerde aracın ön kolların tam bağımsız ve arka kolların yarı bağımlı hareketi sayesinde yüzerek yol alması ihtiyacıdır.

Sonuç itibarıyla burada tanımlanmakta olan hareket kipleri aracın herhangi bir yol üzerindeki hareketini rahatlıkla yerine getirebilmesi için tanımlı temel hareket kipleridir, daha gelişmiş alternatif kiplerin tanımlanabileceği unutulmamalıdır.

Aracın tasarımındaki diğer bir ister ise tanımlanan yörüngedeki hareketini gerçekleştirebilmesi için yumuşak ve engebeli arazi koşullarında basit ve dayanıklı yapı sunmasıdır. Bundan ötürü herhangi bir yönlendirme sistemine sahip olmayan tahrik elemanlarının hızları veya torkları arasındaki farktan dolayı yanal kayma ile yönlendirilebilen diferansiyel sürürlü sistemler tercih edilmektedir [12]. Bilindiği üzere diferansiyel sürürlü sistemler, holonomik olmayan kısıtlara sahip ise tekerlek tiplerine göre paletli veya sabit tekerli olmak üzere iki gruba ayrılır (bkz. Şekil 2.5).

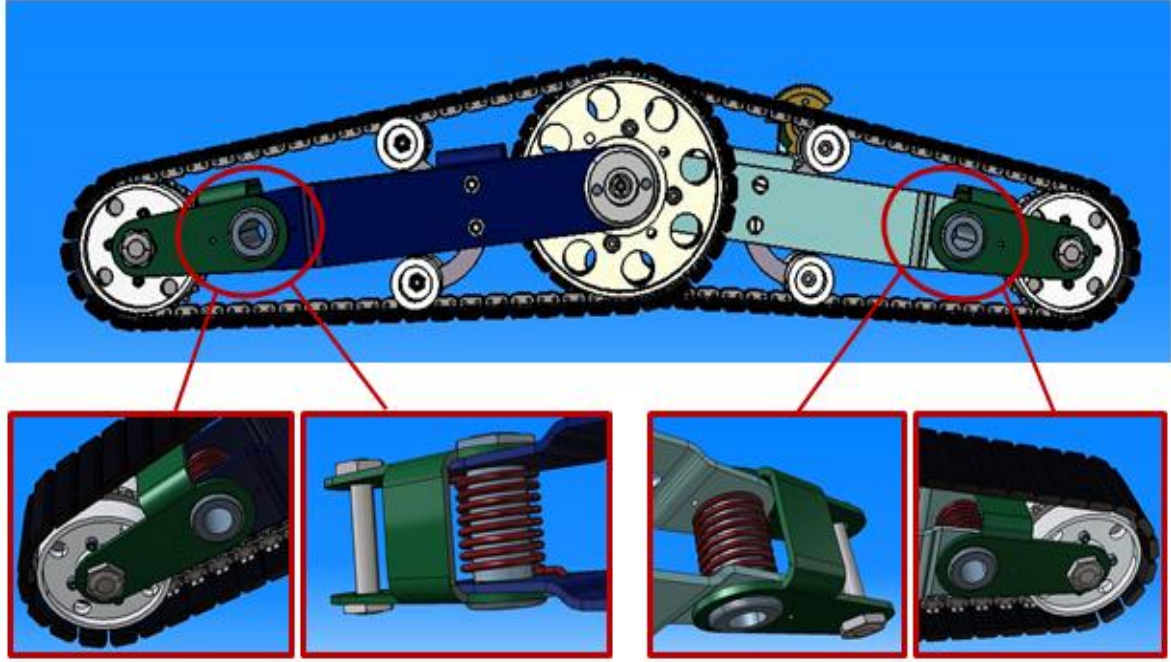


Şekil 2.5: İki tekerlekli ve paletli tekerlekli mobil robot çeşitleri

Tasarlanan aracın mobil platformunda, diferansiyel sürürlü iki tekerli ve paletli yanal yönlendirmeli mobil robotların hassas hareket ve kayma direnci gibi kuvvetli yanları ile teker tiplerinin sağladığı avantajları birleştirmek amacıyla bu iki konstrüktif yapı biraraya getirilmiştir. Böylelikle, gövdeye ve diğer kasnaklara göre büyük seçilen tahrik kasnakları hem devrilmeye karşı direnci artırmakta hem de her türlü arazi koşulunda ve yumuşak zeminde patinaj yapmadan hareketi olanaklı kılmaktadır, kasnakların birbirine kulaklı zincir ve zaman kayışı ile birleştirilmesiyle oluşan palet yapısı da araç ağırlığı zeminde daha geniş bir bölgeye yayarak zeminin sıkışıp kalmasını önlenmekte böylece zemin daha iyi kavranmaktadır. Palet sisteminin, iki parçaya ayrılarak oluşturulan parçalı palet yapısıyla da aracın farklı çalışma kiplerinde hareket edebilmesini sağlanıp sistemin dengelenmesi açısından daha kararlı bir yapı oluşturulmaktadır.

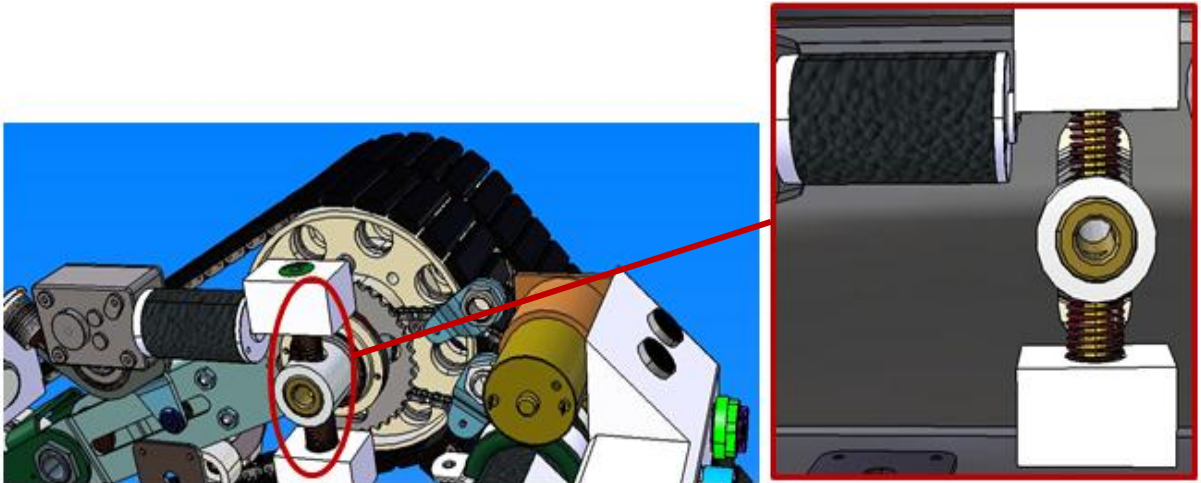
Ayrıca palet kollarının iki parçaya ayrılıp birbirlerine Şekil 2.6’da gösterildiği gibi vida ve burçtan oluşan basit bir dönel eklem ve bu eklem üzerine yerleştirilen torsiyonel yay ilave edilmesiyle oluşan ilkel süspansiyon sistemiyle de yoldan gelen

ani darbelere karşı *Engel Aşma Hareket Kipi* başta olmak üzere araç gövdesinin konforunun sağlanmasına ve etkiyen ani kuvvetlerin sönümlemesine yönelik tedbir alınmıştır.



Şekil 2.6 : Palet kollarındaki süspansiyon sistemi

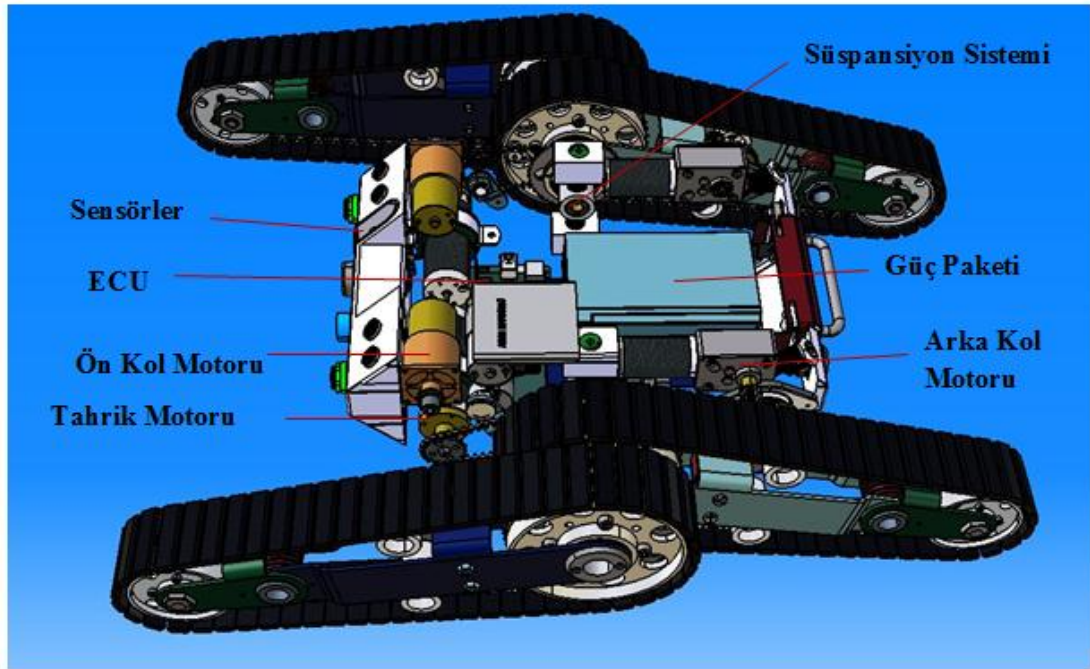
Benzer şekilde ana tahrik kasnaklarını platform gövdesine bağlayan yatakların yuvası da iki basma yayının arasına alınarak yoldan gelen etkilere karşı süspansiyon sistemi ile korunmuştur (bkz. Şekil 2.7). Esasında süspansiyon sisteminin araca dahil edilmesi, yoldan gelen bozucu etkilerin aracı yörüngesinden çıkarması ve bu durumda kalman filtresi ve yörünge kontrolü gibi ek tedbirler olarak çözüme gidilmesi halinde dahi tam olarak sağlıklı sonuç alınamayışındandır. Bu şekilde alınan basit mekanik tedbirler sistemin hatasını azaltmada daha etkili olmaktadır.



Şekil 2.7 : Ana tahrik kasnağındaki süspansiyon sistemi

Palet sisteminde kullanılan polyamid malzemeden üretilen ufak kasnaklar ise palet boşluğunu almak ve gerginliğini sağlamak amacıyla altlı üstlü olarak her kola yerleştirilmiştir.

Tasarımda dikkat edilen hususlardan biri de kütle merkezinin araç üzerindeki yeridir. Kütle merkezi, araç üzerindeki yönlendirme merkezini tayin ettiğinden ötürü araç bileşenleri kütle merkezi tahrik kasnakları arasına denk düşecek şekilde yerleştirilmiştir. Bunu gerçekleştirebilmek için alınan tedbir yatayda güç paketinin ağırlığını dengelemek maksadıyla paletleri tahrik eden motorların aracın ön kısmına yerletirilmesi ve düşeydeki dengeyi sağlamak amacıyla da palet kollarının ve manipülator eklemlerinin motorlarının da güç paketinden yukarıya yerleştirilerek kütle merkezinin kararlı bölgede kalacak şekilde tasarım yapılmasıdır (bkz. Şekil 2.8). Lakin bu durumda da paletlere güç zincirlerle aktarıldığından aracın çekişinde düşme gözlemlenecektir. Bundan ötürü araçlarda tahrik sisteminin doğrudan paletlere veya tekerlere bağlandığı sistemler daha kullanışlıdır. Misal olarak motorlu taşıtlarda motorların aracın arkasına yerleştirilmesi gibi.

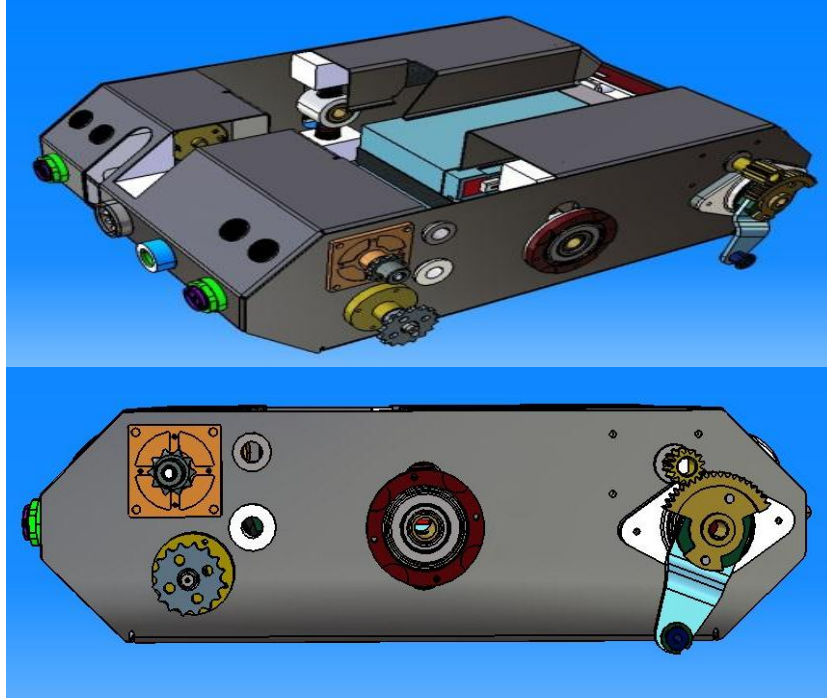


Şekil 2.8 : Mobil platform bileşenler

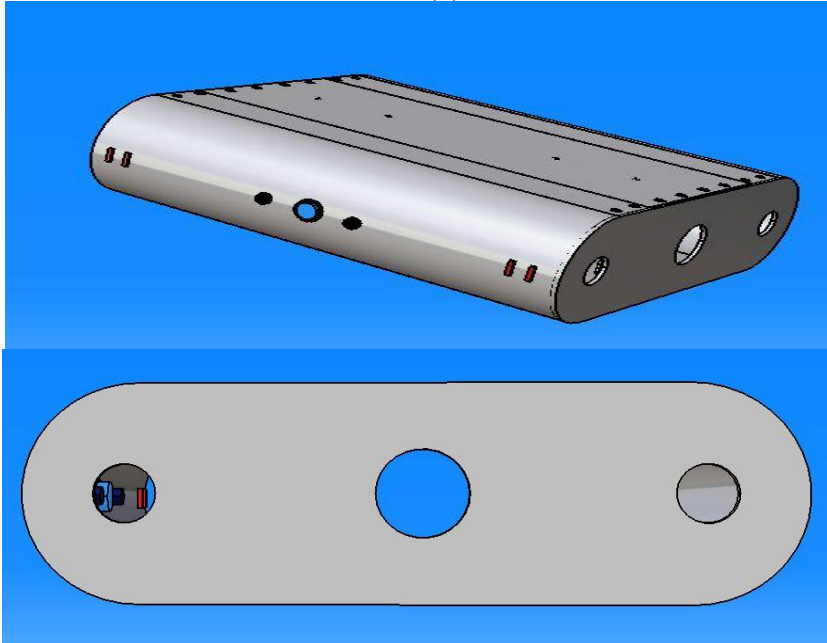
Ayrıca, yapılan vaka çalışmalarından birinde kütle merkezinin konumunun paletler üzerindeki basınç dağılımına etkisinden söz edilmekte, kütle merkezine yakın olan paletteki kayma miktarının daha az olduğundan dem vurulmaktadır [18]. Bundan ötürü de paletlerdeki olası kayma miktarlarının eşit olması için kütle merkezinin aracın geometrik merkezi ile hemen hemen çakışık olması en iyi çözüm olarak

gözükmektedir. Üstelik bu durum aracın palet kolları tarafından dengelenmesi için motorlar tarafından harcanacak güç tüketimini de azaltacaktır. Dolayısıyla kararlı bölge olarak tanımlanan aracın geometrik merkezinin yakınındaki kütle merkezi tasarım esnasında dikkat edilen önemli bir kriterdir.

Bu arada tasarımda aracın tahrik motorlarının korunması için ani yük altında tahrik sisteminde motorların çektiği akım, akım sensörü ile kontrol edildiğinden ötürü koruyucu tedbir olarak kavrama kullanılmamıştır.



(a)

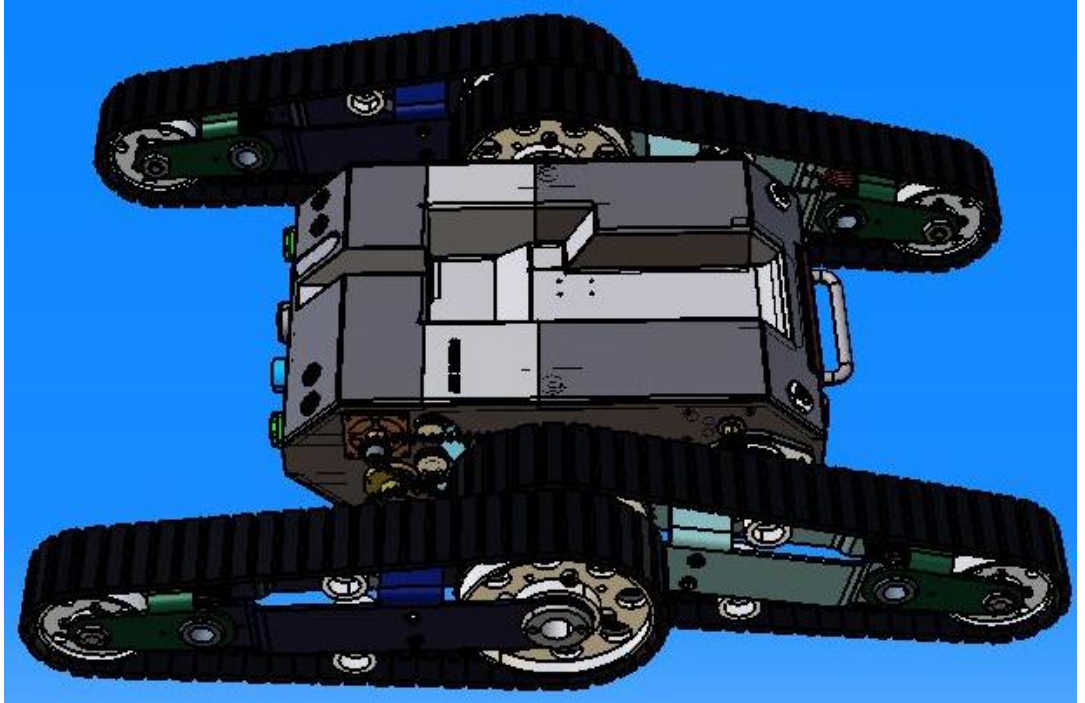


(b)

Şekil 2.9 : Mobil platform simetrik sac gövde türleri : (a) V ağızlı. (b) C ağızlı.

Mobil platformun donanımı ve paletlerini taşıyan gövdenin tasarımında ise dikkat edilen husus kolaylıkla imal edilebilmesi, düşük imalat maliyeti, hafifliği ve korozyon etkileri ile darbelere karşı dayanıklı olmasıdır. Ayrıca üzerine yerleştirilen sensörlere de uygun görüş açısı sağlamalıdır. Bu nedenle V ağızlı ve C ağızlı simetrik sac gövde konstrüksiyonları uygundur. Lakin C ağızlı yapının imalatında bükmeden kaynaklanan nispeten yüksek maliyet ve imalat zorluğu nedeniyle V ağızlı yapının tercih edilmesi uygun olup abkant pres makinasında Alüminyum 7075 serisi malzemeden sac kıvrırma ile imalatı gerçekleştirilmekte, benzer imalat prosedürü palet kolları için de tekrar edilmektedir. Sonrasında ise kıvrılan sacın köşe noktaları punta kaynağı ile birbirine tespit edilerek birbirinden ayrılması engelleyen yekpare yapı elde edilmektedir. Gövdedeki boşluklar ise silikon ile kapatılarak sızdırmazlık sorunu çözülmektedir.

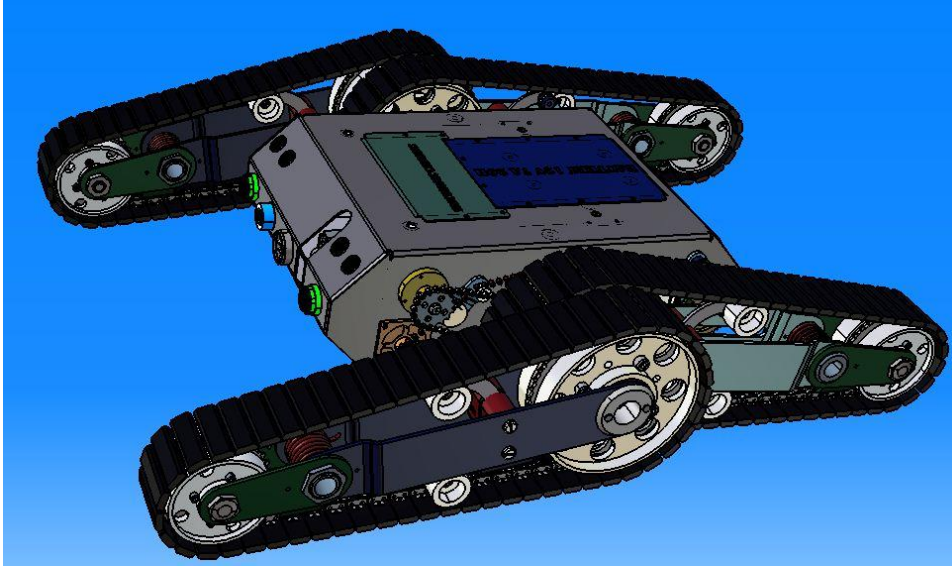
Gövdenin iç tarafına da sensörler ile kameraya tutunma yüzeyi yaratmak, gövdenin ön ve arka cephelerini darbelere karşı dolgu ile desteklemek ve gövdenin burulmasını engellemek amacıyla polyamid malzemeden Şekil 2.8’de görülmekte olan destekler konulmaktadır. Bu malzeme aynı zamanda iç süspansiyon yuvasını oluştururken de hafif ve mukavim olmasından ötürü tercih edilmektedir.



Şekil 2.10 : Mobil platform 3B model normal hal paletli hareket kipi

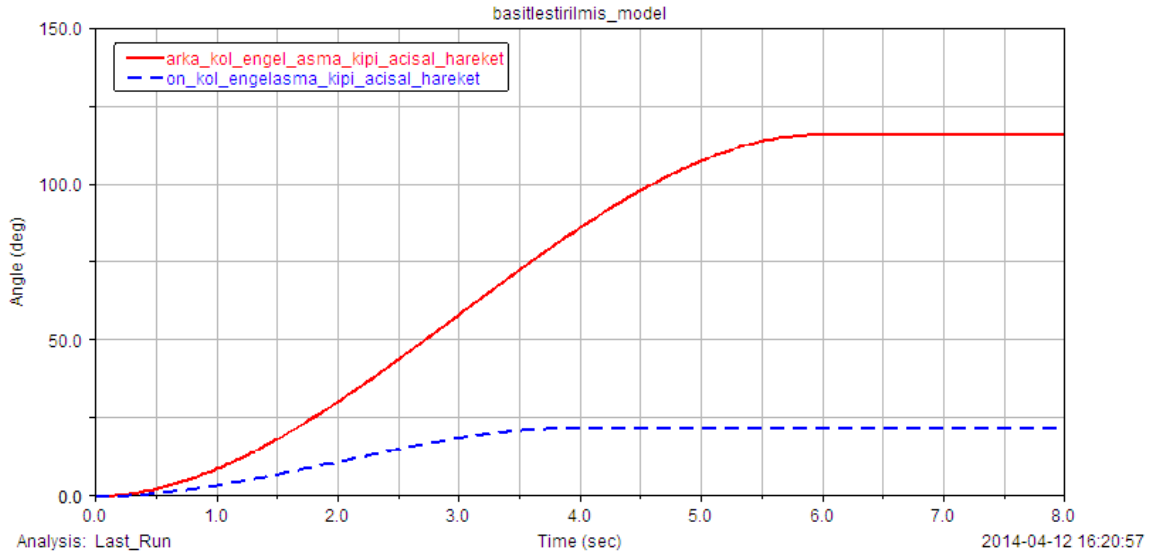
Belirtilen hususlar ve isterler neticesinde tasarlanan mobil platformun son hali Şekil 2.10’da gösterildiği gibi olmaktadır. Tasarlanan aracın simetrik geometrisi

platformun her iki yüzeyi üzerinde de çalışma zenginliğini artırdığı gibi hesaplamalarda kabul edilebilir hata toleranslarında sadeleştirmeler sağlamaktadır.



Şekil 2.11 : Mobil platform 3B model ters hal paletli hareket kipi

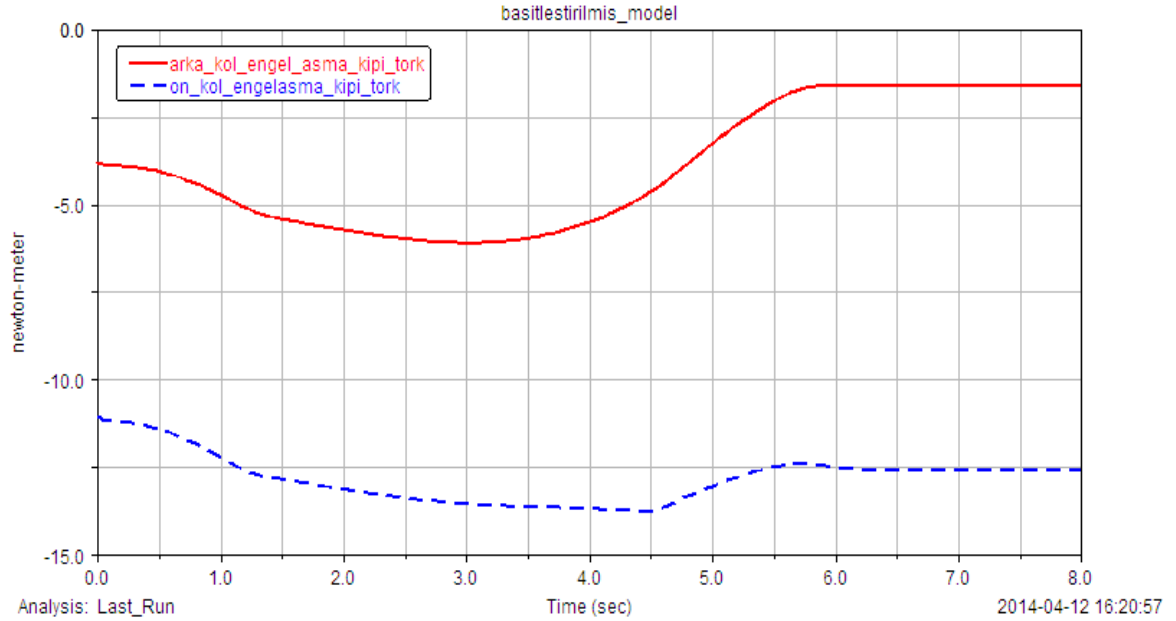
Önceki sayfalarda belirtildiği üzere ayarlanabilir palet kol açıları gerek yokuş, merdiven tırmanma gerek engebeli, eğik vb. arazide hareket esnasında kütle merkezini dolayısıyla gövdenin zeminden yüksekliğini değiştirerek devrilme, gövde rotasyonunu koruma, hareket esnekliği gibi işlevleri yerine getirmekte, taşınan yükün de emniyetli bir şekilde istenen konumlar arası naklini gerçekleştirmektedir.



Şekil 2.12 : Palet kollarındaki engel aşma kipindeki açısal hareket girişleri

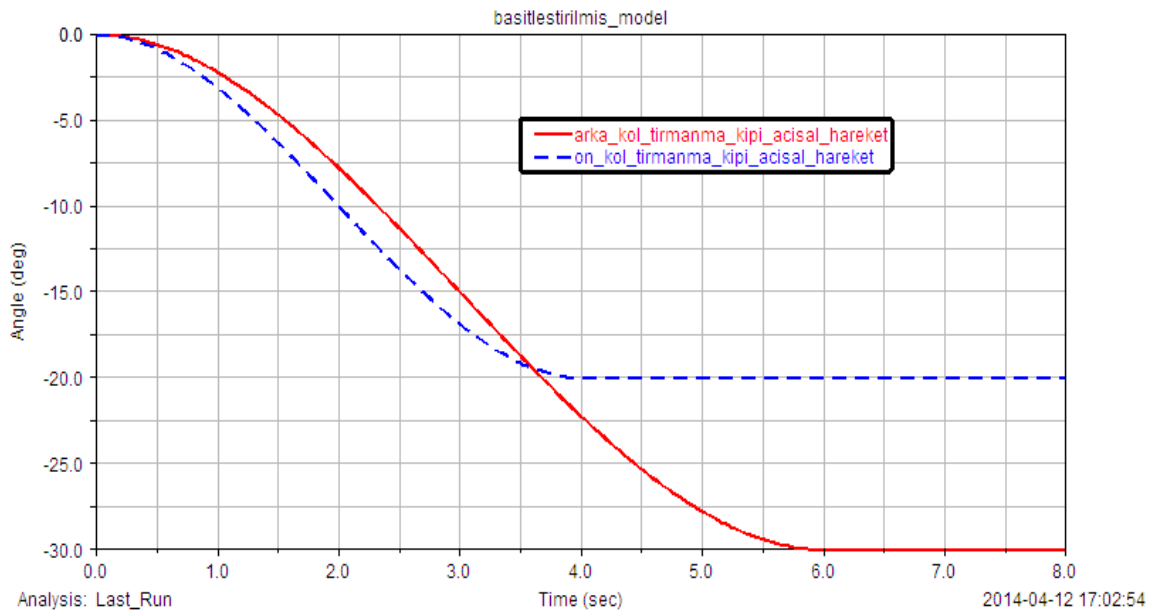
Bu safhadan itibaren manipülatörden ve yükünden kaynaklanan dinamik etkileşimlerin göz ardı edildiği ve platformun düzlemsel hareketini sabit hızla yaptığı varsayılarak, aracın palet kollarının tanımlanan kipler için çeşitli hareketleri yerine getirmesi esnasındaki dinamik analizi sorgulanacak olursa, sırasıyla engel aşma,

tırmanma ve yunuslama için hareket girişlerinin olduğu eklemlerde aşağıda verilmekte olan tork ve açısal hareket grafikleri elde edilir.

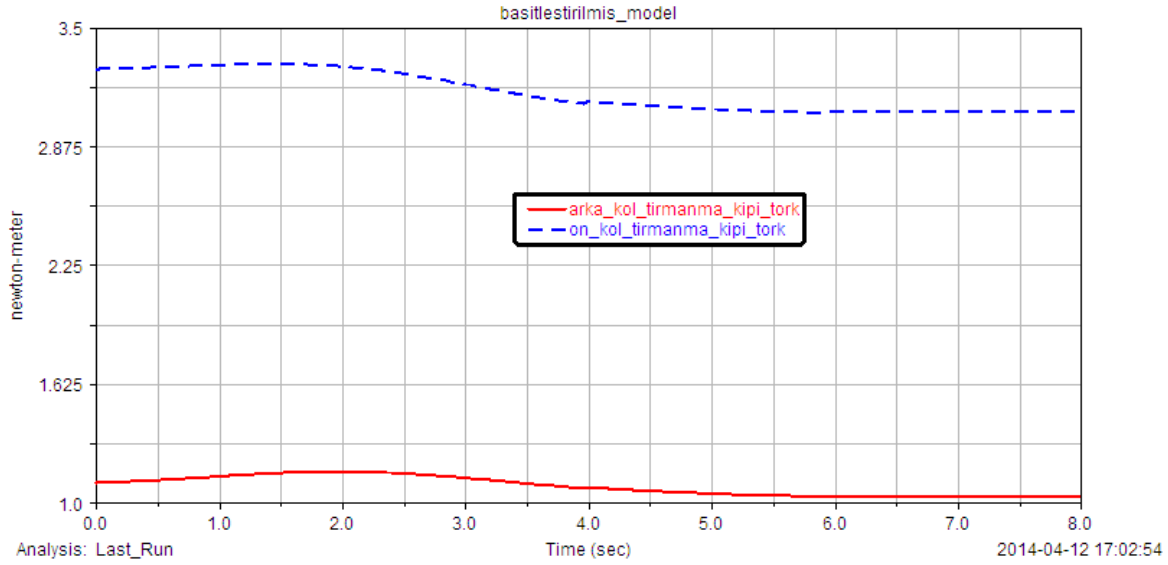


Şekil 2.13 : Palet kollarındaki engel aşma kipi için tanımlı tork girişleri

Bu grafikler aracın Catia V5 programından tasarlanan katı modeldeki dinamik parametrelerin, çoklu rijid cisim analizleri yapmak için kullanılan ve Euler-Lagrange tabanlı çözüm üreten Msc Adams programı aracılığıyla yorumlanması neticesinde elde edilmektedir. Benzeşim programı tarafından kullanılmakta olan Euler-Lagrange tabanlı çözüm kapalı formda olduğundan gerçekleştirilecek olan kontrol problemleri için de uygun olup, sistemin dinamiğini enerjinin yayılımına dayanan progresif çözüm ile sunmaktadır.



Şekil 2.14 : Palet kollarındaki tırmanma kipi için tanımlı açısal hareket girişleri

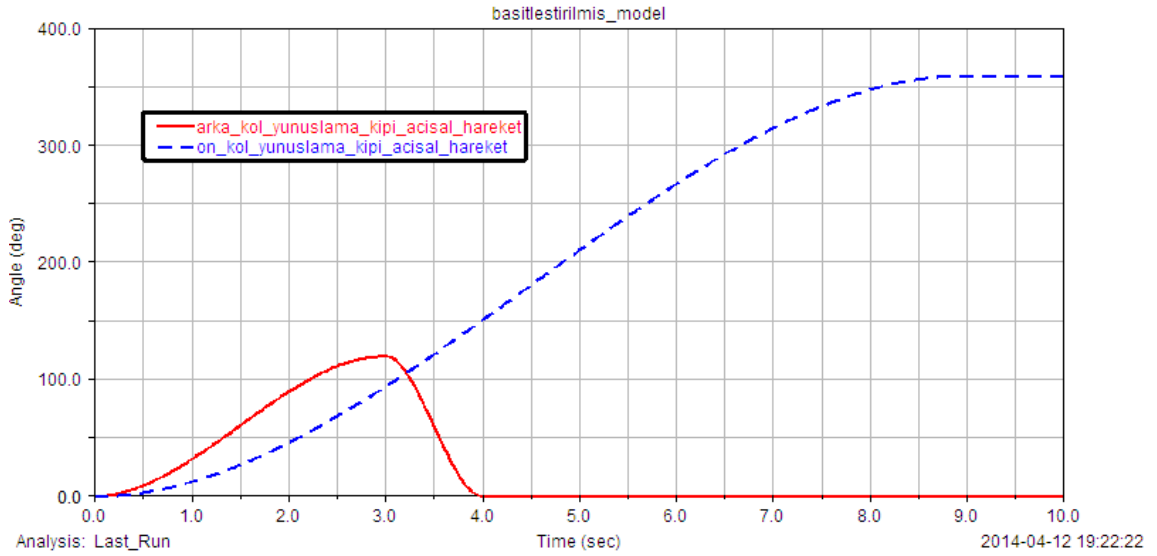


Şekil 2.15 : Palet kollarındaki tırmanma kipi için tanımlı tork girişleri

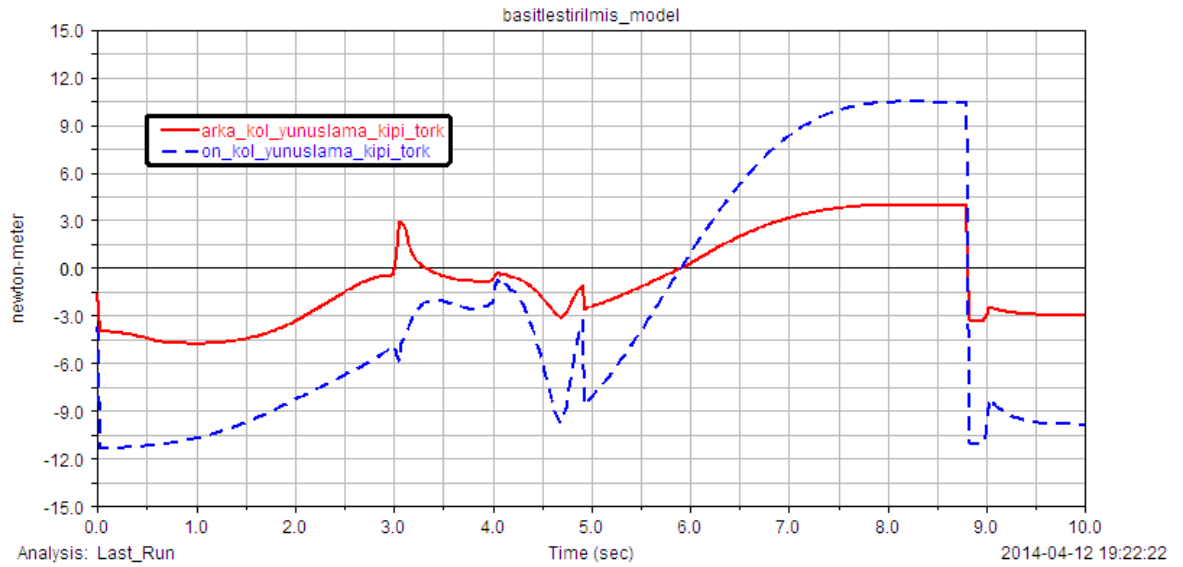
Sırasıyla bu hareketlerin yerine getirilebilmesi için sağlanan hareket fonksiyonları ise sisteme adım fonksiyonun varyasyonlarının çeşitli zaman aralıklarında tanımlanan açılar türünden etkitilmesiyle sağlanmaktadır. Engel aşma kipinde hareketi tanımlayan ifade ön kol için $STEP(time, 0^{sec}, 0^{\circ}, 4^{sec}, 22^{\circ})$ iken arka kol için ise $STEP(time, 0^{sec}, 0^{\circ}, 6^{sec}, -116^{\circ})$ şeklinde tanımlanmış, tırmanma kipinde ise ön kol için $STEP(time, 0^{sec}, 0^{\circ}, 4^{sec}, 20^{\circ})$ iken arka kol için ise $STEP(time, 0^{sec}, 0^{\circ}, 6^{sec}, 30^{\circ})$ şeklinde ve yunuslama kipinde ise ön kol için $STEP(time, 0^{sec}, 0^{\circ}, 9^{sec}, -360^{\circ})$ iken arka kol için ise $STEP(time, 0^{sec}, 0^{\circ}, 3^{sec}, -120^{\circ}) + STEP(time, 3^{sec}, 0^{\circ}, 4^{sec}, 120^{\circ})$ şeklindedir.

Tanımlanan hareket kiplerindeki hareketlere ilişkin grafikler incelenecek olursa arka koldaki tork miktarı ön kola göre azken, açısal hareket miktarı ön kola göre fazladır. Bu sonuç iş prensibinin doğal sonucu olarak karşımıza çıkmakta olup bu durum arka kol ile arka palet sistemi arasında tanımlanan kayıcı mafsallardan kaynaklanmaktadır.

Kullanılan benzeşim programında yapılan analizler neticesinde sistemin dinamik davranışı, hareket analizi, kuvvetlerin ve yüklerin sistem içindeki dağılımı kolaylıkla incelenerek, sanal prototipi iyi modellenen mekanik sistemin gerçek çalışma şartlarındaki fiziği verilmekte olan grafiklerden de görüldüğü gibi irdelenebilir. Bu grafiklere ilave olarak sistemdeki hareketli mekanizmaların hız-ivme, açısal hız-ivme, pozisyon-oryantasyon, etki-tepki kuvvetlerine ilişkin grafikler de elde etmek mümkündür. Böylece, kontrol sistemi ile entegre edilerek çevresiyle etkileşen mekanik sistemin sanal ortamda modellenmesi ile davranışı hakkında gerçek prototipi gerçekleştirilmeden önce fikir sahibi olunabilir.



Şekil 2.16 : Palet kollarındaki yunuslama kipi için tanımlı açısall hareket girişleri



Şekil 2.17 : Palet kollarındaki yunuslama kipi için tanımlı tork girişleri

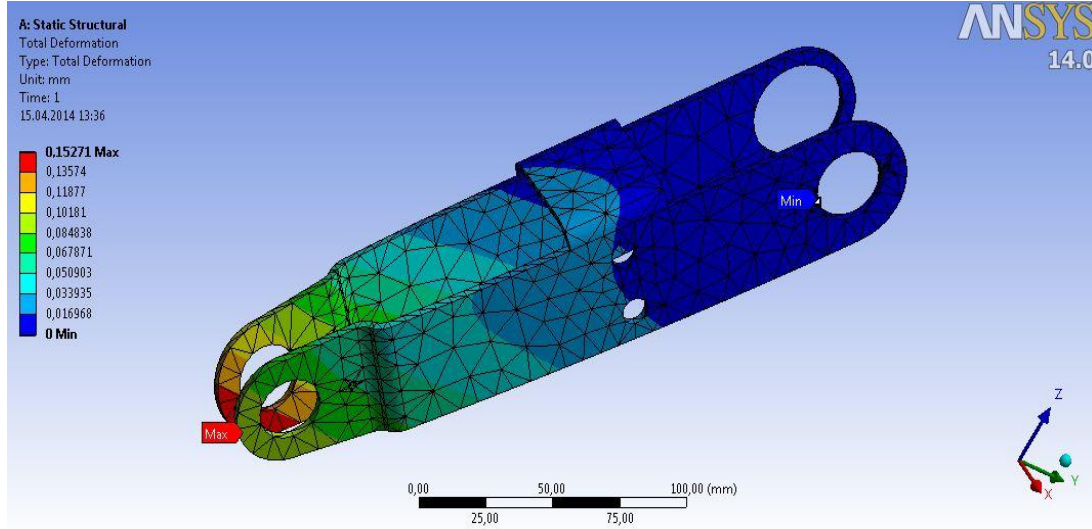
Sorgulanması gereken bir diğer unsur ise palet kollarının mukavemetidir. Bu nedenle, mobil manipülatörün düzensiz ve karmaşık bir geometriye sahip uzuvları için mukavemet problemlerini kabul edilebilir bir hassaslıkta basite indirgeyerek yaklaşık çözüm sunan sonlu elemanlar yöntemiyle yapısal analiz yapılacaktır.

Çizelge 2.2 : 7075 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.

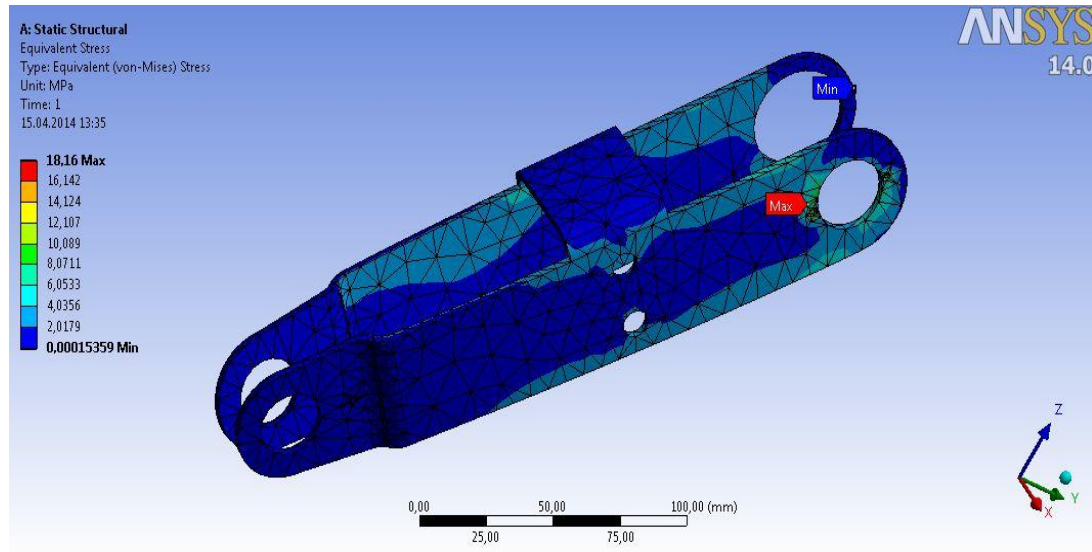
Temper	Akma Mukavemeti (Mpa) min-max	Çekme Mukavemeti (Mpa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik(Brinell) min-max
0	105	225	17	60
T6	460-505	530-570	10	150-150
T7	435	505	12	140

Elde edilen sonuçlara göre gerek duyulması halinde parçalar yeniden boyutlandırılacak veya seçilen malzeme değiştirilecektir. Bu amaçla tasarlanan

araçta, hafif ve mukavim özelliklere sahip Alüminyum 7075 alaşımlı sac malzemeden imal edilen palet kollarının statik yapısal analizi SE yöntemine göre çözüm üreten ANSYS programı yardımıyla yapılacaktır. Analiz esnasında iterasyon sayısını azaltarak hızlı çözüm yapabilmek için üçgensel kaba ağ (mesh) atılarak sonuca gidilmiştir.



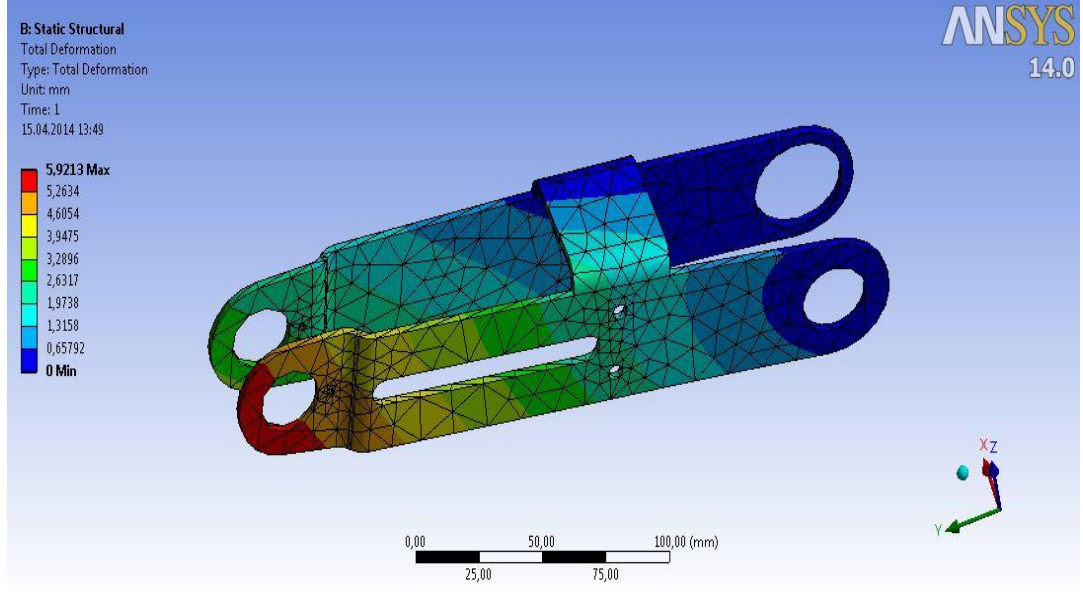
Şekil 2.18 : Ön palet kollarına etkiyen kuvvetler neticesindeki şekil değişimi



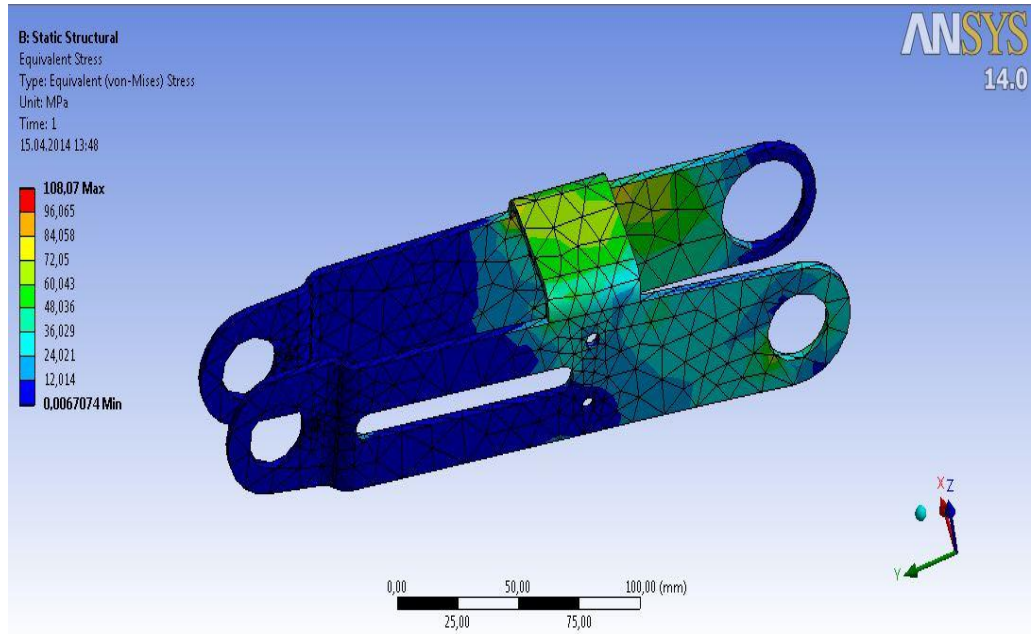
Şekil 2.19 : Ön palet kollarına etkiyen kuvvetler neticesindeki gerilme dağılımı

SE analizine ön palet kollarıyla başlanacak olursa seçilen malzeme için 0.15 mm elastik deformasyon olmuş maximum gerilme akma dayanımının altında 18 MPa olarak Şekil 2.18'deki kırmızı renkli bölgede görülmüştür. Elde edilen değerler palet kolları ile üzerine monte edilen hareketli makaralar arasında verilen 2 mm boşluk için kabul edilebilir bir sonuç olmakla beraber abartılmış ölçek altındaki görsel sonuçları Şekil 2.17'deki gibi elastik şekil değişimidir.

Benzer analiz arka palet kolları için tekrarlanacak olursa bu sefer istenmeyen miktarda ve akma dayanımının üzerinde plastik şekil değişimi ile karşılaşılacaktır. Bulunan sonuçlar Adams programından bulunan kuvvet değerlerinin Ansys programında tanımlanan kısıtlar için tatbik edilmesi neticesinde 5.9 mm plastik şekil değişimi ve 108 MPa gerilme değeridir.



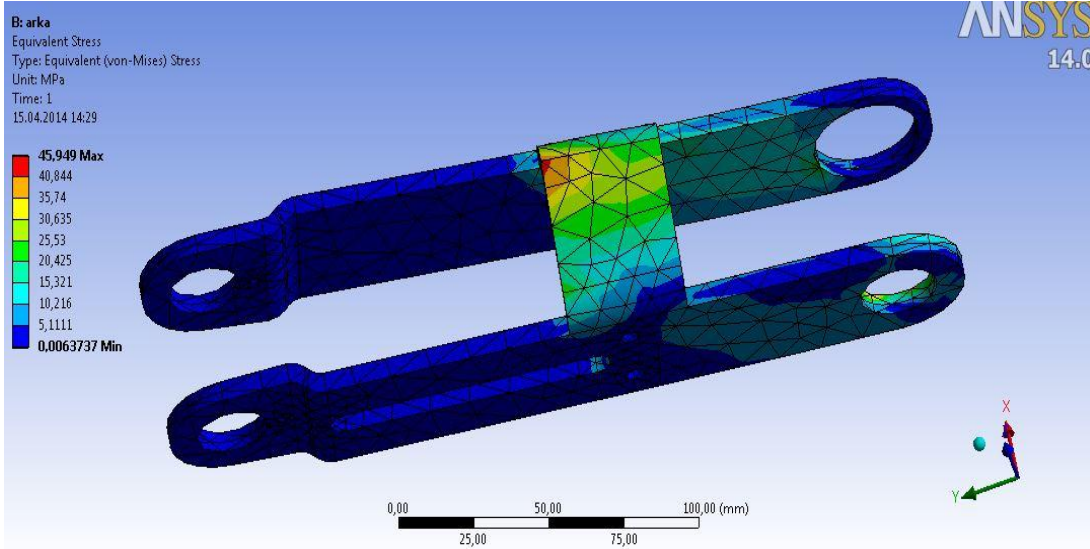
Şekil 2.20 : Arka palet kollarına etkiyen kuvvetler neticesindeki şekil değişimi



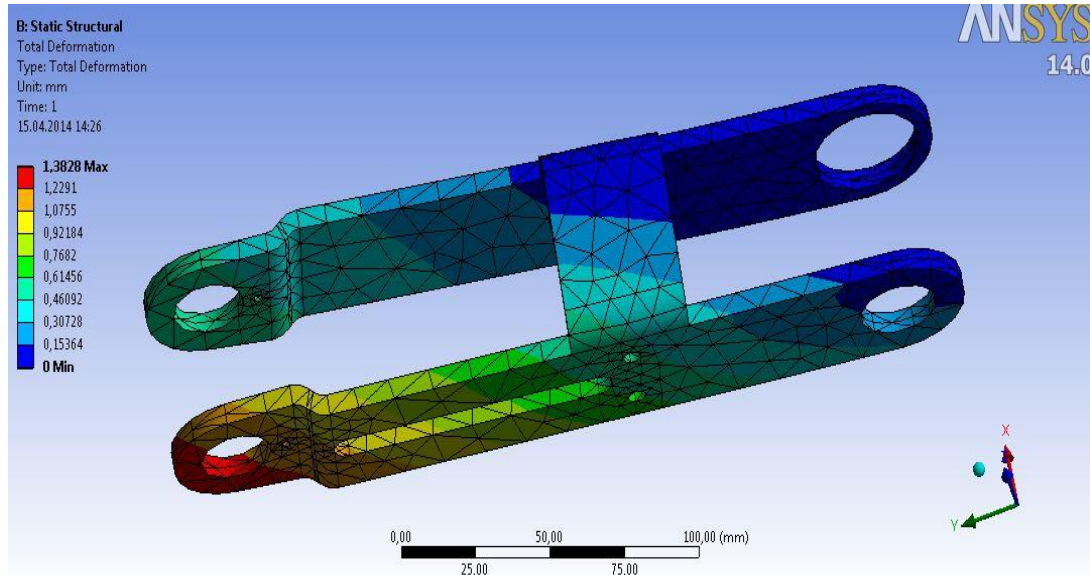
Şekil 2.21 : Arka palet kollarına etkiyen kuvvetler neticesindeki gerilme dağılımı

Bu istenmeyen durumdan kurtulmak için çözüm olarak karşımıza sac metalin et kalınlığının artırılması, farklı malzeme seçimi veya palet kolu içine kiriş vazifesi görecektek parçatepiti sunulabilir. Lakin tek bir plakadan tüm parçalar üretildiğinden sac kalınlığını artırmak veya farklı malzeme seçimi maliyet açısından efektif

durumla birlikte bu durumlarıda içeren çözümler sırasıyla incelenecek olursa et kalınlığı 3 mm'den 6 mm'ye çıkarılmış malzeme istenen sonuçları 1.38 mm şekil değişimi ve 45.9 MPa maximum gerilme değeri ile istenen sonuçları vermiş gibi gözükmeaktadır. Fakat ağırlığı 2 kat artırması ve farklı plaka kullanımının getirdiği maliyet alternatif çözümlere yönelmeyi gerektirmektedir. Bundan ötürü çelik malzeme seçilerek çözüme gidilirse 0.4 mm şekil değişimi ve 100 MPa maximum gerilme değeri bulunmaktadır.



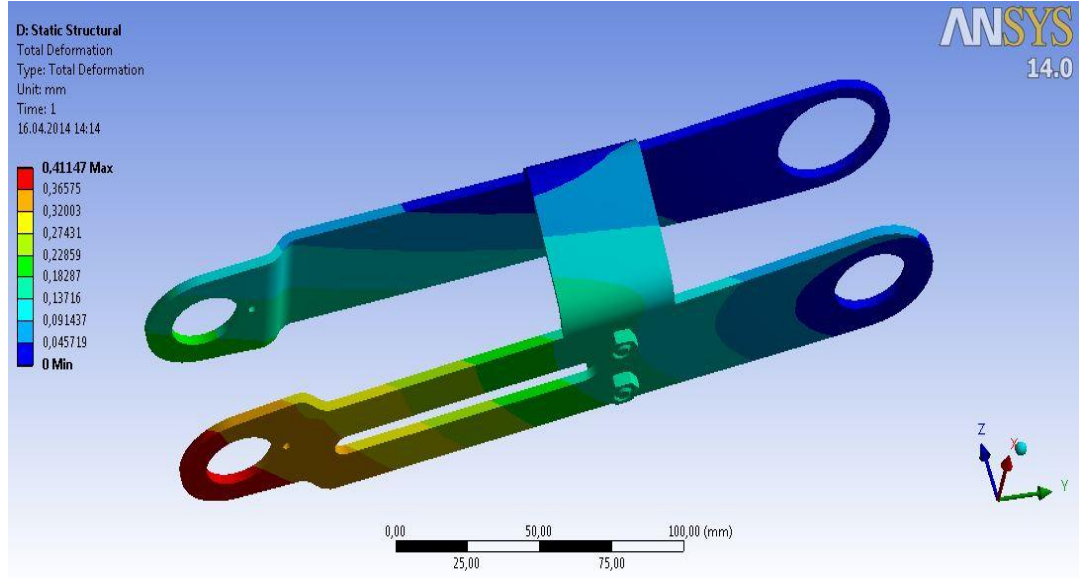
Şekil 2.22 : Et kalınlığı artırılmış arka palet kollarındaki gerilme dağılımı



Şekil 2.23: Et kalınlığı artırılmış arka palet kollarındaki şekil değişimi

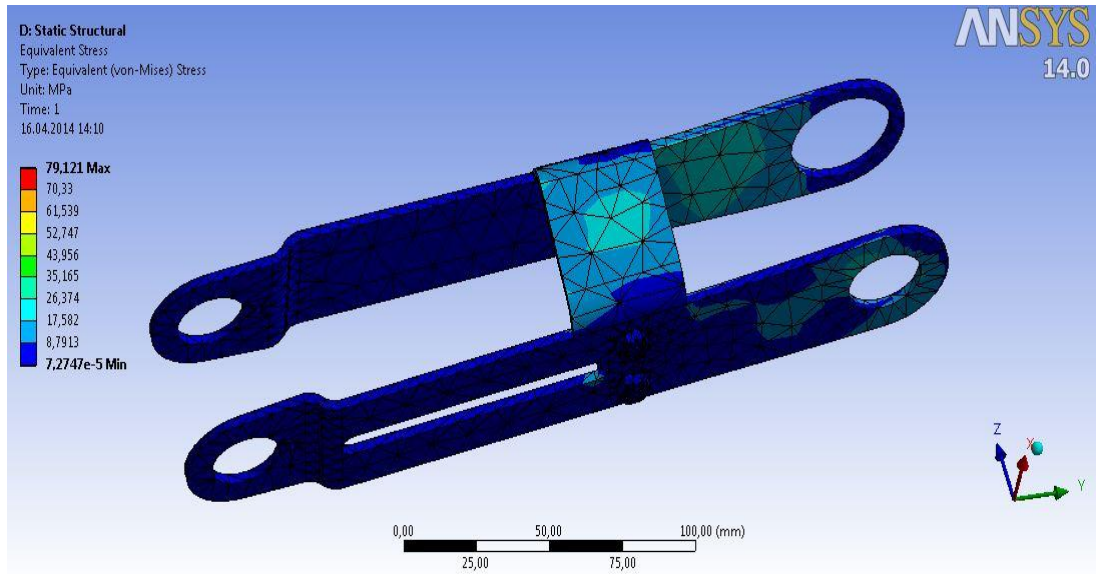
Elde edilen sonuç malzemenin yoğunluğunun alüminyumdan 8 kat fazla oluşu ve korozif direnci düşünülüğünde kabul görmemektedir. Dolayısıyla son çare olarak palet kollarının içerden kiriş görevi görecek, burulmasını ve eğilmesini önleyecek

polyamid plaka ile desteklenmesidir. Bu durumda maximum gerilme Şekil 2.24'den 80 MPa ve maximum şekil değişimi ise Şekil 2.25'den 1.1 mm olarak bulunmaktadır. Bu sonuç verilen boşluk toleransları için kabul edilebilir mertebede olup hareket esnasında kilitlenmeye de yani hareketin engellenmesine de yol açmamaktadır.



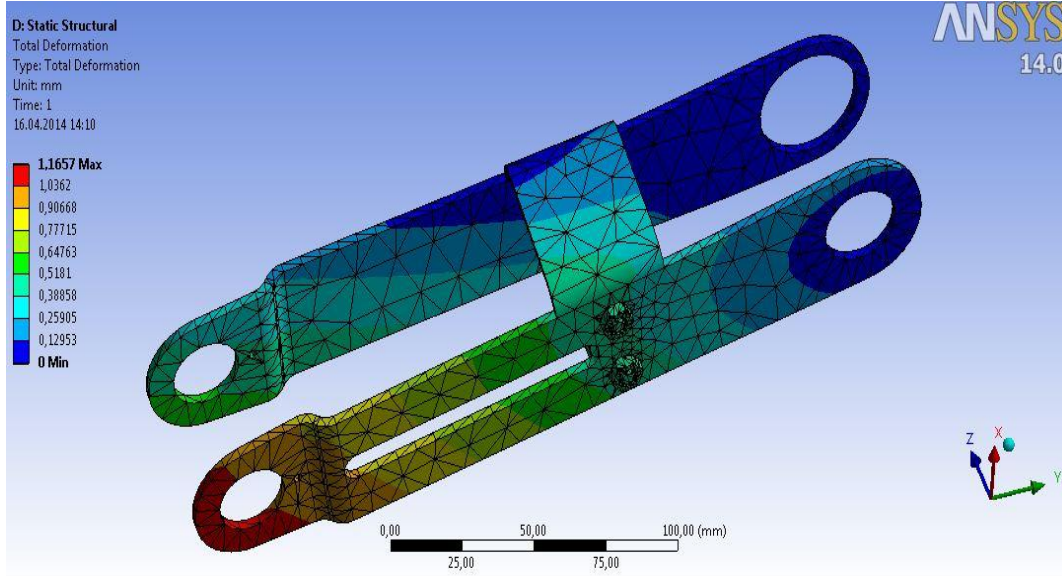
Şekil 2.24: Çelik malzeme atanmış arka palet kollarındaki şekil değişimi

Sonuçlar alüminyumun elastik çalışma bölgesinde ve akma dayanımının altında olduğundan istenilen kriterleri karşılamaktadır. Bundan ötürü palet kol konstrüksiyonunda bu çözüm yöntemi tercih edilecek ön palet kollarında da benzer kiriş destek, sürekli ve tekrarlı yük altındaki parçaların daha az gerilmeye maruz kalarak ömrünü uzatmak için kullanılacaktır.



Şekil 2.25 : İç kiriş eklenmiş arka palet kollarındaki gerilme dağılımı

Mukavemet açısından irdelenen parçaların yorulma dayanımı kısıtlı süreler çalışan robot için irdelenmemiştir. Benzer şekilde titreşim açısından da analiz yapılmasına bu safhada gerek duyulmamakla beraber manipülatörün hareketine olan bozucu etkisi ihmal edilerek çözüme gidilmiştir. Lakin bilahare yapılacak olan prototiplerdeki etkisinin sorgulanması düşünülebilir.



Şekil 2.26: İç kiriş eklenmiş arka palet kollarındaki şekil değişimi

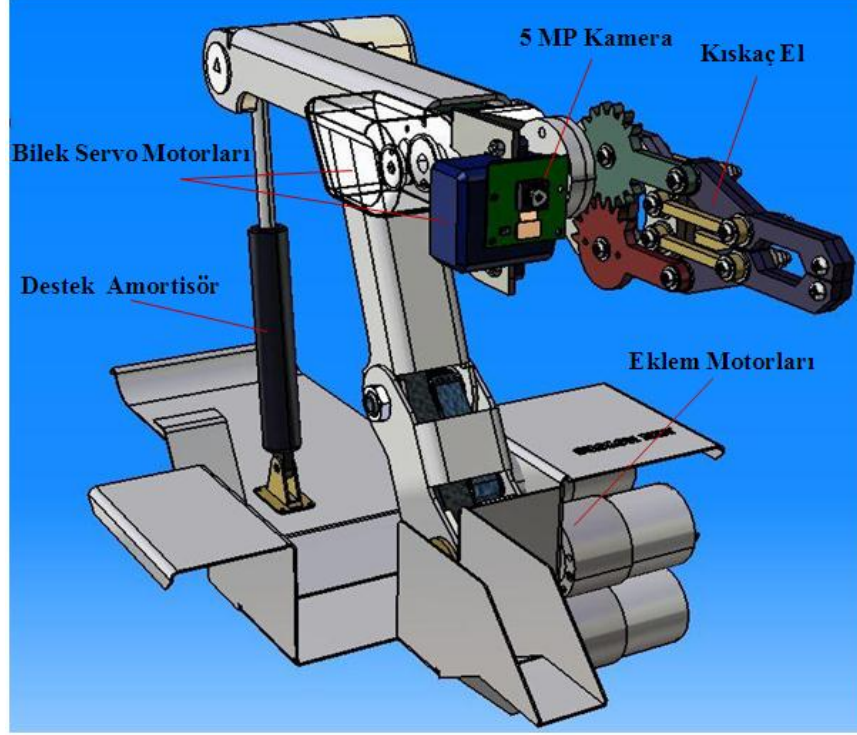
Benzer tasarım prosedüründen mobil platformun üzerinde taşıdığı manipülatör tasarımında da faydalanılmaktadır. Bu aşamadan itibaren manipülatörün tasarımı, dinamik, yapısal analizleri ve imalat prosedürleri irdelenecektir.

2.2 Manipülatör Tasarımı

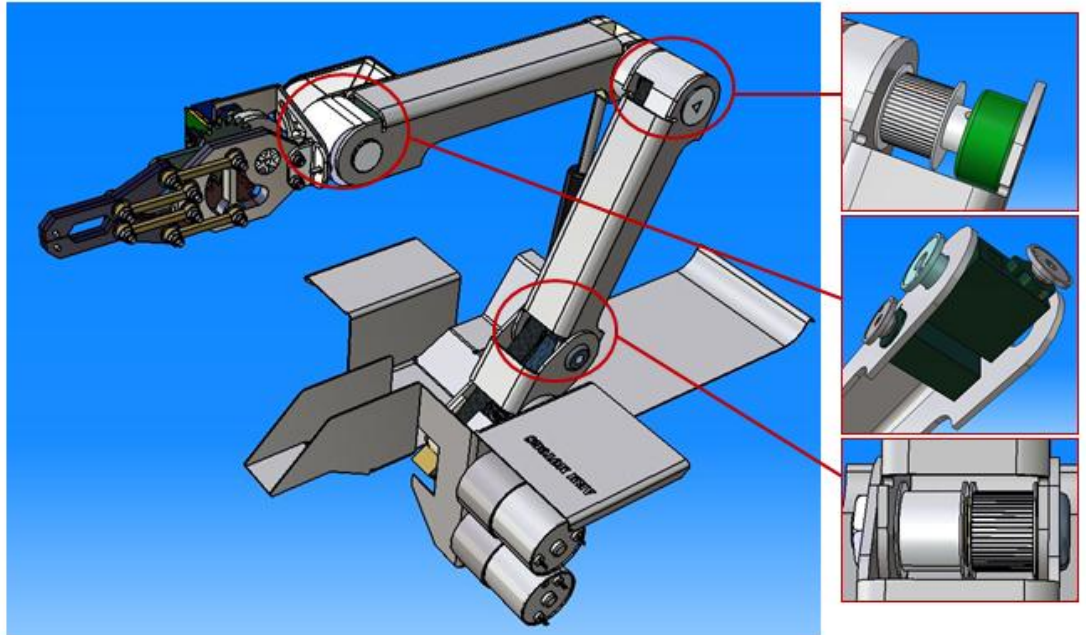
Platformun içine gömülü olarak yerleştirilen manipülatör çeşitli görevleri yerine getirmek üzere büyük bir potansiyel sağlarken aracın artan karmaşık yapısı, dinamik platformla manipülatör arasındaki dinamik etkileşimlerden ve holonomik olmayan kısıtlardan kaynaklanan bir takım problemlere maruz kalmaktadır.

Bu problemlerin ihmal edildiği kabul edilerek ideal bir manipülatör tasarımında platform mevcut geometril konstrüksiyonu, 3 uzvun üzerine eklenmesine müsaade etmektedir. İlk uzuv diğer iki uzvu çalışabilmesi için platform gövdesinden dışarı çıkarmakta kullanılan yardımcı uzuv olup, diğer iki uzuv ise ucuna eklenen iki serbestlik dereceli ve üzerinde 5 MP kamera taşıyan kısaç yapısıyla verilen görevleri platformun sağladığı sınırsız çalışma uzayında düzlemsel manipülatör mekanizmasıyla yerine getirmektedir.

Yardımcı uzuv platformun ön tarafına yerleştirilen sensörler ve uzuvları tahrik eden motorlardan kaynaklı yetersiz çalışma alanından ötürü platformun ön tarafından ötelenemek zorunda kalındığından kullanılmaktadır. Daha büyük boyutlarda gerek olmayacağı aşikardır.

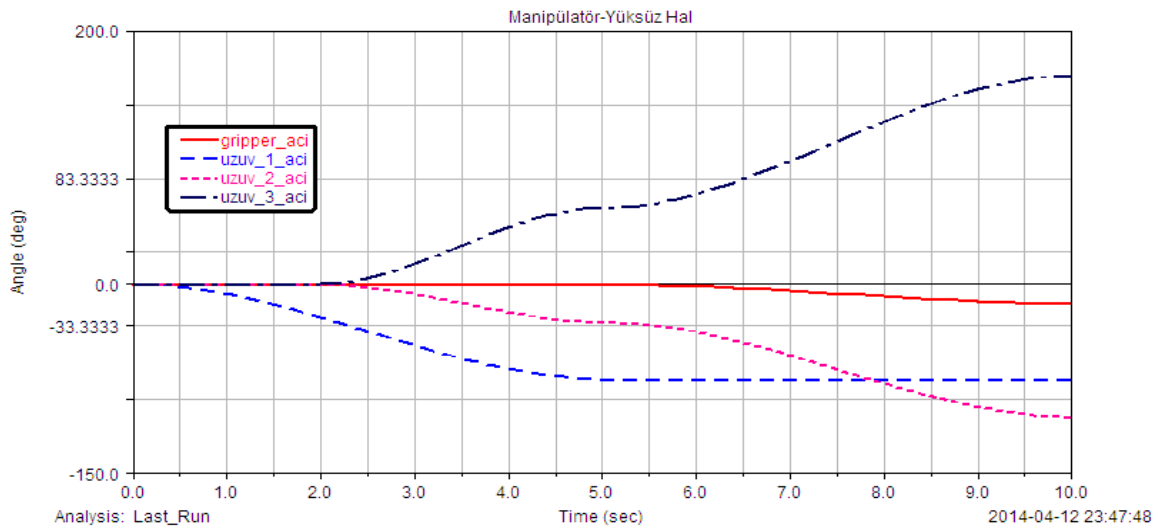


Şekil 2.27 : 5 serbestlik dereceli manipülatör bileşenler

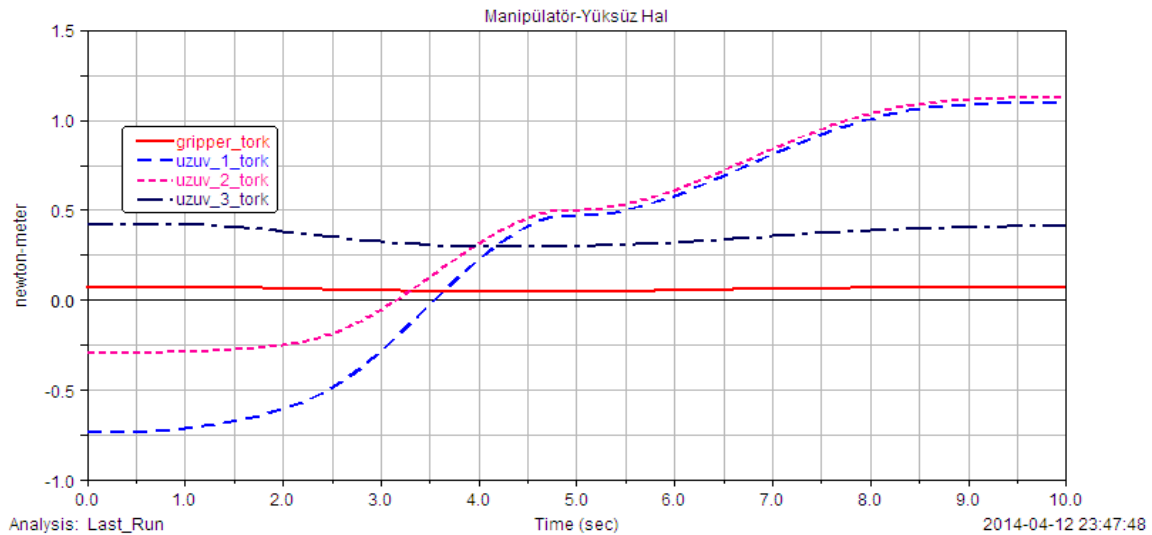


Şekil 2.28 : Manipülatörün uzuvları arası güç iletimi

Uzuvlar arası güç iletimi Şekil 2.27’de görülmekte olan eklem motorları tarafından tahrik edilen dişli kayış kasnak mekanizması ile gerçekleşmekte olup pozisyonları motorların üzerinde ihtiva ettiği manyetik enkoderlar tarafından okunmaktadır. Kısaç mekanizması boylamsal ve yatay doğrultudaki hareketlerini üçüncü uzvun üzerine tespit edilen bilek kısmındaki servo motorlar ile sağlamakta, açılıp kapanma hareketi de kamera arkasındaki servoyla gerçekleştirilmektedir. Bu arada tasarlanan manipülatörde üçüncü uzvu desteklemek yükün hareketi esnasındaki ivmelenmelerden vb. dış etkiler altında hareketini kısıtlamak için Şekil 2.26’da görüldüğü üzere amortisör konulmasına gerek duyulmuştur.



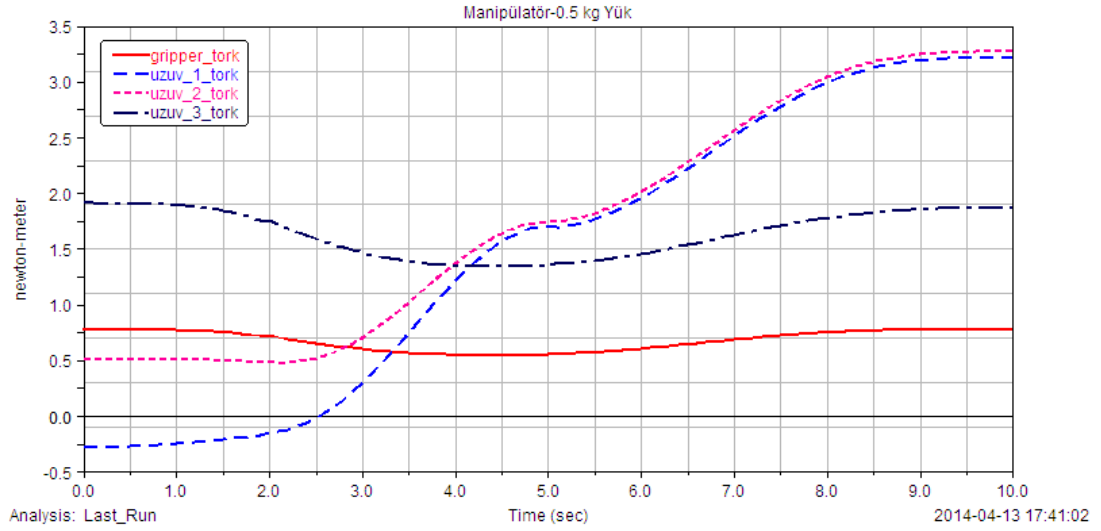
Şekil 2.29 : Yüksüz durumda manipülatör uzuvlarındaki açısal hareket girişleri



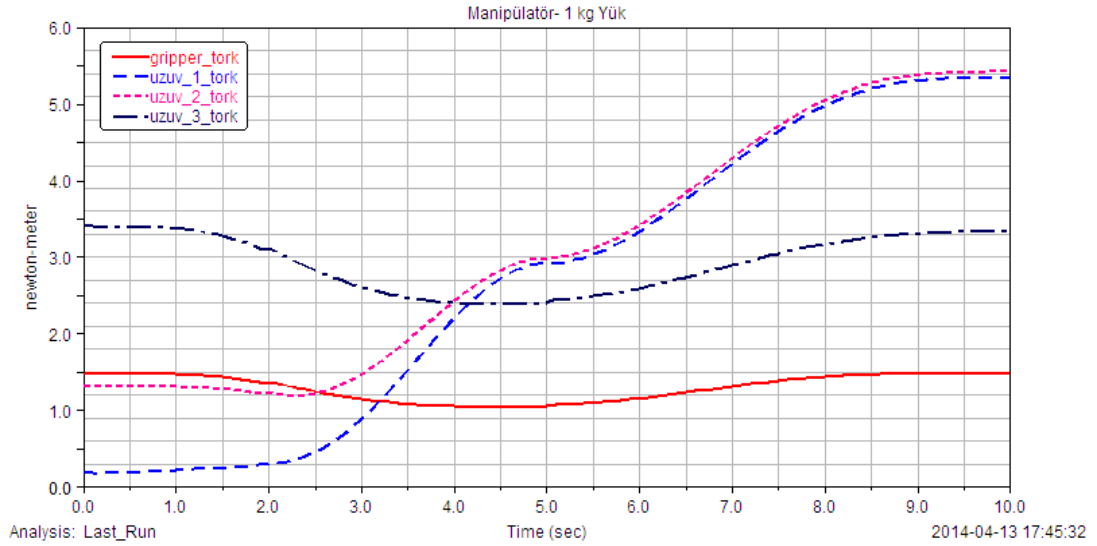
Şekil 2.30 : Yüksüz durumda manipülatör uzuvlarına etkiyen torklar

Tasarımın bir diğer safhası olan dinamik analizde manipülatör uzuvlarının ve kıskaçının (gripper) herhangi bir yük tatbik edilmediği ve kıskaçın uc noktasının yatayda ulaşabileceği maximum noktaya hareketi esnasında Şekil 2.28’de verilmekte

olan açısıl hareketler için uzuvların eklemlerine uygulanması gereken minimum tork miktarları Şekil 2.29'daki gibi bulunmaktadır.Çeşitli yük durumlarında Şekil 2.28'deki açısıl hareket girişi için eklemlere etkiltilmesindeki gerekli torklar sorgulanacak olursa sırasıyla 0.5 kg.f ve 1 kg.f yük ağırlıklarının manipülatör tarafından kaldırılması halinde Şekil 2.30 ve Şekil 2.31'da verilmekte olan sonuçlar elde edilir. Bulunan değerlerden motor seçiminde faydalanılacaktır.



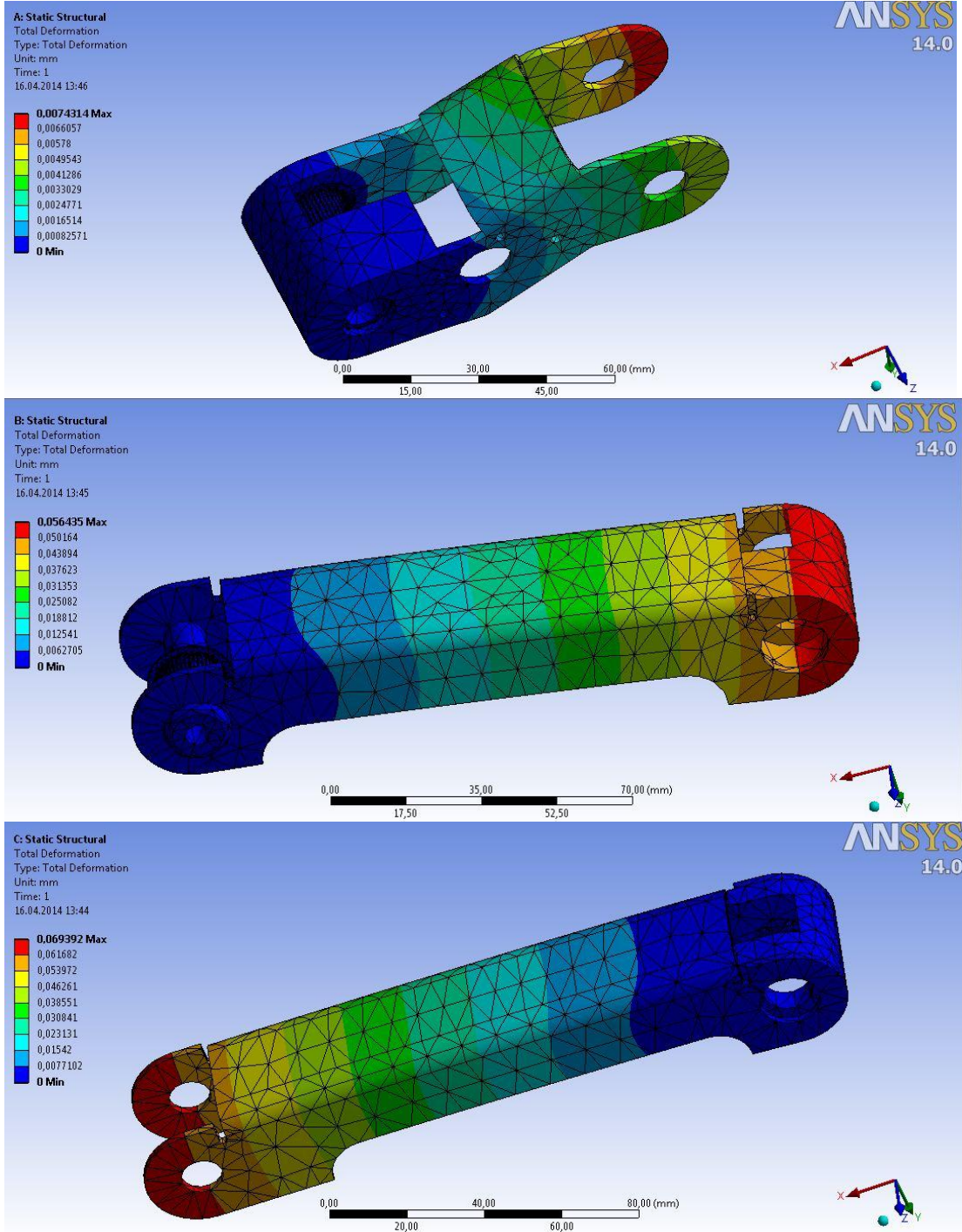
Şekil 2.31 : 0.5 kg yük altında manipülatör uzuvlarına etkiyen torklar



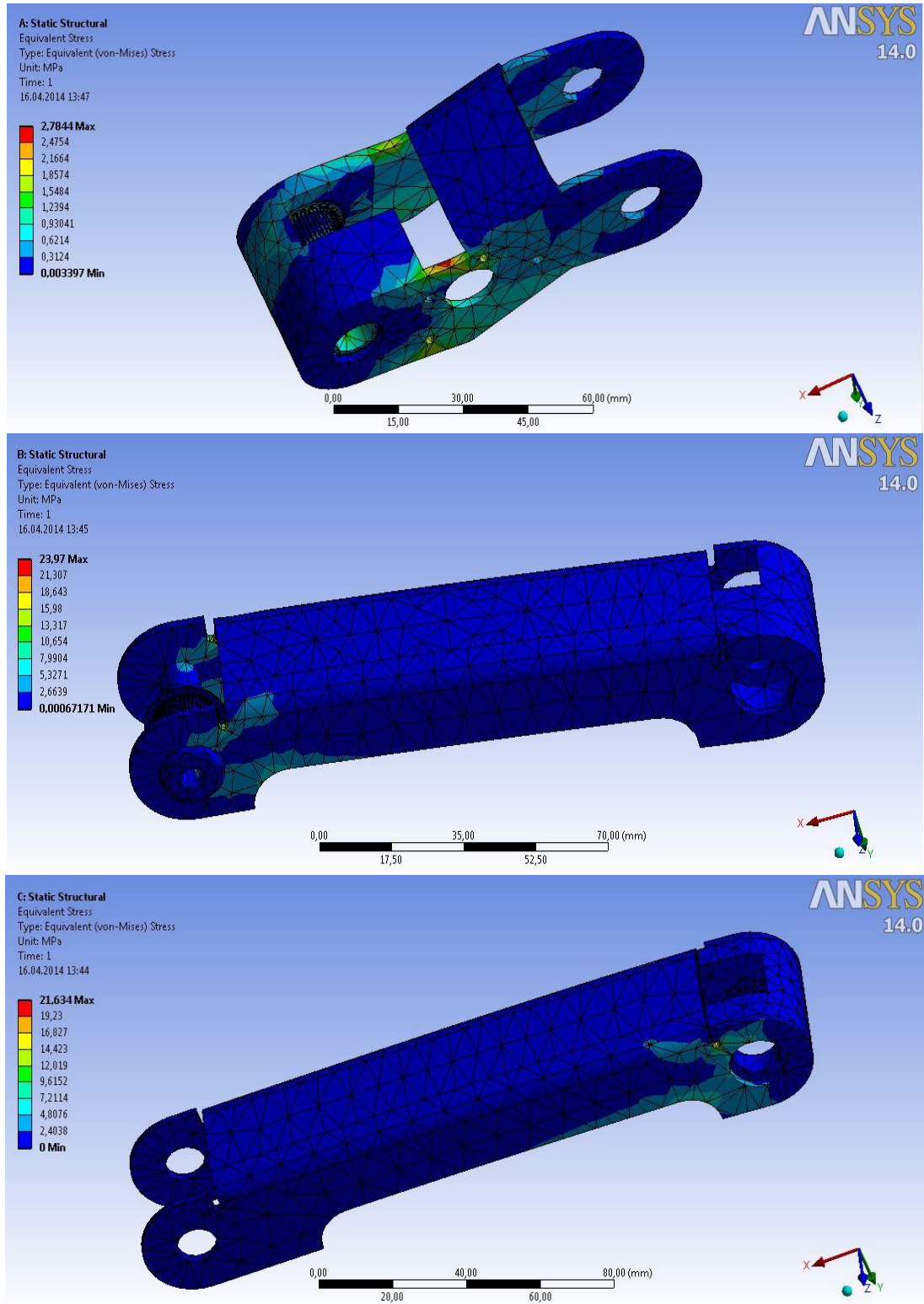
Şekil 2.32 : 1 kg yük altında manipülatör uzuvlarına etkiyen torklar

Genel olarak herhangi bir noktaya hareket esnasında gerekli torku azaltmak için uzuvların ağırlık merkezleri, eklemlere hareket esnasında yakın tutulmaya çalışılmaktadır. Böylelikle harcanan enerji de azaltılabilmektedir. Bunun için uzuvlarda kademeli hareket tanımlanmış, bunun neticesinde de zamana bağlı eğrisel grafikler gözlenmiştir.

Palet kollarının ve gövdenin imalatında kullanılan Alüminyum 7075 alaşımlı metali manipülâtör uzuvlarının abkant tezgahında bükülerek imalatında da kullanılmaktadır. İmalat öncesinde uzuvların mukavemeti sual edilecek olursa verilen yüklere maruz kalınması durumundaki uzuvların üzerindeki maximum gerilme sırasıyla Şekil 2.33’den de görüldüğü üzere 2.7 MPa, 23.9 MPa ve 21.6 MPa ile malzemenin akma gerilmesinden hayli ufak kalmakta, elastik şekil değişimi ise Şekil 2.32’de 7e-3 mm, 5e-2 mm ve 6e-2 mm ile kabul edilebilir miktarda olmaktadır.



Şekil 2.33 : Manipülâtör uzuvlarına etkiyen kuvvetler neticesindeki şekil değişimi



Şekil 2.34 : Manipülâtör uzunlarına etkiyen kuvvetlerin neden olduğu gerilme dağılımı

Bu noktaya kadar mobil robotun bilgisayar destekli tasarım süreci detayları ile anlatılmaya çalışılmıştır. İleriki safhada robotun elektriksel donanımı üzerinde

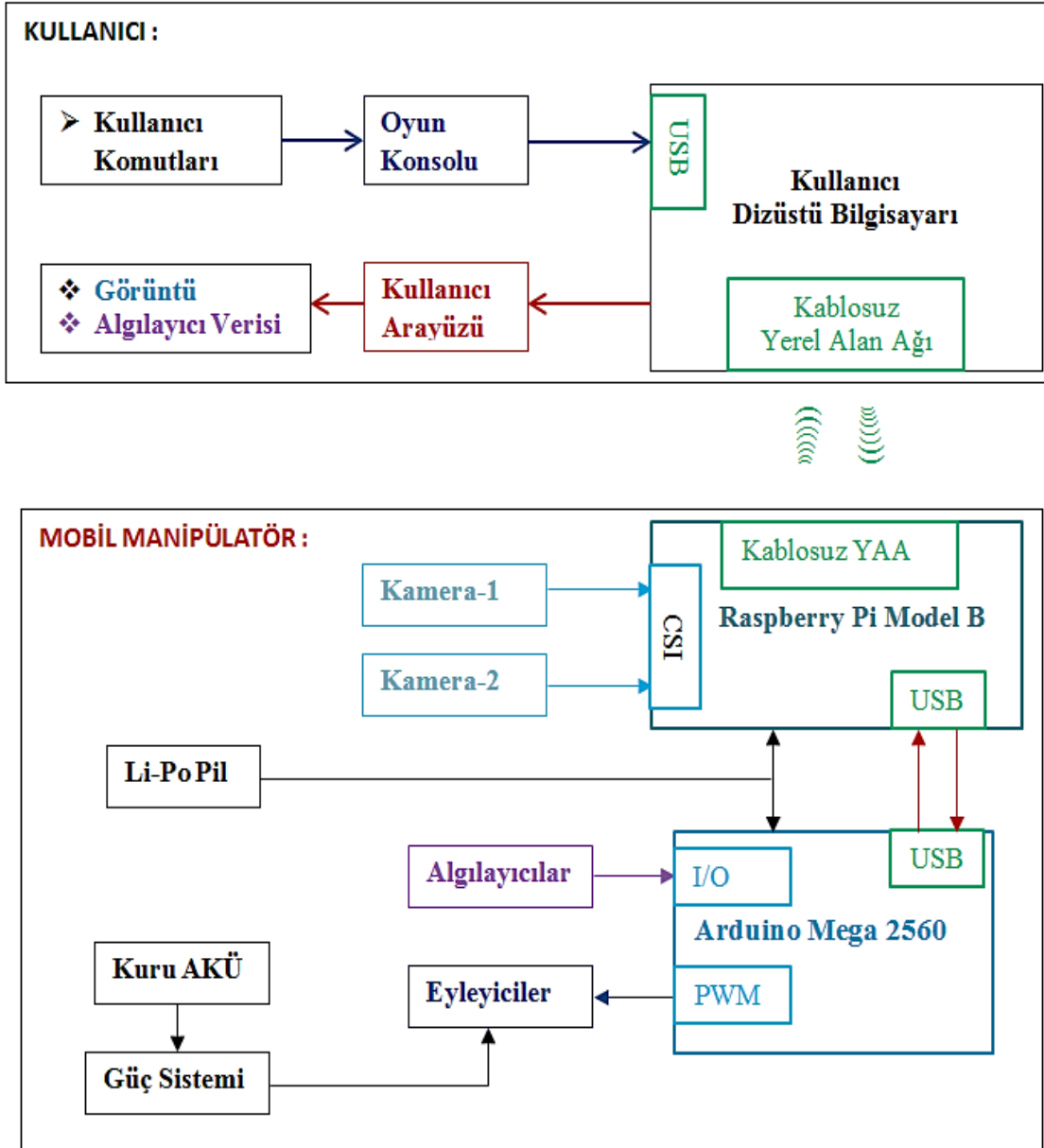
durulacak, muhteva ettiği sensörler ve çalışma esasları, eklemlerdeki tahrik motorlarının seçimi, güç dağıtımı hisselerine değinilecektir.

3. MOBİL MANİPÜLATÖRÜN ELEKTRİKSEL DONANIMI

Bu bölümde önceki bölümlerde de belirtildiği üzere mobil manipülatörün elektriksel ve elektronik donanımı ile ilgili bilgiler verilecektir. Genel donanım şeması Şekil 3.1’de verilmekte olan mobil manipülatörün eyleyicilerin hareket kontrolünü, algılayıcılardan gelen sinyallerin değerlendirilmesini ve kullanıcıyla olan iletişimi “Elektronik Kontrol Kartları”, robottaki güç dağılımını sağlayan dc-dc çevirici devreler, röleler ve güç sağlayan bileşenler “Güç Sistemi”, uzuvlara hareket sağlamakta kullanılan motorlar ve bunlara ait sürücü devreler “Eyleyiciler”, çevresiyle olan etkisini sağlayan bileşenler ise “Algılayıcılar” başlığı altında sırasıyla incelenecektir. Ayrıca bu bileşenlerin seçimine ilişkin kısıtlara, neden ihtiyaç duyulduğuna ve teknik özelliklerine değinilecektir.

3.1 Elektronik Kontrol Kartları

Mobil Manipülatörün temel bileşeni olarak tanıtılabileceğimiz Raspberry Pi isimli elektronik kart, robotun beyni olarak tabir edebileceğimiz üzerine monitör ve klavye vb. harici bileşenler bağlanabilen; Birleşik Krallık’taki okullarda bilgisayar bilimini öğretmek amacıyla Raspberry Pi vakfı tarafından geliştirilmiş ve Element 14/Premier Farnell, RS Components ve Egoman firmaları tarafından imal edilmiş mini bir bilgisayardır [23]. Üzerinde muhteva ettiği 700 Mhz çalışma frekansına sahip Broadcom BCM2835 mikroçipinde konumlandırılan ARM1176JZ-F merkezi işlemci birimi, HD görüntü kalitesi ve yüksek çözünürlük sunan VideoCore IV GPU grafik işlemcisi, 512 MB’lık RAM ve booting ile veri depolamada sabit disk olarak kullanılan SD Karttan meydana gelmekte, SD kart içine yüklenebilen Fedora, RISC OS, Arch Linux ARM veya Debian, Raspberry için Raspian olarak da adlandırılmakta, işletim sistemiyle bir bilgisayarın yapabileceği temel ofis uygulamaları, oyunlar, ticari programları çalıştırma vb. gibi bir çok işlemi yapabilmektedir. Kısacası bir bilgisayarın yerine getirebildiği tüm görevleri tek başına yerine getirebilmekte, diğer elektronik bileşenlerle uyumlu çalışabilmektedir.

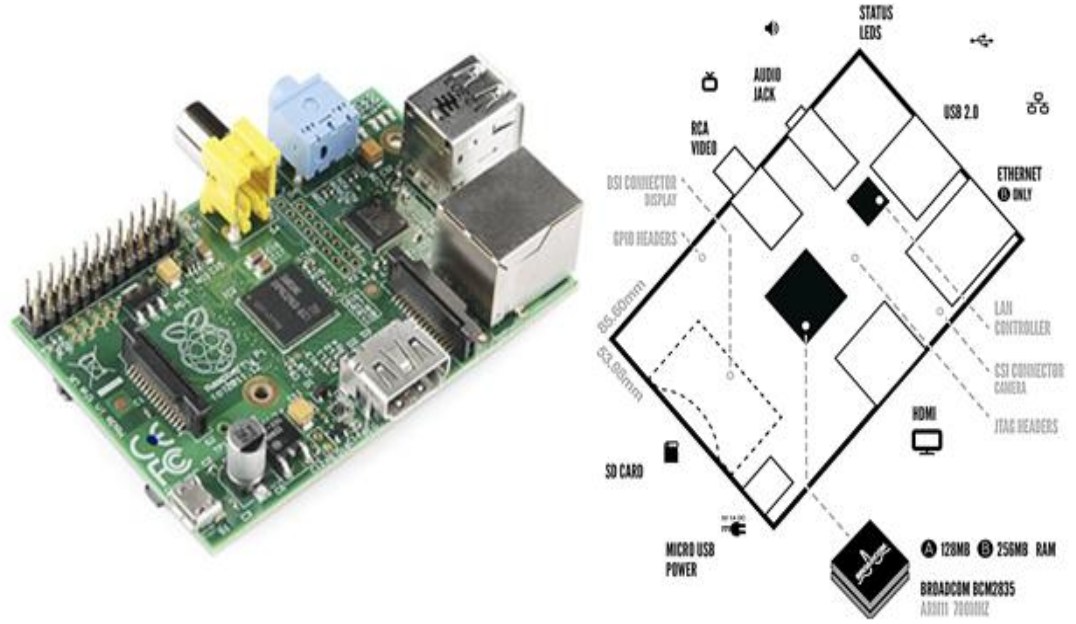


Şekil 3.1 : Donanım şeması

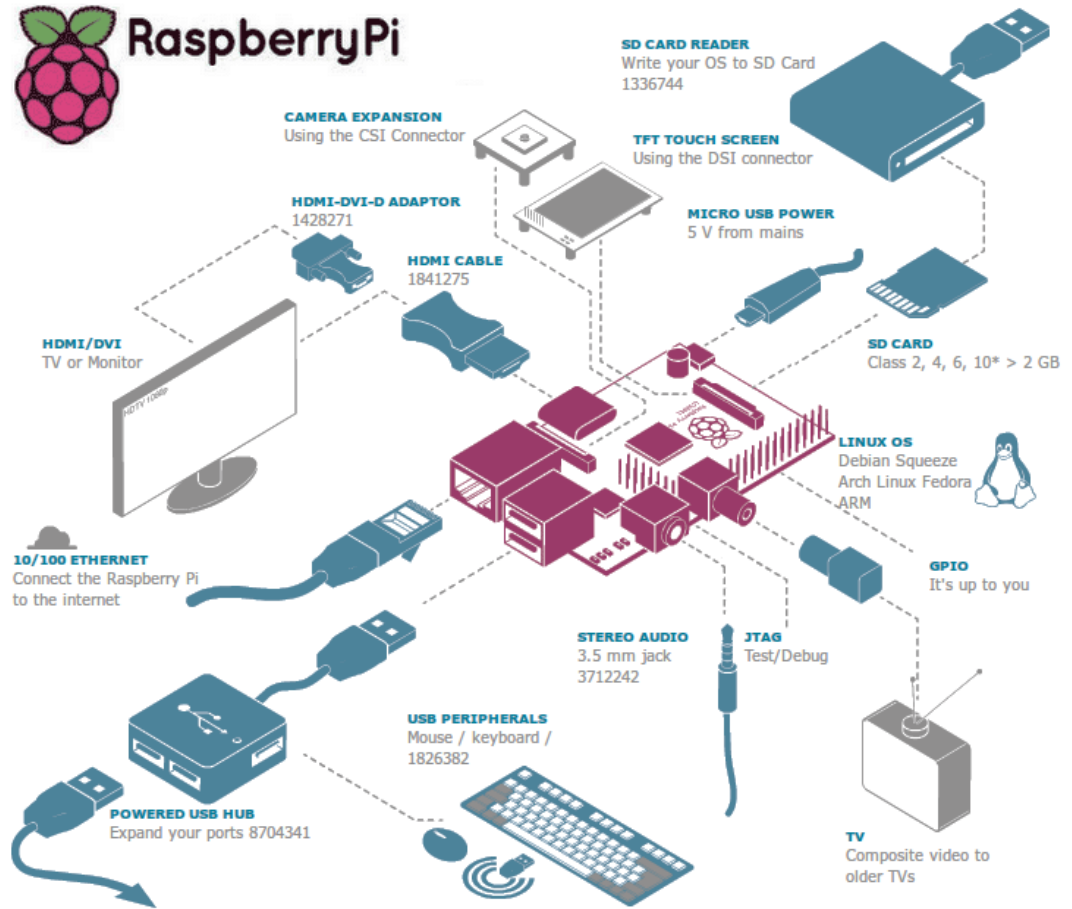
Ayrıca üzerinde 3,5 mm RCA Video Jackı, HDMI video çıkışı, güç girişi, 10/100 RJ45 Ethernet soketi, SD/MMC/SDIO kart yuvası, CSI kamera konnektörü ve USB portu bulundurmakta, MicroUSB portu veya GPIO headerları üzerinden 5V@700 mA ile beslenmektedir. Verilen teknik özelliklere ilişkin devre mimarisi Şekil 3.2’de verilmektedir. Detaylı bağlantı şemasına ve üzerine takılan komponentlerin hangi kanallardan nasıl bağlandığına ise Şekil 3.3’den ulaşılabilir.

Tanıtımı yapılan bu mini bilgisayara CSI konnektörü üzerinden biri manipulatörde diğeri ise mobil platformda olmak üzere iki adet kamera bağlamakta, USB portlarından birine kullanıcı bilgisayarıyla yerel alan ağı kullanarak kablosuz haberleşmek için Edimax Kablasuz Nano Adaptör diğeri ise tanıtımı yapılacak

olan Arduino Mega 2560 kontrol kartı ile veri alışverişinde bulunmak üzere kartın usb çıkışı üzerinden hat bağlanmaktadır. Güç beslemesi ise microUSB girişine Şekil 3.1’de de gösterildiği üzere Li-Po pil ile yapılmaktadır.



Şekil 3.2 : Raspberry pi model b ve mimarisi



Şekil 3.3 : Raspberry pi model b bağlantı şeması

Gerekli bağlantıların yapılmasını takriben kontrolde ticari amaçla geliştirilmiş MATLAB vb. gibi bir programı bu mini bilgisayarın içinde koşturularak, Arduino'nun usb portu üzerinden gönderilen sinyaller mini bilgisayarda yürütülmekte olan Matlab/Simulink arayüzündeki kontrol bloğuna değerlendirilerek elde edilen sonuç LAN üzerinden görüntü verileriyle birlikte kullanıcı bilgisayarına aktarılması amacıyla kullanılmaktadır.

Benzeri işlemlere sahip Black Beagle Bone, UDOO Quad, Fez Hydra, NetDuino+2 vb. mini bilgisayarlar da mevcut olmakla beraber kamera bağlantısı için gerekli sayıda çıkışı sağlamamalarından ve fiyatından ötürü tercih edilmemiştir.

Mobil manipülatörde tanıtımı yapılacak bir diğer elektronik bileşen ise Arduino Mega 2560 elektronik kontrol kartıdır. Temelleri programlama deneyimi olmayan kişilere programlama öğretmek niyetiyle C. Reas ve B. Fry adlı programcılar tarafından Processing programlama dilinin geliştirilmesi ve bu platformda H. Barragan tarafından yürütülen Wiring projesi ile çevresiyle kolayca etkileşebilen bir dilin kullanılarak M. Banzi öncülüğündeki bir ekipce elektronik deneyimi olmayan kişilere temel elektronik öğretmek kendi tasarımlarını yapabilecekleri bir elektronik kartın Atmel AVR mikrodenetleyici etrafına diğer devrelere bağlantı için yan elemanların yerleştirilmesiyle atılmıştır [21].



- ATmega2560 Mikrodenetleyici
- 7-12V Giriş Voltajı
- 54 Dijital G/Ç Pini
- 14 PWM Çıkışı
- 16 ADC Girişi
- 16MHz Çalışma Frekansı
- 256KB Flash Hafıza

Şekil 3.4 : Arduino mega 2560 ve teknik özellikleri

Geliştirilen bu elektronik kart, Processing/Wiring (İşleme/Kablolama) dili başta olmak üzere Matlab, C#, C++, Processing, Flash, MaxMSP vb. dilleri ile geliştirilen yazılımlarla haberleştirilerek çevre elemanları ile temel giriş/çıkış uygulamalarını gerçekleştirmek üzere kullanılan açık kaynaklı fiziksel programlama platformudur.

Dolayısıyla Processing/Wiring dili ile bağımsız interaktif nesneler - uygulamalar-geliştirilebileceği gibi kullanıcı tarafından geliştirilen yazılımlara da bağlanabilir. Processing/Wiring dilinde yazılım geliştirmek için kullanılan açık kaynaklı arayüz yazılımı (IDE) MacOS X, Windows ve Linux platformlarında desteklendiğinden ötürü bilgisayara bağlamak için herhangi bir sürücüye ihtiyaç yoktur ve IDE yazılımı içinde gelen inf dosyasını Linux ve Mac bilgisayarlar için bilgisayara tanıtılması kafidir. Mobil manipülatörde kullanılmakta olan Arduino Mega'nın Şekil 3.4'de verilen teknik özelliklerine ek olarak üzerindeki dijital giriş/çıkış pinlerinin 4'ü UART'tan (donanımsal seri portlarından), biri 16 MHz kristal osilatörden , biri USB bağlantısından , biri güç girişinden, biri ICSP bağlantısından ve biri reset butonundan meydana gelmektedir.

Verilmekte olan bu teknik özelliklerden çok sayıda giriş pininin bulunması, çok miktarda eyleyicilerden ve algılayıcılardan oluşan robotta tercih edilmesinde muadili olan Maple, Teensy3, mbed, USB Pic Development vb. gibi yazılım geliştirme kartlarına göre etkilidir.

Kullanılmakta olan bu kart ile mini bilgisayar öncesinde eyleyici ve algılayıcılar için arayüz devresi oluşturulmakta, gelen veya gönderilen verilerin ilk kontrolü burada yapıldıktan sonra USB portu üzerinden bir harici donanım olarak bağlandığı Raspberry Pi mini bilgisayarı haberleşmesi gerçekleşmektedir.

Buarada Raspberry Pi mini bilgisayar olduğundan Arduino'nun Linux platformu için kullandığı IDE Raspian işletim sisteminde çalışmakta, dolayısıyla başka bir bilgisayara ihtiyaç duymadan bu mini bilgisayar içinde de Arduino'ya ait yazılım geliştirilmektedir.

3.2 Güç Sistemi

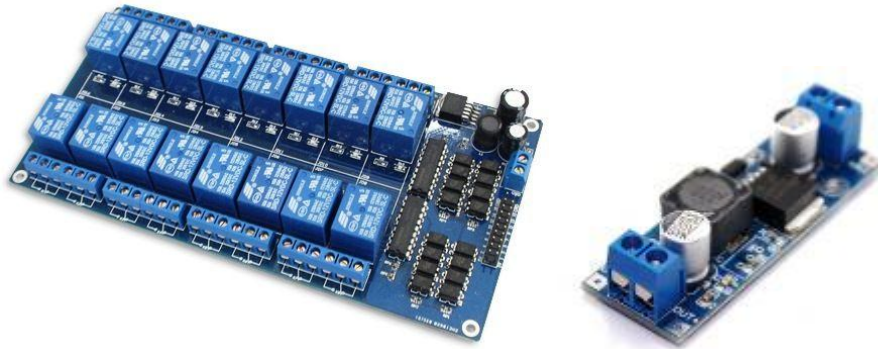
Bu alt bölümde hatırlanacağı üzere mobil manipülatörü besleyen ve gerekli çalışma gerilimlerini sağlayan bileşenlerin irdeleneceği belirtilmişti. Buna göre robotun güç kaynaklarına bakılacak olursa mobil manipülatörde eyleyiciler ile algılayıcılar ve elektronik kartlar için iki ayrı güç kaynağı kullanılmış, eyleyicilerin ihtiyaç duyduğu akım ve gerilim sağlamak amacıyla kurşun-asit 12V 7Ah kuru bakımsız akü, algılayıcılar ve elektronik kartlar için ise 11,1 V 2200 mAh Li-Po pil kullanılması uygun görülmüştür. Böylece eyleyicilere göre düşük güç tüketen mini bilgisayar ve arayüz devresi daha uzun çalışabilmektedir.



Şekil 3.5 : Kuru akü ve li-po pil

Robotta akünün sağladığı güç Şekil 3.6’da verilmekte olan röleler ile palet kollarında 4 adet, manipulatörde 5 adet ve tahrik sistemindeki 2 adet motor için sürücülere Arduinodan gelen sinyaller ile anahtarlanarak dağıtılmakta, Li-Po pilin sağladığı güç ise algılayıcılar ve elektronik kontrol kartlarının duyduğu enerji için voltaj regülatörü tarafından istenen çalışma gerilimine düşürülerek harcanmaktadır.

Kullanılacak olan akü kullanılan çalışma kipine göre ivedilikle kademeli olarak devreye giren eyleyicilerin de tükettikleri maksimum güce ve boşalma karakteristiğine göre, pil ise sürekli çalışma halinde algılayıcı, elektronik kartlar ve dc-dc çeviricilerin tükettikleri maksimum güce göre belirlenmiştir. Bu amaçla yukarda bahsi geçen bağımsız güç kaynakları tercih edilmiştir.



Şekil 3.6 : 16’lı 5v röle ve 5v 3a voltaj regülatör kartı

Seçilen motorların çektiği toplam akım, güç kaynağı tarafından sağlanan toplam akım tarafından karşılanamadığından kesikli harekete neden olmasına karşın motorların anahtarlanarak çalıştırılması gerekmekte, dolayısıyla bu işlem için röle kartına ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılmakta olan röle kontrol kartı 5V ile yüksek güçlü elektrik sinyallerini anahtarlama işlemi için Arduino vb. mikrodenetleyicilerden çekilen 20mA’lik bir tetik sinyali akımının kullanıldığı karttır. Bu sayede 12VDC, 24VDC ya da 220VAC’lik sinyaller mikrodenetleyicinin

ıkış pininden verilecek olan 3.3V ya da 5V'luk gerilim 10A'e kadarki bir akımı kontaklayabilmektedir. Eyleyicileri sürmek için şekil 3.6'da verilen röle kartı eyleyici oğluğuna göre tercih edilmiş olup tetikleme durumunda kısa devre veya tetikleme durumunda açık devre olması istenilen durumlar için NC,NO ve COM bacakları dışarıdadır. Rölelerin anahtarlaması için ihtiyaç duyulacak transistörler kart üzerine yerleştirildiğinden pin çıkışında ilave transistöre gerek duyulmaması diğer bir tercih nedenidir. Bu arada anahtarlanan röle ıkışları birbirinden bağımsız olduğu için her röle farklı gerilimi anahtarlayabilmektedir.

Kullanılmakta olan DC-DC voltaj dşrc regülatör kartı ise zerindeki LM2596 entegresi ile 3A'e kadar olan akımı 4-35V arası giriş geriliminde sabit algılayıcıların ihtiyaç duyduğu 5V'luk çıkış gerilimi sağlayarak anahtarlama gerilim regülatörü üzerinden akıtılabilir. zerindeki ters voltaj koruması 700 kHz anahtarlama frekansı ve 3A'lik sürekli çıkış akımı tercihindeki etken faktörlerdir.

3.3 Eyleyiciler

Mobil manipülatörün uzuvları farklı miktarlardaki yüke maruz kaldığından çeşitli tiplerde motor ve sürücülerin kullanımına gerek duyulmuştur. BDT bölümünde elde edilen yük verilerinden yararlanarak motor seçimine gidilmiş, çekilen akım, motor tipi ve gerilimine göre de sürücü seçilmiştir.

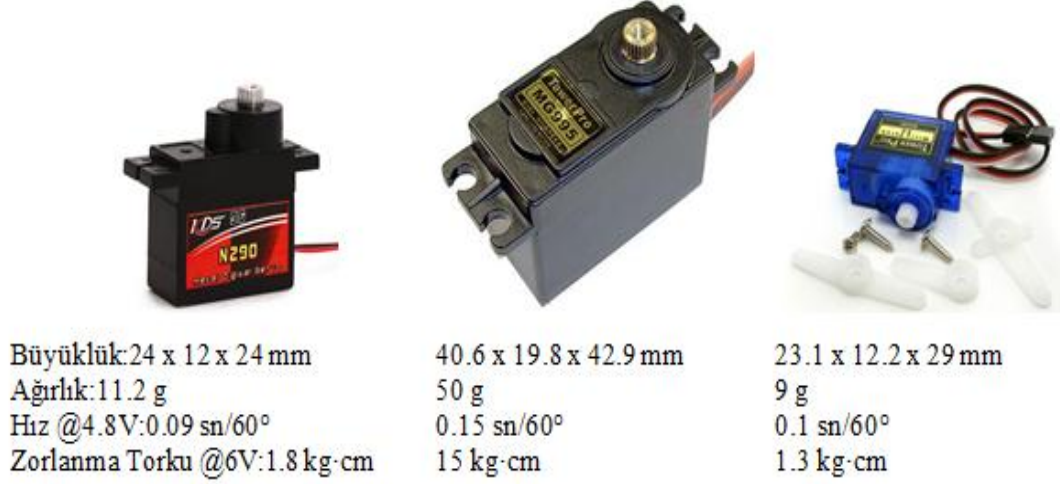


Boyutları : 37Dx57L
Ağırlık : 230 gr
Mil şaft çapı : 6mm
Redüksiyon oranı : 131:1
Hızı (12V) : 80 Rpm
Boşta ektiği Akım (12V) : 300 mA
Zorlanma Akımı (12V) : 5 A
Zorlanma Torku (12V) : 18 kg/cm
64 CPR Encoder

şekil 3.7 : Manipülatöre ait pololu enkoderlı redüktörlü dc motor

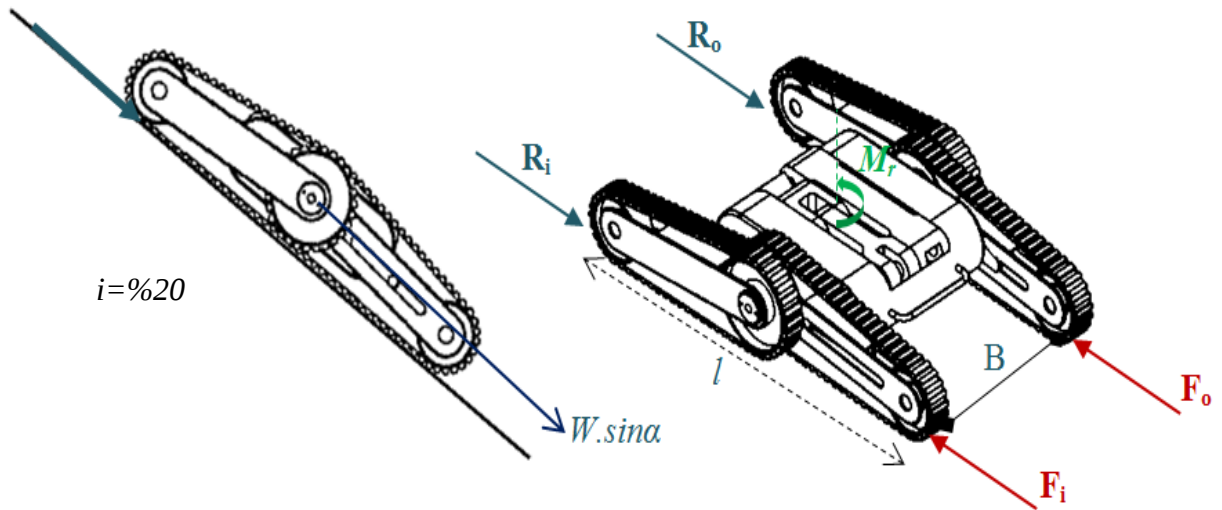
Robotun manipülatörü için maksimum tork değeri 1 kg yük altında ilk iki uzuvda 6 Nm büyüklüğünde olduğundan seçilen motorun çıkış milinin 4:1 oranında dişli mekanizması ile redktrlenmesi hasıl olmuş, diğer uzvunda ise 3 Nm'lik yk için 2:1 oranında kasnak mekanizması ile redktrleme yapılarak şekil 3.7'de verilmekte olan dc motorun seçilmesi uygun grlmştir.

Manipülâtörün bilek kısmında etkiyen düşük mertebedeki yüke göre Şekil 3.8’de verilmekte olan çeşitli ebatlardaki servo motorların kullanılması uygundur. Etkiyen yükler tutmada sürtünme kuvveti ve kısıkaç geometrisi, dönmede ise yataklar tarafından taşındığından diğer uzuvlara nispeten küçük mertebededir.



Şekil 3.8 : Bilek uzvuna ait çeşitli tipteki towerpro servo motorlar

Robotun platform kısmının paletlerini tarik eden motorlarına etkiyen yük ise yol şartlarına bağlı olarak değişiklik gösterdiğinden Şekil 3.9’daki gibi paletlere maksimum yükün etkiyeceği bir yol senaryosuna uygun motor seçilmiştir. Bu durumda aracın sabit hızla tırmanabileceği maksimum eğim %20 olarak tanımlanmış, paletle yol arasındaki sürtünme katsayısı 0.09, yuvarlanma sürtünme katsayısı ise 0.015 alınarak bulunan kuvvet değerinin etkiyecek bozucu etkiler ve sistem modellemedeki belirsizlikler de dikkate alınarak %20 fazlası alınmıştır.



Şekil 3.9 : Platforma etkiyen kuvvetlerden motor seçimi

Bu şartlar altında Şekil 3.10’da verilmekte olan Zheng enkoderlı redüktörlü dc motorun seçilmesi uygun görülmüştür.



Voltage(VDC)	12V
Motor Model	60MM
Reduction Ratio	134
Gearbox Length(mm)	53
No-Load Speed(Rpm)	37
Rated Speed(Rpm)	28
Rated Torque(Kg.cm)	93.09
Rated Current(Amp)	6.00
Max.Momentary Torque(Kg.cm)	116.37

Şekil 3.10 : Paetlere ait zheng enkoderlı redüktörlü dc motor

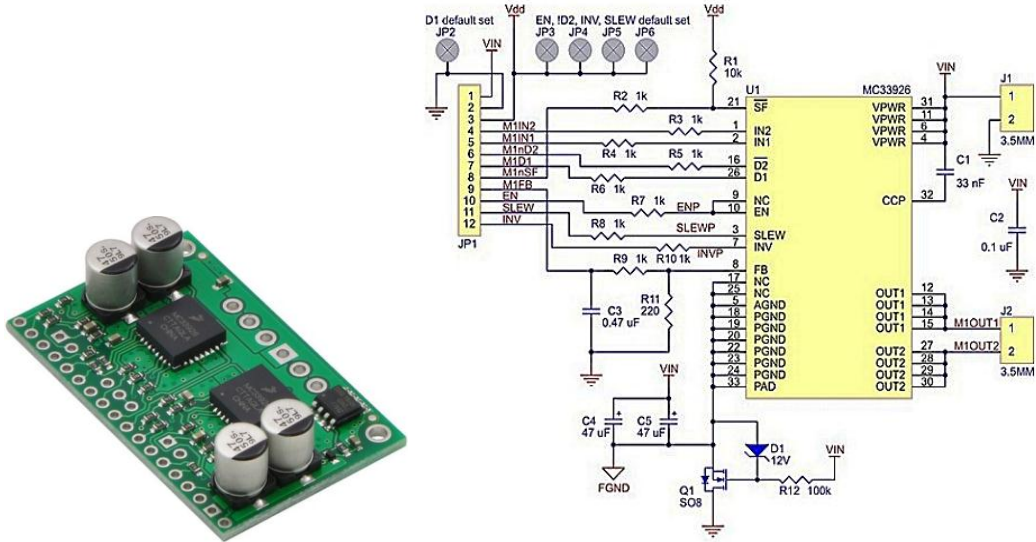
Robotun palet kolları için ise maksimum tork değerleri engel aşma kipindeki hareketlerinde ön kolda 13.75 Nm, arka kolda 6.1 Nm olarak BDT bölümündeki grafiklerden okunmakta, bu değerleri karşılayacak uygun motorlar ilave dişli mekanizmasının ilavesi ile redüktörleme yapılarak seçilmektedir. Bunun için Şekil 3.11’de verilen motor tercih edilmiştir.



Boyutları : 42Dx93L
Hız: 10Rpm
Boşta Çektiği Akım (12V): 34mA
Zorlanma Akımı (12V): 1.7A
Gücü: 20W
MİL Şaft Çapı: 6mm
Ağırlık: 260 gr

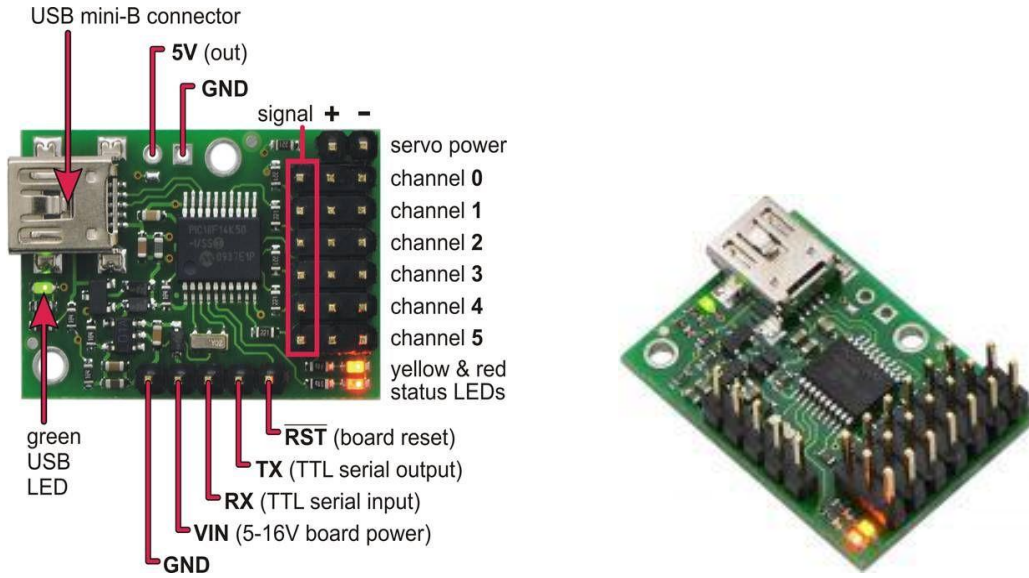
Şekil 3.11 : Palet kollarına ait zheng enkoderlı redüktörlü dc motor

Sırasıyla robotun çeşitli uzuvlarını tahrik etmek için seçilen motorların ihtiyaç duyduğu akımın ve gerilimin sağlanabilmesi sürücü devreler ile gerçekleştirilmekte ve bu devreler de Şekil 3.12’de verilmektedir. Seçilen sürücü devre düşük gerilim, kısa devre, yüksek akım, voltaj ve sıcaklık koruması sağlaması ve üzerinde barındırdığı iki adet MC33926 motor sürücü entegresi ile yüksek güce ihtiyaç duyan iki adet dc motor sürülebilen ufak ebatlarda tasarlanmış bir devredir. Üzerindeki MC33926 motor sürücü entegresi 5-28V aralığındaki tahrik motorlarının ihtiyaç duyduğu 3A’ye kadar olan akımı her iki kanalında eş zamanlı çalışması durumunda sağlayabilmekte, kademeli çalışan motorların ise ihtiyacı olan 5A’lık akımı tek kanalının çalışması durumunda sağlamaktadır.



Şekil 3.12 : Mc33926 dc motor sürücü ve devre şeması

İki motorun tek devre ile sürülmesi ile daha az sayıda devreye ihtiyaç duyulması ve sağladığı koruma tedbirleri bu devrenin tercih edilmesinde etkili olmuştur. Lakin sistemdeki motor sayısı yeni bir motor sürücü devresi tasarımına ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 3.13 : Maestro 6 kanallı servo motor sürücü kartı

Manipulatörün bilek kısmındaki servo motorlarda ise Şekil 3.13’de verilmekte olan Maestro servo motor sürücü kartının kullanılması uygundur. Eyleyicilere arayüz devresi sağlamak ve hareket kontrolü için kullanılan Arduino haberleşmek için her iki kartın RX ve TX pinleri (TTL serial) kullanılır. Veyahut Raspberry Pi üzerinde de kontrol etmek mümkündür. Bu kart, her kanalı için ayrı hız ve ivme kontrolü sağlaması, hassas ve yüksek çözünürlüğü ile kontrol gerektirmeksizin düzgün harekete neden olmasından dolayı tercih edilmektedir.

3.4 Algılayıcılar

Çevresiyle sürekli etkileşim halinde olan mobil manipulatörün etrafındaki dünyanın nasıl görüldüğünü anlayabilmesi, etkilere tepki verebilmesi, bilgi alabilmesi, ölçüm yapabilmesi, eyleycilerin yaptığı hareketleri kontrol edebilmesi ve postürünün oryantasyonu ile pozisyonu belirleyebilmesi gibi nedenlerle çeşitli tipte algılayıcılara gereksinilmektedir. Bunlardan ilki, odometrik amaçlı kullanılacak olan encoderlardır. Yapısındaki 2 manyetik sensör ile motor miline takılan mıknatıslı kaplinin attığı tur sayısını sayılarak, motor hızını dolayısıyla paletlerin aldığı mesafeyi ölçmek mümkün olmakta, dolayısıyla başlangıç pozisyonu bilinen robotun çalışma uzayındaki yeri ve dönmesi hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.14 : 2 kanallı manyetik palet enkoderları

Robot üzerinde benzer amaçla kullanılan bir diğer sensör ise Şekil 3.15’de verilmekte olan ivme ölçerlerdir. Aracın hareket esnasında takip ettiği yörünge eğrisini çıkarmak, paletlerdeki enkoderlardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmak ve yapılan hareket neticesindeki yeni oryantasyon ve pozisyon verilerini okumak, diğer bir ifadeyle araç durumunu kestirmek, için kullanılmaktadır. Tercih edilen sensör kartı 3 eksenli gyro ve açısal ivme ölçerden oluşan ve her ekseninde 16 bitlik bir çözünürlüğü ayrı kanallardan I²C çıkışı olarak verebilen IMU’dur. Üzerindeki voltaj regülatörü sayesinde 3 ile 5 V arası bir besleme voltajında çalışabilmektedir.



Şekil 3.15 : Sensörler: (a) 6 eksen ivme ve gyro sensörü. (b) 3 eksen ivme ölçer.

Robot etrafındaki nesneleri ise gönderdiği ses dalgası veya ışık ile algılamakta, kullanılan mesafe sensörleri ile bunlara olan uzaklığını belirlemektedir. Bu işlevini platformun ön tarafına yerleştirilen Şekil 3.16’da verilmekte olan ultrasonik ve kızılötesi sensörler ile yerine getirmektedir. Kullanılmakta olan ultrasonik sensör

15°'lik görme açısına sahip olduğundan V ağızlı platformun alt ve üst taraflarına 2cm'den 400cm'ye kadar olan mesafeyi 3mm hassasiyetle ölçmek için konumlandırılmış, kızılötesi sensör ise ağız ortasındaki düşey düzleme 80 cm'ye kadar olan mesafedeki engelleri algılamak için yerleştirilmiştir.



Şekil 3.16 : Ultrasonik ve kızılötesi mesafe sensörü

Benzer maksatla kullanıcı tarafından dış dünyanın ve manipülatör tarafından taşınan nesnenin algılanabilmesi için biri platformun ön kısmında diğer manipülatörün kısıkaçı üzerinde olmak üzere Raspberry Pi kartına CSI soket üzerinden bağlanan iki adet 5MP kamera yerleştirilmiştir.



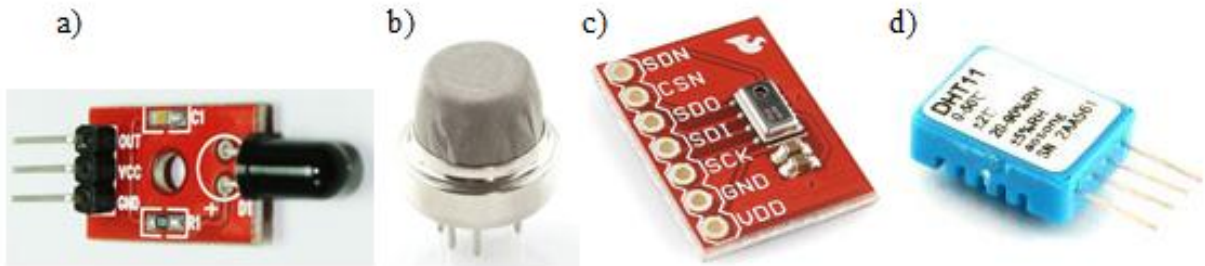
Boyutları: 25x20x9mm

Çözünürlük: 5 MP (2592x1944 piksel)

Video Çekimi: 1080p, 720p ve 640x480p

Şekil 3.17 : Raspberry pi kamera modülü

Robotun yapısında kullanılan diğer sensörler ise Şekil 3.18'de verilmekte olan arama, keşif esnasındaki türlü senaryolar için çevrenin atmosferik özellikleri, gaz yoğunluğu ve tehlike oluşturacak benzeri durumlar hakkında bilgi toplamakta kullanılacak olan ışık, nem, ateş algılama, yanıcı gaz algılama ve basınç sensörleridir.



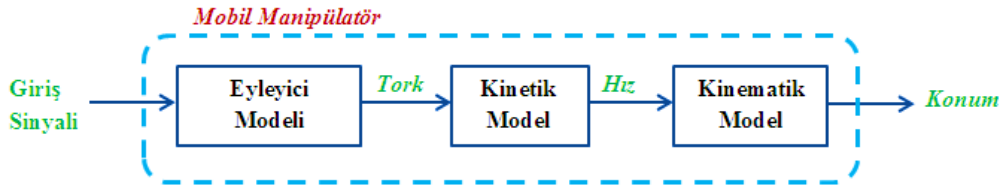
Şekil 3.18 : Sensörler: (a)Ateş Algılayıcı. (b)Yanıcı gaz. (c)Barometrik basınç (d)Nem.

Sensörlerin teknik özellikleri hakkında sırasıyla bilgi verilecek olunursa; ateş algılayıcısı yapısındaki IR alıcı ile 760 nm - 1100 nm aralığındaki dalga boyuna sahip 20 cm ile 100 cm ötedeki ateşi tespit edebilmektedir. Yanıcı gaz sensörü ortamdaki 300 ile 10.000 ppm konsantrasyonlardaki yanıcı gaz yoğunluğu ile orantılı analog voltaj bilgisi vererek ölçüm yapmaktadır. Barometrik basınç sensörü ise 50 kPa ve 115 kPa arasındaki basıncı -40°C ile 105°C sıcaklık aralığında dijital olarak SPI iletişim üzerinden vermektedir. Kullanılan nem ve sıcaklık sensörü ise 0 ile 50°C ve %20 ile %90 arasındaki sıcaklık ve nemi 2°C sıcaklık hata payı, %5 nem hata payında ölçmektedir.

Bu safhadan itibaren BD mekanik tasarımı ve donanımı anlatılan mobil manipülatörün uzaysal operatör cebrine göre dinamik modelinin çıkarılması ile devam edilecek devamında ise aracın simülasyon çalışmasında yapılacak olan kontrolle çalışma noktalanacaktır.

4. DİNAMİK MODELLENME

Bu bölümde paletli mobil manipülatörün dinamik modeli, rijit yapıların analizi ve modellenmesini uzaysal bir çalışma ortamında altı boyutlu vektörlerin kullanımı ile kolaylaştıran uzaysal operatör cebri vasıtasıyla oluşturulacaktır. Elde edilen dinamik model, mobil manipülatörün verilen herhangi bir andaki konum, hız ve ivmesini kısacası hareketin geometrik yönlerini inceleyen kinematik model ile sisteme üzerine etki eden dengelenmemiş kuvvetlerin neden olduğu hareketin kuvvetlerinin analizini inceleyen kinetik model olmak üzere iki alt başlık altında incelenecektir.



Şekil 4.1: Mobil robot dinamik model bileşenleri

Dinamik modelin, kullanılan elektrik motorlara ilişkin eyleyici modeliyle birleşiminden oluşan mobil manipülatörde, çıkarılan modeller arasındaki etkileşim Şekil 4.1’de verilmektedir.

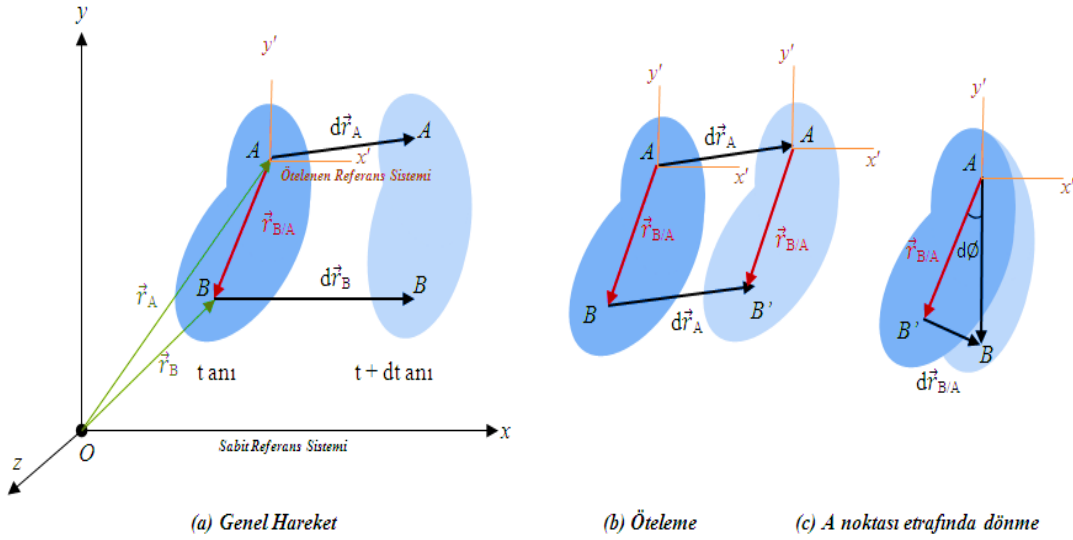
4.1 Mobil Manipülatörün Kinematik Modellenmesi

Bu alt bölümde uzaysal operatör cebri yöntemiyle manipülatör ve mobil platform üzerindeki hız yayılımları çıkarılarak tasarlanan mobil manipülatörün kinematik modeli elde edilecektir. Lakin mobil manipülatöre ait kinematik modeli kurmadan önce bazı kavramları ve ifadeleri, üzerine inşa edilecek modelin anlaşılabilmesi için alt başlıklar altında açıklamakta fayda vardır.

4.1.1 Uzaysal operatör cebri

Hatırlanacağı üzere bir rijit cismin genel hareketi öteleme ve dönmenin birleşiminden oluşmaktadır. Bu hareketleri açıklayabilmek için cisim üzerindeki A ve B noktalarının mutlak konum, hız ve ivmelerini ölçmek için yararlanılan sabit

referans sistemi (eylemsiz çerçeve) ile bunlardan genellikle hareketi bilinen noktaya, A noktasına, yerleştirilen ve sabit referans sistemine göre hareketine izin verilen ötelenen referans sistemi olarak adlandırılan iki koordinat sistemi kullanılmaktadır. Hareketi açıklayan ifadeler Şekil 4.2'deki rijit cisimden faydalanarak türetilir.



Şekil 4.2: Rijit cismin kinematığı

Hareketi açıklamak için rijit cisim üzerinden keyfi olarak seçilen iki noktadan B noktasının A noktasına göre konumu (bkz. Şekil 4.2.a),

$$\vec{r}_B = \vec{r}_A + \vec{r}_{B/A} \quad (4.1)$$

ile ifade edilir. A ve B noktalarının dt süresince yapmış olduğu düzlemsel hareket neticesinde $d\vec{r}_A$ ve $d\vec{r}_B$ yerdeğiştirmeleri ile her iki nokta $d\vec{r}_A$ kadar ötelenmekte (bkz. Şekil 4.2.b), sonrasında sadece B noktası hareketi bilinen A noktası etrafında $d\theta$ kadar dönmektedir (bkz. Şekil 4.2.c). A noktası etrafındaki dönmeden dolayı B noktasının bağıl yer değiştirmesi,

$$d\vec{r}_{B/A} = \vec{r}_{B/A} \cdot d\theta \quad (4.2)$$

B noktasının $d\vec{r}_A$ ötelenmesi ve $d\theta$ dönmesi sonucundaki toplam yer değiştirmesi ise,

$$d\vec{r}_B = d\vec{r}_A + d\vec{r}_{B/A} \quad (4.3)$$

olur. Noktaların birim zamandaki yerdeğiştirmesini bulmak için dt süresine bölünmesi neticesinde bulunan A ve B noktaları arasındaki hız bağıntısı,

$$\frac{d}{dt} \vec{r}_B = \frac{d}{dt} \vec{r}_A + \frac{d}{dt} \vec{r}_{B/A} \quad (4.4)$$

ile ifade edecek ve bulunan ifadeyi sabit refereans sisteminin x,y eksenlerinden ölçülen mutlak hızlar (bkz. Şekil 4.2.a) ile ötelenen eksen sisteminin eksenlerinden gözlenen bağıl hız (bkz. Şekil 4.2.c) cinsinden yazacak olursak B noktasının hızı,

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{B/A} \quad (4.5)$$

denkleminde belirlenir.

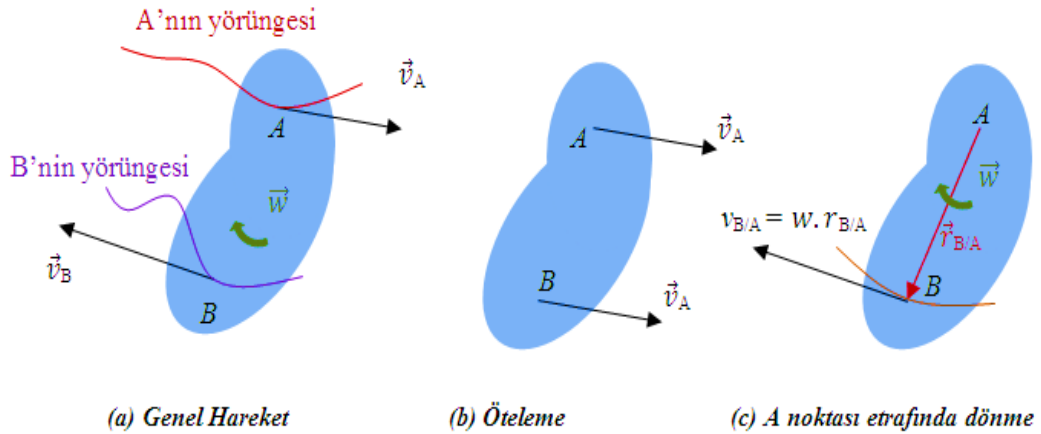
Bulunan hız ifadesindeki B noktasının $r_{B/A}$ eğrilik yarıçaplı dairesel yay boyunca hareket etmesi neticesinde hareketi bilinen A noktasına göre bağıl hızı (bkz. Şekil 4.2.c),

$$\vec{v}_{B/A} = \vec{\omega} \times \vec{r}_{B/A} \quad (4.6)$$

dönme sonucu oluşan A noktası merkezli $\vec{r}_{B/A}$ eğrilik yarıçapının doğrultusuna diktir. A'daki ötelenen referans sistemin z' eksenini etrafında $\vec{\omega}$ açısal hızı ile dönen bağıl hız ifadesini B noktasının hız ifadesinde açık formda yazacak olursak B noktasının A noktasına göre hızı,

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\omega} \times \vec{r}_{B/A} \quad (4.7)$$

denklemini ile ifade edilir (bkz. Şekil 4.3).



Şekil 4.3: Rijit cismin kinematik diyagramı

Elde edilen bu denklemi matris formunda yazmadan evvel denklemdeki vektörel çarpım içeren terimi matris şeklinde yazabilmek için skaler çarpım biçimine dönüştürmek gerekmektedir. Bunu açıklayabilmek için $\vec{a}, \vec{b} \in \mathbb{R}^3$ tanımlı iki vektörün vektörel çarpımını yapıp A ve B tanımlanan iki matrisin çarpımı şeklindeki örnek üzerinden anlatım anlaşılır kılacaktır.

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{bmatrix} a_y b_z - a_z b_y \\ a_z b_x - a_x b_z \\ a_x b_y - a_y b_x \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}_{3 \times 1} = A_{3 \times 3} \cdot B_{3 \times 1} \quad (4.8)$$

Elde edilen ifadede görüldüğü üzere A çarpımsal simetrik (skew symmetric) matristir. Çünkü $A + A^T = 0$. Bu türden matrisleri özel olarak belirtmek için matris üzerine şapka işareti koyarak belirtelim. Yani vektörel çarpım ifadesini $\vec{a} \times \vec{b} = \hat{a} \cdot b$ şeklinde yazalım. Böylece vektörel çarpım ifadesini $\vec{a} \times$: $\hat{a}$ biçiminde bir operatör olarak yazılabilir. Bulunan bu sonucu bağlı hız ifadesinde yani B noktasının hız denklemindeki vektörel çarpım içeren terimi üzerinde kullanılacak olursa,

$$\begin{aligned} \vec{w} \times \vec{r}_{B/A} = -\vec{r}_{B/A} \times \vec{w} &= \begin{bmatrix} w_y r_z - w_z r_y \\ w_z r_x - w_x r_z \\ w_x r_y - w_y r_x \end{bmatrix}_{3 \times 1} = - \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix}_{3 \times 1} \\ &= -\hat{r}_{B/A} \cdot \vec{w}_A \end{aligned} \quad (4.9)$$

ifadesi bulunur. Burada vektörel çarpımın $\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}$ özelliğinden yararlanarak vektörel çarpım $-\vec{r}_{B/A} \times \vec{w}$ biçiminde yazılmıştır. Bu durumda (4.7) ifadesini yeniden yazılacak olursa,

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A - \hat{r}_{B/A} \cdot \vec{w}_A \quad (4.10)$$

denkleminde ulaşılır. Ayrıca rijit bir cisim üzerindeki her noktanın dönme hızı referans eksene göre aynı olduğundan,

$$\vec{w}_B = \vec{w}_A \quad (4.11)$$

ifadesini yazmak mümkündür. Tek bir rijit cisim için çıkarılan (4.10) ve (4.11) ifadelerini matris formunda (4.12) olduğu gibi yazılması ile uzaysal operatör cebrine başlanabilir.

$$\begin{bmatrix} \vec{w}_B \\ \vec{v}_B \end{bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ -\hat{r}_{B/A} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \begin{bmatrix} \vec{w}_A \\ \vec{v}_A \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (4.12)$$

(4.13) ifadesinin uzaysal hız vektörleri ve bu iki hız vektörünü birbirine eşleyen uzaysal bir operatör olan yayılım matrisi cinsinden yazılması ile bir rijit cisim üzerindeki hareket,

$$\vec{V}_B = \Phi_{B/A} \cdot \vec{V}_A \quad (4.13)$$

denkleminde bulunur. Benzer kinematik hız analizi Şekil 4.3'deki gibi birbirine B-B' noktalarından çakışık ve bu noktadan geçen h dönme ekseninde bağlı olarak hareket eden iki rijit kol için yapılırsa kollar üzerinde ve kollar arasında sırasıyla,

(kol-1) :

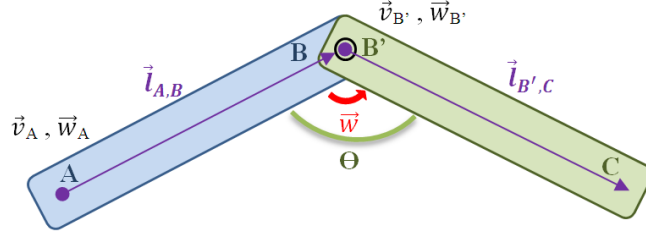
$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{w}_A \times \vec{l}_{A,B} \quad (4.14)$$

$$\vec{w}_B = \vec{w}_A \quad (4.15)$$

(kol-2) :

$$\vec{v}_C = \vec{v}_{B'} + \vec{w}_{B'} \times \vec{l}_{B',C} \quad (4.16)$$

$$\vec{w}_C = \vec{w}_{B'} \quad (4.17)$$



Şekil 4.4: Rijit kolların kinematik diyagramı

(kollar arası) :

$$\vec{v}_{B'} = \vec{v}_B \quad (4.18)$$

$$\vec{w}_{B'} = \vec{w}_B + \vec{w}, \vec{w} = \vec{h} \cdot \dot{\theta} \Rightarrow \vec{w}_{B'} = \vec{w}_B + \vec{h} \cdot \dot{\theta} \quad (4.19)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerin matris formunda yazılması ile

$$\begin{bmatrix} \vec{w}_B \\ \vec{v}_B \end{bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ -\hat{l}_{A,B} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \begin{bmatrix} \vec{w}_A \\ \vec{v}_A \end{bmatrix}_{6 \times 1} \Rightarrow \vec{V}_B = \Phi_{B,A} \cdot \vec{V}_A \quad (4.20)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{w}_C \\ \vec{v}_C \end{bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ -\hat{l}_{B',C} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \begin{bmatrix} \vec{w}_{B'} \\ \vec{v}_{B'} \end{bmatrix}_{6 \times 1} \Rightarrow \vec{V}_C = \Phi_{C,B'} \cdot \vec{V}_{B'} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \vec{w}_{B'} \\ \vec{v}_{B'} \end{bmatrix}_{6 \times 1} &= \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ -\hat{l}_{B,B'} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \begin{bmatrix} \vec{w}_B + \vec{w} \\ \vec{v}_B \end{bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \begin{bmatrix} \vec{w}_B \\ \vec{v}_B \end{bmatrix}_{6 \times 1} + \dots \\ &\dots + \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \begin{bmatrix} \vec{h} \\ 0 \end{bmatrix}_{6 \times 1} \cdot \dot{\theta} \\ &\Rightarrow \vec{V}_{B'} = \Phi_{B',B} \cdot \vec{V}_B + \vec{H} \cdot \dot{\theta} \end{aligned} \quad (4.22)$$

ifadeleri bulunur. Son iki ifade birleştirilirse,

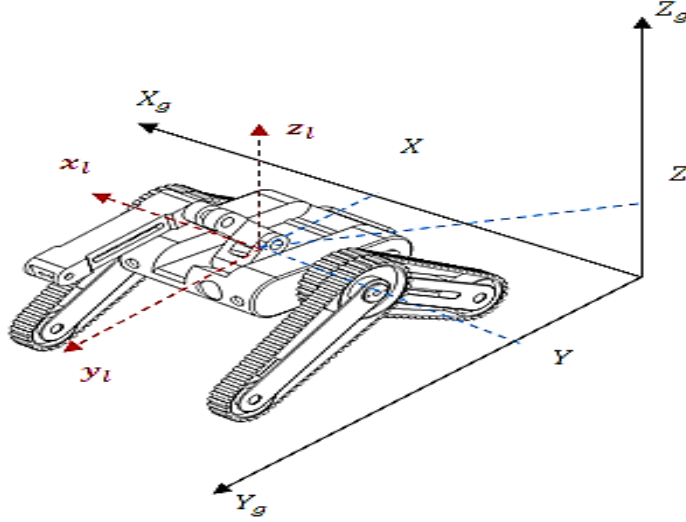
$$\vec{V}_C = \Phi_{C,B} \cdot \vec{V}_B + \vec{H} \cdot \dot{\theta} \quad (4.23)$$

halini alır. Bu ifade birbirine bağlı olarak üç boyutlu –uzaysal- hareket yapan iki rijit cismin uzaysal hız denklemdir. Bulunan denklemden hareketle n tane uzuvdan oluşan manipülatörün ve mobil platformun kinematik denklemleri ileriki bölümlerde türetilcek ve parametrik olarak hesabı yapılacaktır.

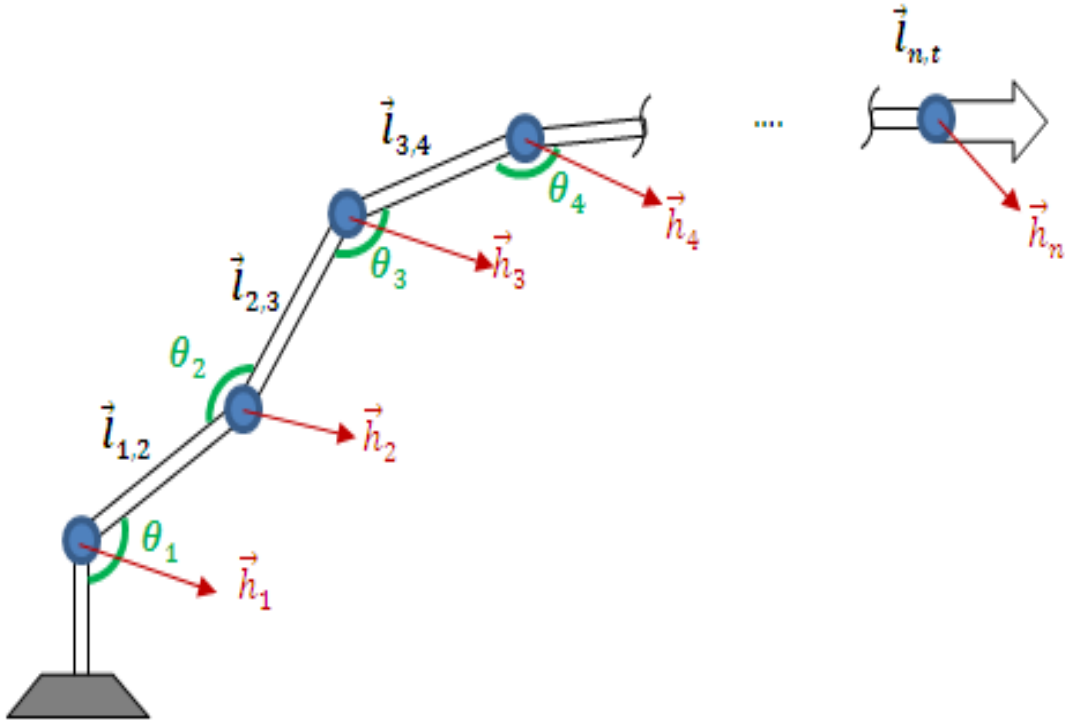
4.1.2 Manipülatör kinematik modeli

Bu alt bölümde Şekil 4.5’de taslak resmi verilmekte olan mobil manipülatörün üzerindeki açık zincirli seri düzlemsel manipülatörün rijit uzuvları için önceki bölümde birbirine bağlı hareket eden rijit cisimlerin hız denklemi – (4.23) nolu denklem – kullanılarak; matris formunda tüm eklemleri kapsayan uzaysal hız

vektörü, uzuv üzerindeki bir eklemden diğer ekleme hızın dağılımını ifade eden uzaysal yayılım matrisi ve eklemlerdeki dönme doğrultularını ifade eden uzaysal dönme matrisi türetilecek, sonrasında ise elde edilen denklemlerden yararlanarak manipülâtörün kinematik analizi yapılacaktır.



Şekil 4.5: Eylemsiz çerçevede paletli mobil robot



Şekil 4.6: n-uzuvlu açık zincirli sabit platformlu seri manipülâtör

Genel olarak n uzuvdan oluşan sabit platformlu Şekil 4.6'daki gibi açık zincirli seri manipülâtörün her bir uzvu için hız ifadelerini uzaysal hız vektörleri ve yayılım matrisleri ile yazacak olursak,

$$\begin{aligned}
\vec{V}_0 &= \vec{0} \\
\vec{V}_1 &= \phi_{1,0} \cdot \vec{V}_0 + \vec{H}_1 \cdot \dot{\theta}_1 \\
\vec{V}_2 &= \phi_{2,1} \cdot \vec{V}_1 + \vec{H}_2 \cdot \dot{\theta}_2 \\
\vec{V}_3 &= \phi_{3,2} \cdot \vec{V}_2 + \vec{H}_3 \cdot \dot{\theta}_3 \\
&\vdots \\
&\vdots \\
&\vdots \\
\vec{V}_{n-1} &= \phi_{n-1,n-2} \cdot \vec{V}_{n-2} + \vec{H}_{n-1} \cdot \dot{\theta}_{n-1} \\
\vec{V}_n &= \phi_{n,n-1} \cdot \vec{V}_{n-1} + \vec{H}_n \cdot \dot{\theta}_n
\end{aligned} \tag{4.24}$$

4.24 nolu denklem takımı elde edilir. Bu denklemleri matris formunda yazacak olursak,

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \\ \vec{V}_3 \\ \vdots \\ \vec{V}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & \dots \\ \phi_{2,1} & I & 0 & \dots \\ \phi_{3,1} & \phi_{3,2} & I & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \phi_{n,1} & \phi_{n,2} & \phi_{n,3} & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{H}_1 & \vec{0} & \dots & \vec{0} \\ \vec{0} & \vec{H}_2 & \dots & \vec{0} \\ \vec{0} & \vec{H}_3 & \dots & \vec{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vec{0} & \vec{0} & \dots & \vec{H}_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_n \end{bmatrix} \tag{4.25}$$

matrisi elde edilir. Elde edilen ifade genişletilmiş uzaysal hız, yayılım, dönme ve eklem hız matrislerini temsil edecek şekilde ,

$$\underset{\sim}{V}_{6n \times 1} = \underset{\sim}{\phi}_{6n \times 6n} \cdot \underset{\sim}{H}_{6n \times n} \cdot \underset{\sim}{\dot{\theta}}_{n \times 1} \tag{4.26}$$

olarak yazılabilir. Bu denklem ile n-uzuvdan oluşan karmaşık bir sistem bütünleşik olarak ifade edilmiş olur. Bulunan denklem, manipülatörün uç noktasının hız vektörlerine n.uzvun uzaysal hız vektörü ile

$$\vec{V}_t = \phi_{t,n} \cdot \vec{V}_n \tag{4.27}$$

bağlanabileceği gibi tüm uzaysal hız vektörlerini içeren $\underset{\sim}{V}_{6n \times 1}$ tensörünün

$\underset{\sim}{\phi}_t$ yayılım matrisi ile çarpımıyla şu şekilde bağlanabilir:

$$\vec{V}_t = \underset{\sim}{\phi}_t \cdot \underset{\sim}{V} \tag{4.28}$$

Burada tüm uzuvlar ile uç noktası arasındaki yayılım matrisi,

$$\underset{\sim}{\phi}_t = [0_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 6} \quad \dots \quad 0_{6 \times 6} \quad \phi_{t,n}]_{6 \times 6n} \quad (4.29)$$

ile ifade edilir. Elde edilen ifadelerin birleştirilmesi manipülatöre ait ileri,ters kinematik model ve jacobien matrisi sırasıyla,

$$\underset{\sim}{\vec{V}}_t = J \cdot \underset{\sim}{\dot{\theta}} \quad (4.30)$$

$$\underset{\sim}{\dot{\theta}} = J^{-1} \cdot \underset{\sim}{\vec{V}}_t \quad (4.31)$$

$$J = \underset{\sim}{\phi}_t \underset{\sim}{\phi} \underset{\sim}{.H} \quad (4.32)$$

olarak bulunur. Kurulan matematiksel alt yapı ile mobil robotun üzerindeki manipülatöre ait kinematik model çıkarılmaya başlanabilir. Bu aşamada Şekil 4.7’de verilmekte olan manipülatör için kinematik model çıkarılacaktır.

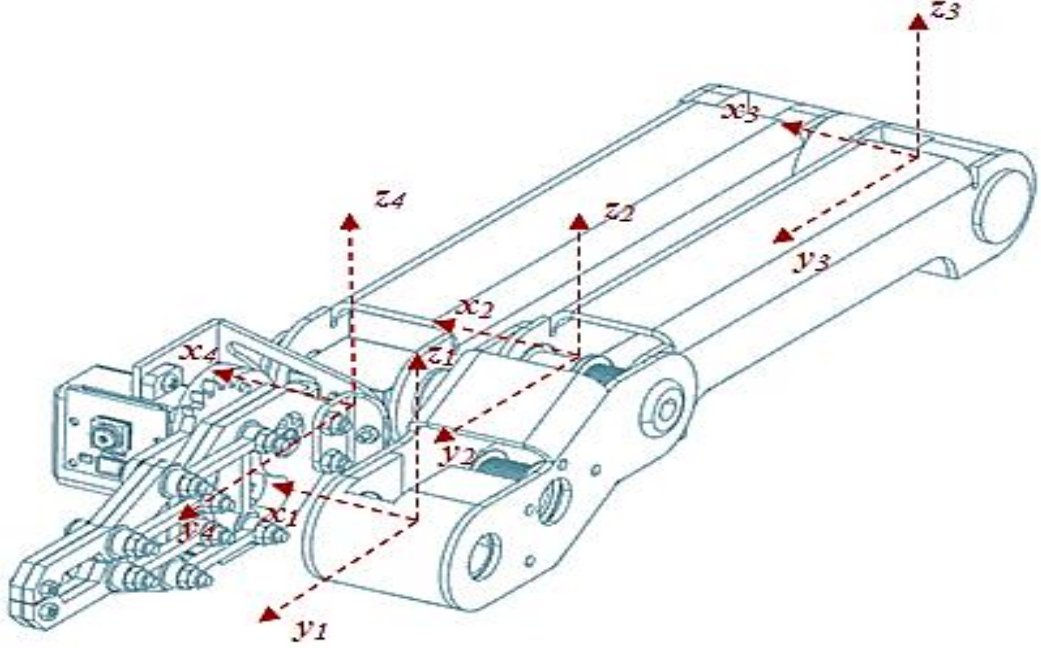


Şekil 4.7: Mobil robot üzerindeki manipülatör

Kinematik modelin çıkarılabilmesi için öncelikle eksen takımları eklemler üzerine yerleştirilip $\vec{h}$ dönme vektörleri ve uzuvların eklemleri arasındaki uzuv vektörleri tanımlanmalıdır. Yerleştirilen uzuv ve dönme vektörleri ait olduğu uzuv üzerindeki eksen takımına göre tanımlandığından, eksen takımlarının dönme (rotasyon) matrisi ile çarpılması neticesinde güncellenerek çalışma uzayındaki yeni konumuna ulaşacaktır. Manipülatörün başlangıç durumundaki eklemlerinin konumunu ifade eden başlangıç yapılandırma (konfigürasyon) vektörü,

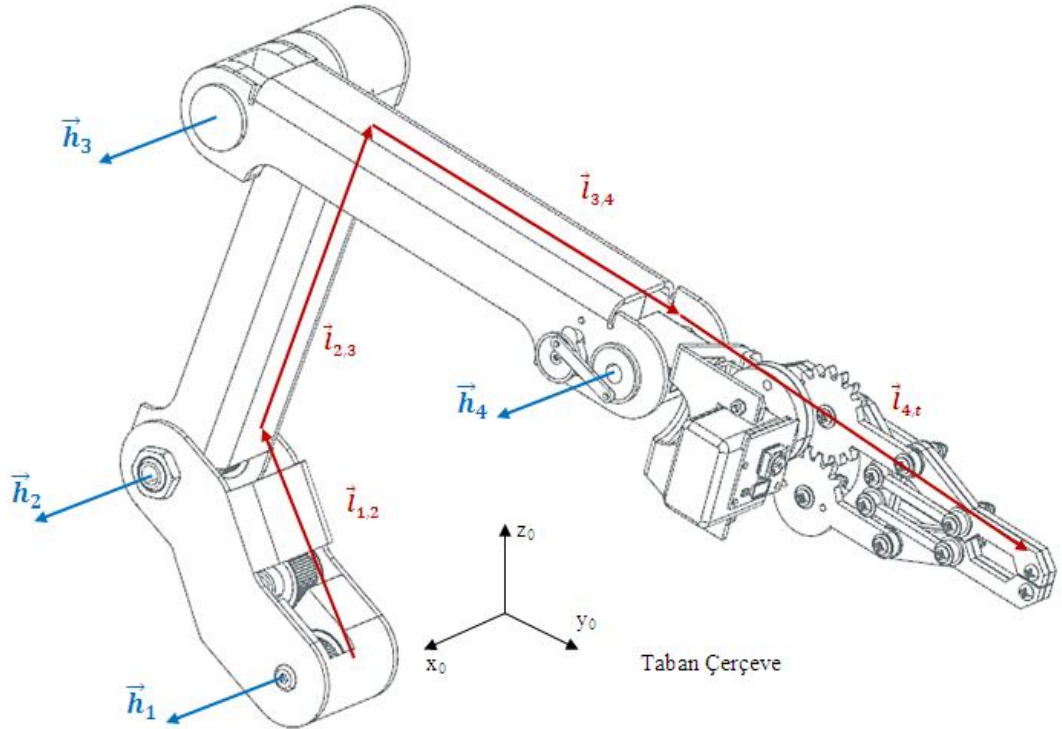
$$q = [0 \quad \pi \quad 0 \quad \pi]^T \quad (4.33)$$

ile ifade edilirse her bir eklem için eksen takımları başlangıç durumunda Şekil 4.8'deki gibi yerleştirilebilir.



Şekil 4.8: Başlangıç durumunda manipülatör üzerindeki eksen takımları

Manipülatörün belirli bir t anındaki uzuv ve dönme vektörleri, rahatça görülebilmesi açısından Şekil 4.9'daki gibi bir konfigürasyonda yerleştirilebilir. Lakin kinematik model oluşturulurken başlangıç durumundaki konfigürasyonda tanımlanan uzuv ve dönme vektörlerinden elde edilen ifadeler yardımıyla kinematik modele ulaşılacaktır.



Şekil 4.9: Manipülatör ait dönme ve uzuv vektörleri

$$\left. \begin{aligned} \vec{h}_1 = \vec{x}_1 &\Rightarrow \vec{\vec{H}}_1 = \begin{bmatrix} \vec{h}_1 \\ \vec{0} \end{bmatrix} \\ \vec{h}_2 = \vec{x}_2 &\Rightarrow \vec{\vec{H}}_2 = \begin{bmatrix} \vec{h}_2 \\ \vec{0} \end{bmatrix} \\ \vec{h}_3 = \vec{x}_3 &\Rightarrow \vec{\vec{H}}_3 = \begin{bmatrix} \vec{h}_3 \\ \vec{0} \end{bmatrix} \\ \vec{h}_4 = \vec{x}_4 &\Rightarrow \vec{\vec{H}}_4 = \begin{bmatrix} \vec{h}_4 \\ \vec{0} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \vec{\vec{H}}_1 = \vec{\vec{H}}_2 = \vec{\vec{H}}_3 = \vec{\vec{H}}_4 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$
[illegible]

l_1, l_2, l_3 ve l_4 manipülatör kol uzunlukları için uzuv vektörleri , çarpımsal simetrik matrisler ve yayılım matrislerine ait ifadeler sırasıyla 4.35,4.36,4.37 ve 4.38 denklemlerinde verildiği gibi olmaktadır.

$$\vec{l}_{1,2} = -l_1 \cdot \vec{y}_1 \Rightarrow \hat{l}_{1,2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -l_1 \\ 0 & 0 & 0 \\ l_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \phi_{2,1} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ -\hat{l}_{1,2} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.35)$$

$$\vec{l}_{2,3} = -l_2 \cdot \vec{y}_2 \Rightarrow \hat{l}_{2,3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -l_2 \\ 0 & 0 & 0 \\ l_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \phi_{3,2} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ -\hat{l}_{2,3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -L_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.36)$$

$$\vec{l}_{3,4} = l_3 \cdot \vec{y}_3 \Rightarrow \hat{l}_{3,4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -l_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \phi_{4,3} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ -\hat{l}_{3,4} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -l_3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ l_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.37)$$

$$\vec{l}_{4,t} = l_4 \cdot \vec{y}_4 \Rightarrow \hat{l}_{4,t} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 \\ -l_4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \phi_{t,4} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ -\hat{l}_{4,t} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ L_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.38)$$

Manipülatöre ait Jacobien,

$$J = \underset{\sim}{\phi}_t \underset{\sim}{\phi} \underset{\sim}{H} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_3 - L_2 - L_1 - L_4 & L_3 - L_2 + L_4 & L_3 + L_4 & L_4 \end{pmatrix} \quad (4.45)$$

olarak hesaplanır. Bu ifadelerin birleştirilmesi ile manipülatöre ait ileri ve ters kinematik denklem sırasıyla,

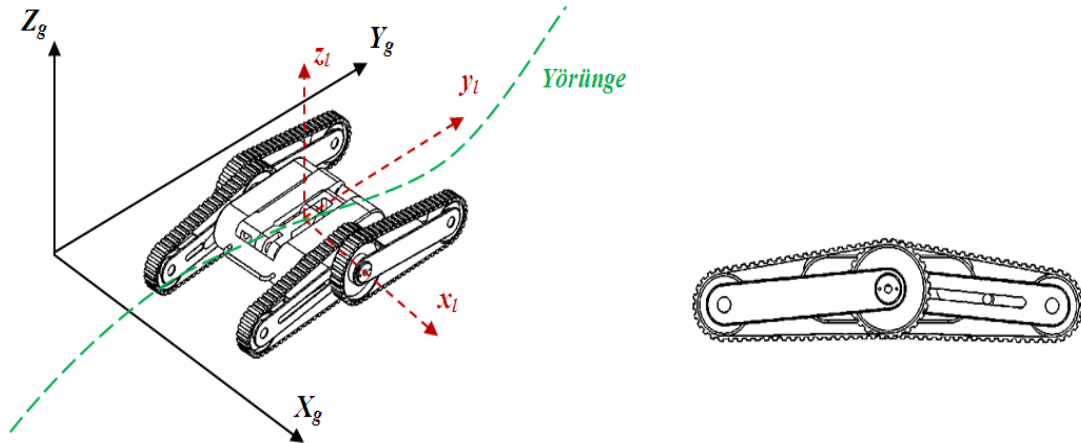
$$\underset{\sim}{V}_t = \begin{bmatrix} \vec{w}_t \\ \vec{v}_t \end{bmatrix}_{6 \times 1} = J \cdot \underset{\sim}{\dot{\theta}} = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ L_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) - \dot{\theta}_1 (L_1 + L_2 - L_3) + \dot{\theta}_3 L_3 - \dot{\theta}_2 (L_2 - L_3) \end{pmatrix} \quad (4.46)$$

$$\underset{\sim}{\dot{\theta}} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = J^\# \cdot \underset{\sim}{V}_t = [(J^T J)^{-1} J^T] \cdot \begin{bmatrix} \vec{w}_t \\ \vec{v}_t \end{bmatrix}_{6 \times 1} = [\dots]_{4 \times 6} \cdot \begin{bmatrix} \vec{w}_t \\ \vec{v}_t \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (4.47)$$

bulunur.

4.1.3 Mobil platform kinematik modeli

Bu alt bölümde mobil robotun kinematik modeline ilişkin açıklamalar ve Şekil 4.10'da verilmekte olan mobil platformun paletli kipteki düzlemsel hareketi için uzaysal operatör cebri ile basitleştirilmiş kinematik analizi yapılacaktır.



Şekil 4.10: Mobil platformun paletli kipteki hareketi

Kinematik model,

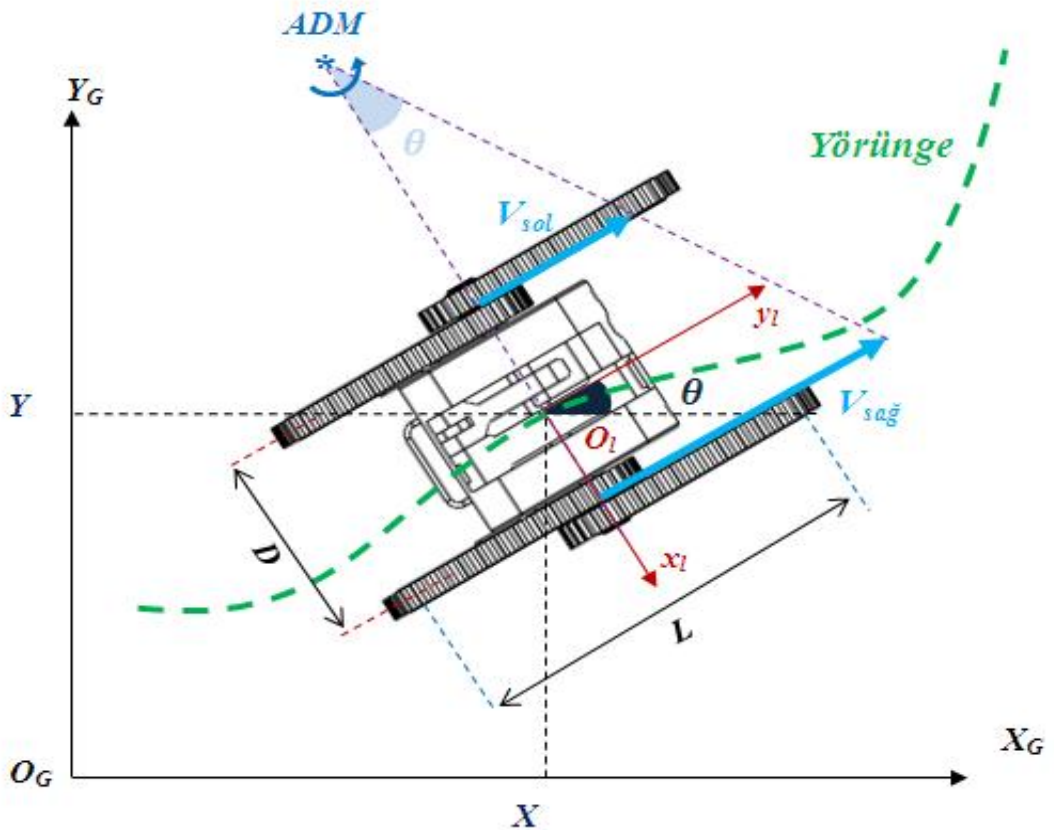
- Mobil platform anlık olarak bir dönme merkezi etrafında düşük hızda düzlemsel hareket yapmakta,
- Paletler yer düzlemi ile daima temas etmekte,
- Mobil platformun rijit parçalardan oluşmakta,

- iv. Paletlerin kaymadan ötelenmekte,
- v. Mobil platformun sivrulmadan hareket etmekte,

olduğu varsayımlarına dayanılarak çıkarılacaktır. Bu varsayımlar altında iki dc motordan tahrik edilen diferansiyel sürürlü mobil platformun kinematik modeli, aracın geometrik merkezi ile çakışık kütle merkezine atanmış $O_I\{x_I, y_I\}$ yerel eksen takımında (hareketli çerçeve) tanımlı çizgisel ve açısal hız vektörleri ve aracın duruşunu (postür) $O_G\{X_G, Y_G\}$ genel eksen takımında (eylemsiz çerçeve) sunan genel konum, X, Y ve yönelim θ değişkenleri ile ifade edilmektedir (bkz. Şekil 4.11). Mobil robotun genel eksen takımında (eylemsiz çerçeve, taban çerçeve) duruşu,

$$q = [X \ Y \ \theta]^T \in R^3 \quad (4.47)$$

yapılandırma (konfigürasyon) vektörü ile verilmekte olup, konfigürasyon vektörüne aynı zamanda aracın pozu da denilmektedir.



Şekil 4.11: Mobil platformun düzlemsel hareketteki kinematik modeli

Mobil robotun kütle merkezine yerleştirilen yerel eksen takımındaki hız vektörlerinin genel eksen takımına göre ifadesi iki eksen takımı arasındaki geçişi sağlamakta kullanılan dönüşüm matrisi (rotasyon) ile sağlamaktadır. Yani, hareketli çerçevedeki çizgisel ve açısal hızların taban çerçeveye göre iz düşürülmektedir.

Buna göre iki eksen takımı arasındaki hız ilişkisi,

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = R(\theta) \cdot \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

şeklinde olup bu ifadedeki yerel eksen takımında tanımlı çizgisel ve açısal hız vektörleri ise bilinen tahrik motor devirlerine ve yapılan varsayımlara göre sırasıyla,

$$\left. \begin{array}{l} V_L = r \cdot w_L \\ V_R = r \cdot w_R \end{array} \right\} \begin{array}{l} V = V_y = \frac{V_L + V_R}{2} = r \cdot \frac{w_L + w_R}{2} \\ V_x = 0 \end{array} \quad (4.49)$$

$$\left. \begin{array}{l} \theta = \tan^{-1} \frac{\Delta V \cdot t}{D} = \tan^{-1} \frac{(V_R - V_L) \cdot t}{D} \\ \Rightarrow w = \frac{d}{dt} \theta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \{ \tan^{-1} \frac{\Delta V \cdot t}{D} \} \end{array} \right\} w = \frac{\Delta V}{D} = r \cdot \frac{w_R - w_L}{2D} \quad (4.51)$$

denklemleriyle açıklanabilir. Lakin paletlerde boylamsal kayma olursa yani ötelenmeleri esnasında kayma olursa hız ifadelerine boylamsal kayma yüzdelerinin eklenmesi ile,

$$\left. \begin{array}{l} V_L = r \cdot w_L (1 - i_L) \\ V_R = r \cdot w_R (1 - i_R) \end{array} \right\} \begin{array}{l} V_y = \frac{V_L + V_R}{2} = r \cdot \frac{w_L(1 - i_L) + w_R(1 - i_R)}{2} \\ V_x = 0 \end{array} \quad (4.52)$$

$$\left. \begin{array}{l} V_L = r \cdot w_L (1 - i_L) \\ V_R = r \cdot w_R (1 - i_R) \end{array} \right\} V_x = 0 \quad (4.53)$$

$$w = \frac{\Delta V}{D} = r \cdot \frac{w_R(1 - i_R) - w_L(1 - i_L)}{D} \quad (4.54)$$

denklemleri elde edilir. Denklemler, paletleri tahrik eden dişlinin nominal yarıçapı r , sol ve sağ tahrik motorların açısal hızları w_L ve w_R , sol ve sağ paletlerin çizgisel hızları v_L ve v_R olmak üzere türetilmiştir. Burada kayma yüzdesi i 'ye ilişkin açıklamalar kinetik modelleme bölümünde açıklanacaktır. Anlatılanlara ilave olarak mobil platform anlık olarak bir dönme merkezi etrafında yüksek hızda düzlemsel hareket etmesi – dönüş yapması – Θ dönme açısına ilave olarak anlık dönme merkezi etrafında fazladan α kadarlık dönmeye, diğer bir ifadeyle kaymaya neden olur. Lakin mobil platform düşük hızlarda seyrettiğinden ötürü sıfıra eşit olacağından hız ifadeleri etkilenmeyecektir.

Denklem (4.42)'deki hız ifadelerini açık şekilde aşağıdaki gibi yazacak olursak hız vektörünün robota göre yanal yöndeki bileşenin sıfır olmasından kaynaklanan,

$$\left. \begin{array}{l} \dot{X} = \cos\theta \cdot v \quad x \sin\theta \rightarrow \dot{X} \cdot \sin\theta = \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot v \\ \dot{Y} = \sin\theta \cdot v \quad x \cos\theta \rightarrow \dot{Y} \cdot \cos\theta = \sin\theta \cdot \cos\theta \cdot v \end{array} \right\} \dot{X} \cdot \sin\theta - \dot{Y} \cos\theta = 0 \quad (4.55)$$

denklem 4.55'deki gibi bir holonomik olmayan kısıt ifadesi bulunur. Matris formunda,

$$[\sin\theta \quad -\cos\theta] \cdot \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow A(q) \cdot \dot{q} = 0 \quad (4.56)$$

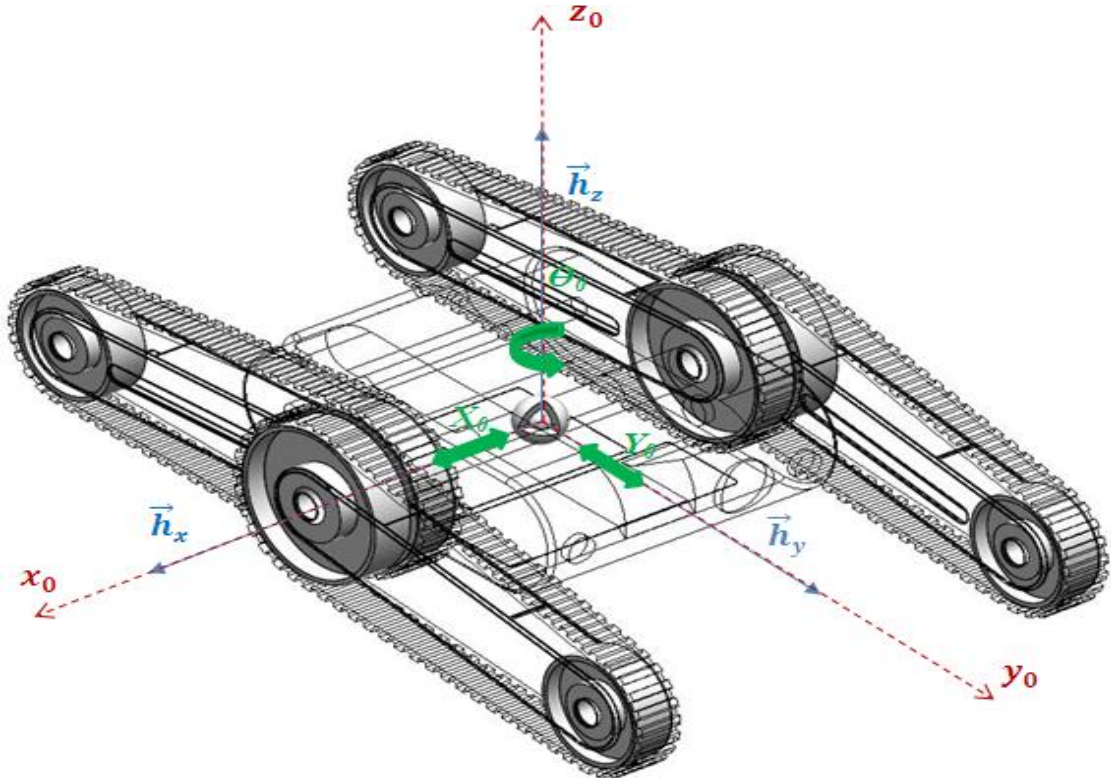
yazılabilir. Buna göre diferansiyel sürürlü araç için kısıt matrisi,

$$A(q) = [-\sin\theta \quad \cos\theta \quad 0] \quad (4.57)$$

şeklindedir. Yapılan kabullere ve (4.46),(4.48) denklemlerine göre mobil platform için hız ifadeleri tahrik motorlarının açısal hızlarına göre denklem (4.52)'deki gibi yazılabilir,

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \cdot \frac{w_L + w_R}{2} \\ r \cdot \frac{w_R - w_L}{2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cdot \cos\theta & \frac{r}{2} \cdot \cos\theta \\ \frac{r}{2} \cdot \sin\theta & -\frac{r}{2} \cdot \sin\theta \\ \frac{r}{2D} & -\frac{r}{2D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_R \\ w_L \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

Genel eksen takımında konumu X,Y ve yönelimi θ değişkenleri ile ifade edilen mobil platformun mobil manipülatör robot sistemi içinde sıfırıncı eklemini olmasından ötürü, bu değişkenler sıfır indis alarak uzaysal hız vektöründe ifade edilmiştir. Mobil robotun uzaysal bir çalışma ortamında düzlemsel hareketi basitleştirilmiş olarak prizmatik ve dönel eklemlerle modellenecek olursa kinematik modeli uzaysal operatör cebriyle göre manipülatör bölümündeki adımlar takip edilerek ulaşılabilir.



Şekil 4.12: Platformun dönme ve öteleme vektörleri ile prizmatik ve dönel eklemler

Bunun için öncelikle Şekil 4.12'deki mobil platform üzerine eksen takımının ve bu eksen takımındaki dönme ile uzuv vektörlerinin tanımlanması gereklidir. Sonrasında ise yayılım ve uzaysal dönme matrisleri oluşturularak mobil platforma ait uzaysal hız ifadesi elde edilecektir. Kütle merkezine yerleştirilen yerel eksen takımına göre mobil platformun eklemlerine ait dönme vektörleri,

$$\left. \begin{aligned} \vec{h}_x = \vec{x}_0 \Rightarrow \vec{H}_1 &= \begin{bmatrix} \vec{0} \\ \vec{h}_x \end{bmatrix} \\ \vec{h}_y = \vec{y}_0 \Rightarrow \vec{H}_2 &= \begin{bmatrix} \vec{0} \\ \vec{h}_y \end{bmatrix} \\ \vec{h}_z = \vec{z}_0 \Rightarrow \vec{H}_3 &= \begin{bmatrix} \vec{h}_z \\ \vec{0} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \vec{H}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{H}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{H}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

Uzaysal dönme matrisi,

$$H_{\sim 6 \times 3} = [\vec{H}_1 \quad \vec{H}_2 \quad \vec{H}_3] = \begin{bmatrix} \vec{0} & \vec{0} & \vec{h}_z \\ \vec{h}_x & \vec{h}_y & \vec{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

Mobil platformun eklemleri arasındaki uzuv vektörleri -büyüklükleri sıfırdır-, çarpımsal simetrik matrisler ve yayılım matrisleri,

$$\vec{l}_{0,0} = \vec{0} \Rightarrow \hat{l}_{0,0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \phi_{0,0} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ -\hat{l}_{0,0} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = I_{6 \times 6} \quad (4.61)$$

Mobil platforma ait Jacobien,

$$J = \phi_{\sim 6 \times 6} \cdot H_{\sim 6 \times 3} = I_{6 \times 6} \cdot H_{\sim 6 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.62)$$

Mobil platforma ait ileri kinematik denklem,

$$\vec{V}_m = \begin{bmatrix} \vec{w}_m \\ \vec{v}_m \end{bmatrix} = J \cdot \dot{\theta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \\ \dot{\theta}_0 \end{bmatrix} = [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_0 \quad \dot{x}_0 \quad \dot{y}_0 \quad 0]^T \quad (4.63)$$

Mobil platforma ait ters kinematik denklem,

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \\ \dot{\theta}_0 \end{bmatrix} = J^\# \cdot \vec{V}_m = [J^T (J J^T)^{-1}] \cdot \begin{bmatrix} \vec{w}_m \\ \vec{v}_m \end{bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 6} \cdot \begin{bmatrix} \vec{w}_m \\ \vec{v}_m \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (4.64)$$

(4.58) ile (4.42),(4.43),(4.45) denklemlerinin birleşimi ile sıfıncı eklem mobil platformdaki hız ifadesi,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \\ \dot{\theta}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \frac{w_L + w_R}{2} \cdot \cos \theta_0 \\ r \cdot \frac{w_L + w_R}{2} \cdot \sin \theta_0 \\ r \cdot \frac{w_R - w_L}{2D} \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

4.1.4 Mobil manipülatör kinematik modeli

Manipülâtör ve mobil platform için bulunan kinematik modeller aralarındaki uzuv vektörü $\vec{l}_{0,1}$ kullanılarak elde edilen yayılım matrisi aracılığıyla birleştirilecek olursa mobil manipülâtöre ait kinematik model elde edilir. Buna göre mobil platformdan manipülâtörün uç noktası t'ye kinematik modele ilişkin denklemler,

$$\vec{\vec{V}}_t = \begin{bmatrix} \vec{w}_t \\ \vec{v}_t \end{bmatrix}_{6 \times 1} = J \cdot \underset{\sim}{\theta} + \phi_{t,m} \cdot \vec{\vec{V}}_m \quad (4.66)$$

ile ifade edilir.

Buradaki platform ile manipülatör arasındaki $\vec{l}_{0,1}$ uzuv vektörü ve $\emptyset_{1,0}$ yayılım matrisi,

$$\vec{l}_{0,1} = a. \vec{x}_0 + b. \vec{y}_0 + c. \vec{z}_0 \Rightarrow \hat{l}_{0,1} = \begin{bmatrix} 0 & -c & b \\ c & 0 & -a \\ -b & a & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (4.67)$$

$$\Rightarrow \emptyset_{1,0} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ -\hat{l}_{0,1} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (4.68)$$

[illegible]

olarak elde edilir. Mobil platform ile manipülatörün ilk eklemi arasındaki geçiş matrisi ϕ_m 'den faydalanarak platform ile uç noktası t arasındaki yayılım matrisi,

$$\phi_{t,m} = \phi_t \underset{\sim 6 \times 24}{\cdot} \phi \underset{\sim 24 \times 24}{\cdot} \phi_m \underset{\sim 24 \times 6}{\cdot} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 4 & 0 & c \\ 0 & 0 & 0 & -c & 0 & a \\ 1 & 4 & 0 & 0 & b & -a \end{pmatrix} \quad (4.70)$$

bulunur. Elde edilen ifadeler ile önceki bölümlerden bulunan denklemler, kinematik modele ait (4.57) nolu denklem ile birleştirilirse mobil platformdan uc noktası t'ye kadar kadar uzanan hareketin ileri kinematik denklemi,

$$\vec{V}_t = \begin{bmatrix} \vec{w}_t \\ \vec{v}_t \end{bmatrix}_{6 \times 1} = J \cdot \dot{\theta} + \phi_{t,m} \cdot \vec{V}_m = \begin{pmatrix} \theta'_1 + \theta'_2 + \theta'_3 + \theta'_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ L_4 (\theta'_1 + \theta'_2 + \theta'_3 + \theta'_4) - \theta'_1 (L_1 + L_2 - L_3) + \theta'_3 L_3 - \theta'_2 (L_2 - L_3) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \theta_c \\ c y_c - \theta_c L_4 \\ -c x_c \\ \delta x_c - a y_c \end{pmatrix} \quad (4.71)$$

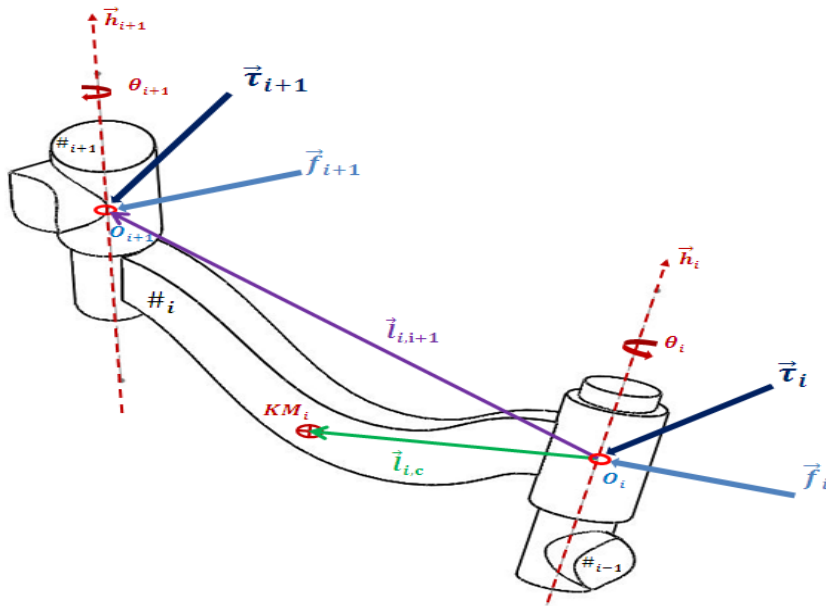
olarak bulunur. Bu denklemin (4.59) nolu denklem ile birleştirilmesi neticesinde motor hızlarına göre uç noktasının hızı elde edilir.

4.2 Mobil Manipülâtörün Kinetik Modellenmesi

Bu alt bölüme, robotun kinetik modelinin çıkarılması ile devam edilecektir. Lakin önceki kısımda kinematik modeli ifade etmekte kullanılan uzaysal operatör cebrinin kinetik model için de çıkarılması gerekmektedir. Öncelikle uzaysal operatör cebri, kinetik modelleme için inşa edilecek sonrasında da manipülâtör ve mobil platform üzerinde uygulanacaktır. Manipülâtör ve platform için bulunan ifadelerin birleştirilmesiyle de robota ilişkin kinetik model uzaysal operatör cebri ile bulunmuş olacaktır.

4.2.1 Manipülâtör kinetik modeli

Şekil 4.6'daki açık zincirli seri manipülâtörün herhangi bir i .uzvunun üzerine etkiyen kuvvetleri Şekil 4.13'teki gibi yazabiliriz. Bu kuvvetleri doğuran ivmeleri bulabilmek için uzva ait hareket denklemlerinin yazılarak irdelenmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle kinematik ifadeleri tekrar hatırlatmakta fayda vardır. Çünkü buradan kinetik ifadelere geçilecek, modeli açıklayan denklemler doğrulacaktır.



Şekil 4.13 : i. uzuva etkiyen kuvvetler

Hatırlanacak olursa herhangi bir i . uzvun eklemi üzerindeki kinematik ifadeler,

$$\vec{w}_i = \vec{w}_{i-1} + \vec{h}_i \cdot \dot{\theta}_i \quad (4.72)$$

$$\vec{v}_i = \vec{v}_{i-1} + \vec{w}_{i-1} \times \vec{l}_{i-1,i} \quad (4.73)$$

denklemleriyle açıklanmaktaydı. Bu ifadelerin zamana göre türevlendirilmesiyle elde edilecek kinetik ifadeler,

$$\dot{\vec{w}}_i = \dot{\vec{w}}_{i-1} + \vec{h}_i \cdot \ddot{\theta}_i + \vec{w}_i \times \vec{h}_i \cdot \dot{\theta}_i \quad (4.74)$$

$$\begin{aligned} &= \dot{\vec{w}}_{i-1} + \vec{h}_i \cdot \ddot{\theta}_i + \vec{w}_i \times (\vec{w}_i - \vec{w}_{i-1}) \\ &= \dot{\vec{w}}_{i-1} + \vec{h}_i \cdot \ddot{\theta}_i + \vec{w}_{i-1} \times \vec{w}_i \\ \dot{\vec{v}}_i &= \dot{\vec{v}}_{i-1} + \dot{\vec{w}}_{i-1} \times \vec{l}_{i-1,i} + \vec{w}_{i-1} \times (\dot{\vec{w}}_{i-1} \times \vec{l}_{i-1,i}) \\ &= \dot{\vec{v}}_{i-1} - \vec{l}_{i-1,i} \times \dot{\vec{w}}_{i-1} + \vec{w}_{i-1} \times (\vec{w}_{i-1} \times \vec{l}_{i-1,i}) \end{aligned} \quad (4.75)$$

denklemleriyle yazılabilir. Bu ifadelerin matris formunda yazılmasıyla i . uzvun uzaysal ivme denklemi,

$$\begin{bmatrix} \dot{\vec{w}}_i \\ \dot{\vec{v}}_i \end{bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ -\vec{l}_{i-1,i} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\vec{w}}_{i-1} \\ \dot{\vec{v}}_{i-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{h}_i \\ \vec{0} \end{bmatrix} \cdot \ddot{\theta}_i + \begin{bmatrix} \vec{w}_{i-1} \times \vec{w}_i \\ \vec{w}_{i-1} \times (\vec{w}_{i-1} \times \vec{l}_{i-1,i}) \end{bmatrix} \quad (4.76)$$

şeklinde. Bu ifadeyi kapalı biçimde,

$$\dot{\vec{V}}_i = \phi_{i,i-1} \cdot \dot{\vec{V}}_{i-1} + \vec{H}_i \cdot \ddot{\theta}_i + \vec{a}_i \quad (4.77)$$

yazılabilir. Burada $\vec{a}_i$ uzuvların birbirine göre hareketinden kaynaklanan uzaysal bias ivmesidir. (4.70) nolu denklemde sadece i . uzuv için bulunan uzaysal ivme, n uzuvdan oluşan sabit platformlu Şekil 4.6'daki gibi açık zincirli manipülatörün her uzvu için yazılırsa;

$$\begin{aligned} \dot{\vec{V}}_0 &= 0 \\ \dot{\vec{V}}_1 &= \phi_{1,0} \cdot \dot{\vec{V}}_0 + \vec{H}_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + \vec{a}_1 \\ \dot{\vec{V}}_2 &= \phi_{2,1} \cdot \dot{\vec{V}}_1 + \vec{H}_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + \vec{a}_2 \\ \dot{\vec{V}}_3 &= \phi_{3,2} \cdot \dot{\vec{V}}_2 + \vec{H}_3 \cdot \ddot{\theta}_3 + \vec{a}_3 \\ &\dots \\ \dot{\vec{V}}_{n-1} &= \phi_{n-1,n-2} \cdot \dot{\vec{V}}_{n-2} + \vec{H}_{n-1} \cdot \ddot{\theta}_{n-1} + \vec{a}_{n-1} \\ \dot{\vec{V}}_n &= \phi_{n,n-1} \cdot \dot{\vec{V}}_{n-1} + \vec{H}_n \cdot \ddot{\theta}_n + \vec{a}_n \end{aligned} \quad (4.78)$$

denklem takımı elde edilir.

Bu denklemler, matris formunda yazılacak olursa,

$$\begin{bmatrix} \dot{\vec{V}}_1 \\ \dot{\vec{V}}_2 \\ \dot{\vec{V}}_3 \\ \vdots \\ \dot{\vec{V}}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & \dots \\ \emptyset_{2,1} & I & 0 & \dots \\ \emptyset_{3,1} & \emptyset_{3,2} & I & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \emptyset_{n,1} & \emptyset_{n,2} & \emptyset_{n,3} & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \vec{H}_1 & \vec{0} & \dots & \vec{0} \\ \vec{0} & \vec{H}_2 & \dots & \vec{0} \\ \vec{0} & \vec{H}_3 & \dots & \vec{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vec{0} & \vec{0} & \dots & \vec{H}_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \vdots \\ \ddot{\theta}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{a}_1 \\ \vec{a}_2 \\ \vec{a}_3 \\ \vdots \\ \vec{a}_n \end{bmatrix} \right\} \quad (4.79)$$

matrisi elde edilir. Elde edilen ifade genişletilmiş uzaysal hız, yayılım, dönme ve eklem hız matrislerini temsil edecek şekilde,

$$\dot{\vec{V}}_{\sim 6n \times 1} = \phi_{\sim 6n \times 6n} \{ H_{\sim 6n \times n} \cdot \ddot{\theta}_{\sim n \times 1} + a_{\sim 6n \times 1} \} \quad (4.80)$$

yazılabilir. Böylece, uzaysal ivme ifadelerinin elde edilmesi ile uzaysal kuvvet vektörünün uzaysal ivmeleri bulunmuştur. Benzer adımlar takip edilerek önce Şekil 4.13'deki i . uzuv sonrasında da Şekil 4.6'daki n uzuvdan oluşan seri manipülatörün üzerine etkiyen uzaysal kuvvet vektörüne ait ifadeler çıkarılacaktır. Buna göre, herhangi bir i . uzvun eklemi üzerindeki öteleme ve dönme hareketi,

$$(*) \vec{\tau}_i = \vec{\tau}_{i+1} + \vec{l}_{i,i+1} \times \vec{f}_{i+1} + \vec{l}_{i,c} \times \dot{\vec{v}}_i \cdot m_i + \frac{d}{dt} \{ \mathfrak{T}_i \cdot \vec{w}_i \} \quad (4.81)$$

$$= \vec{\tau}_{i+1} - \hat{l}_{i,i+1} \cdot \vec{f}_{i+1} + m_i \cdot \hat{l}_{i,c} \cdot \dot{\vec{v}}_i + \vec{w}_i \times \mathfrak{T}_i \cdot \vec{w}_i$$

$$(-\hat{l}_{i,i+1} = \vec{l}_{i,i+1}^T \text{ Çarpımsal Simetri Özelliği })$$

$$= \vec{\tau}_{i+1} + \vec{l}_{i,i+1}^T \cdot \vec{f}_{i+1} + m_i \cdot \hat{l}_{i,c} \cdot \dot{\vec{v}}_i + \vec{w}_i \times \mathfrak{T}_i \cdot \vec{w}_i$$

$$(*) \vec{f}_i = \vec{f}_{i+1} + m_i \cdot \frac{d}{dt} \{ \vec{v}_i + \vec{w}_i \times \vec{l}_{i,c} \} \quad (4.82)$$

$$= \vec{f}_{i+1} + m_i \cdot \dot{\vec{v}}_i + m_i \cdot \frac{d}{dt} \{ -\hat{l}_{i,c} \cdot \vec{w}_i \}$$

$$= \vec{f}_{i+1} + m_i \cdot \dot{\vec{v}}_i + m_i \cdot \left\{ -\hat{l}_{i,c} \dot{\vec{w}}_i + \frac{d}{dt} \{ -\hat{l}_{i,c} \cdot \vec{w}_i \} \right\}$$

$$= \vec{f}_{i+1} + m_i \cdot \dot{\vec{v}}_i + m_i \cdot \left\{ -\hat{l}_{i,c} \dot{\vec{w}}_i + \frac{d}{dt} \{ \vec{w}_i \times \vec{l}_{i,c} \} \right\}$$

$$= \vec{f}_{i+1} + m_i \cdot \dot{\vec{v}}_i + m_i \cdot \{ -\hat{l}_{i,c} \dot{\vec{w}}_i + \vec{w}_i \times (\vec{w}_i \times \vec{l}_{i,c}) \}$$

denklemleriyle açıklanabilir (bkz. Şekil 4.13).

Denklemleri matris biçiminde yazacak olursak,

$$\begin{bmatrix} \vec{\tau}_i \\ \vec{f}_i \end{bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & \hat{l}_{i,i+1} \\ O_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{\tau}_{i+1} \\ \vec{f}_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathfrak{T}_i & m_i \cdot \hat{l}_{i,c} \\ -m_i \cdot \hat{l}_{i,c} & I_{3 \times 3} \cdot m_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\vec{w}}_i \\ \dot{\vec{v}}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{w}_i \times \mathfrak{T}_i \vec{w}_i \\ m_i \cdot \vec{w}_i \times (\vec{w}_i \times \vec{l}_{i,c}) \end{bmatrix} \quad (4.83)$$

ifadesi elde edilir. Elde edilen ifade uzaysal kuvvet, yayılım, kütle, eklem ivme ve uzaysal uzuv artık matrislerini temsil edecek şekilde,

$$\vec{F}_i = \phi^T_{i+1,i} \cdot \vec{F}_{i+1} + M_i \cdot \ddot{\vec{V}}_i + \vec{b}_i \quad (4.84)$$

olarak yazılır. Sadece i. uzuv için bulunan uzaysal kuvvet, n uzuvdan oluşan sabit platformlu Şekil 4.6'daki gibi açık zincirli manipülatörün her uzvu için yazılırsa;

$$\begin{aligned} \vec{F}_1 &= \phi^T_{2,1} \cdot \vec{F}_2 + M_1 \cdot \ddot{\vec{V}}_1 + \vec{b}_1 \\ \vec{F}_2 &= \phi^T_{3,2} \cdot \vec{F}_3 + M_2 \cdot \ddot{\vec{V}}_2 + \vec{b}_2 \\ \vec{F}_3 &= \phi^T_{4,3} \cdot \vec{F}_4 + M_3 \cdot \ddot{\vec{V}}_3 + \vec{b}_3 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \vec{F}_{n-1} &= \phi^T_{n,n-1} \cdot \vec{F}_n + M_{n-1} \cdot \ddot{\vec{V}}_{n-1} + \vec{b}_{n-1} \\ \vec{F}_n &= \phi^T_{t,n} \cdot \vec{F}_t + M_n \cdot \ddot{\vec{V}}_n + \vec{b}_n \end{aligned} \quad (4.85)$$

denklem takımı elde edilir. Burada $\vec{F}_t$ kuvveti uç noktasına tatbik edilen kuvvet, ϕ^T_t ise uç noktası ile n. eklem arasındaki yayılım matrisidir. Bu denklemler, matris formunda yazılacak olursa,

$$\begin{bmatrix} \vec{F}_1 \\ \vec{F}_2 \\ \vec{F}_3 \\ \vdots \\ \vec{F}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \phi_{2,1} & I & 0 & \dots & 0 \\ \phi_{3,1} & \phi_{3,2} & I & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \phi_{n,1} & \phi_{n,2} & \phi_{n,3} & \dots & I \end{bmatrix}^T \left\{ \begin{bmatrix} M_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & M_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\vec{V}}_1 \\ \ddot{\vec{V}}_2 \\ \ddot{\vec{V}}_3 \\ \vdots \\ \ddot{\vec{V}}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{b}_1 \\ \vec{b}_2 \\ \vec{b}_3 \\ \vdots \\ \vec{b}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} \\ 0_{6 \times 6} \\ 0_{6 \times 6} \\ \vdots \\ \phi_{t,n} \end{bmatrix} \vec{F}_t \right\} \quad (4.86)$$

matrisi elde edilir. Elde edilen ifade genişletilmiş uzaysal kuvvet, yayılım, kütle, eklem ivme ve uzaysal uzuv artık matrislerini temsil edecek şekilde,

$$\vec{F}_{\sim 6 \times 1} = \phi^T_{\sim 6 \times 6n} \{ M_{\sim 6 \times 6n} \cdot \dot{\vec{V}}_{\sim 6 \times 1} + \vec{b}_{\sim 6 \times 1} + \phi_t^T_{\sim 6 \times 6} \cdot \vec{F}_t \}_{6 \times 1} \quad (4.87)$$

yazılır. Bu ifadede uzaysal ivme matrisi,

$$\ddot{\tilde{\mathbf{V}}} = \phi \{ H \cdot \ddot{\tilde{\theta}} + \tilde{\mathbf{a}} \} \quad (4.88)$$

denklem (4.80)'de yerine konulursa,

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{F}} &= \phi^T \{ M \cdot \phi \{ H \cdot \ddot{\tilde{\theta}} + \tilde{\mathbf{a}} \} + \tilde{\mathbf{b}} + \phi_t^T \cdot \ddot{\tilde{\mathbf{F}}}_t \} \\ &= \phi^T \cdot M \cdot \phi \cdot H \cdot \ddot{\tilde{\theta}} + \phi^T \cdot M \cdot \phi \cdot \tilde{\mathbf{a}} + \phi^T \cdot \tilde{\mathbf{b}} + \phi^T \cdot \phi_t^T \cdot \ddot{\tilde{\mathbf{F}}}_t \end{aligned} \quad (4.89)$$

olur. Bulunan ifadeden eklemlere uygulanan tork ifadesini elde etmek için uzaysal dönme matrisinin transpozunu ile skaler çarpılarak eklem eksenlerine uygulanan uzaysal kuvvet iz düşürülerek uzaysal tork matrisi elde edilir. Bu işlemin matematiksel ifadesi,

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = H^T \cdot \tilde{\mathbf{F}} \quad (4.90)$$

ile yapılabilir. Denklem (4.81) ile (4.82) birleştirilirse,

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = H^T \cdot \phi^T \cdot M \cdot \phi \cdot H \cdot \ddot{\tilde{\theta}} + H^T \cdot \phi^T \cdot M \cdot \phi \cdot \tilde{\mathbf{a}} + H^T \cdot \phi^T \cdot \tilde{\mathbf{b}} + H^T \cdot \phi^T \cdot \phi_t^T \cdot \ddot{\tilde{\mathbf{F}}}_t \quad (4.91)$$

olur. Bulunan ifade bütünleşik olarak yazılacak olursa eklemlere uygulanan tork,

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = \mathcal{M} \cdot \ddot{\tilde{\theta}} + \tilde{\mathbf{C}} + \mathcal{J}^T \cdot \ddot{\tilde{\mathbf{F}}}_t \quad (4.92)$$

ile hesaplanır. Bu ifade aynı zamanda manipülatörün ileri kinetik denklemidir. Burada $\mathcal{M}$ genelleştirilmiş kütle matrisi, $\mathcal{J}$ jakobyen, $\mathbf{C}$ ise koriolis ve yerçekimi ivmesini içeren bias terimidir. Bunlara ait ifadeler,

$$\mathcal{M} = H^T \cdot \phi^T \cdot M \cdot \phi \cdot H \quad (4.93)$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = H^T \cdot \phi^T \cdot (M \cdot \phi \cdot \tilde{\mathbf{a}} + \tilde{\mathbf{b}}) \quad (4.94)$$

$$\mathcal{J}^T = H^T \cdot \phi^T \cdot \phi_t^T \Rightarrow \mathcal{J} = \phi_t \cdot \phi \cdot H \quad (4.95)$$

şeklinde yazılabilir. Manipülatörün ters kinetik denklemi ise,

$$\ddot{\tilde{\theta}} = \mathcal{M}^{-1} \cdot \{ \tilde{\boldsymbol{\tau}} - \tilde{\mathbf{C}} - \mathcal{J}^T \cdot \ddot{\tilde{\mathbf{F}}}_t \} \quad (4.96)$$

ifadesidir. Böylece, sabit platformlu seri manipülatörün kinetik modellenmesi için inşa edilen matematiksel alt yapı ile Şekil 4.7'de verilmekte olan mobil robotun üzerindeki manipülatöre ait kinetik model çıkarılmaya başlanabilir. Bunun için öncelikle ileri ve ters kinetik denklemlerdeki bilinmeyenlerin hesabı yapılmalıdır. Böylelikle istenilen sonuca ulaşmak için aşağıdaki adımlar takip edilerek bilinmeyenler hesaplanır.

Buna göre manipülatörün genelleştirilmiş kütle matrisi $\mathcal{M}$,

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \begin{bmatrix} \mathfrak{T}_1 & m_1 \cdot \hat{l}_{1,c} \\ -m_1 \cdot \hat{l}_{1,c} & I_{3 \times 3} \cdot m_1 \end{bmatrix} \\ M_2 &= \begin{bmatrix} \mathfrak{T}_2 & m_2 \cdot \hat{l}_{2,c} \\ -m_2 \cdot \hat{l}_{2,c} & I_{3 \times 3} \cdot m_2 \end{bmatrix} \\ M_3 &= \begin{bmatrix} \mathfrak{T}_3 & m_3 \cdot \hat{l}_{3,c} \\ -m_3 \cdot \hat{l}_{3,c} & I_{3 \times 3} \cdot m_3 \end{bmatrix} \\ M_4 &= \begin{bmatrix} \mathfrak{T}_4 & m_4 \cdot \hat{l}_{4,c} \\ -m_4 \cdot \hat{l}_{4,c} & I_{3 \times 3} \cdot m_4 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_4 \end{bmatrix} \quad (4.97)$$

$$\mathcal{M} = \begin{bmatrix} \vec{\vec{H}}_1 & \vec{0} & \vec{0} & \vec{0} \\ \vec{0} & \vec{\vec{H}}_2 & \vec{0} & \vec{0} \\ \vec{0} & \vec{0} & \vec{\vec{H}}_3 & \vec{0} \\ \vec{0} & \vec{0} & \vec{0} & \vec{\vec{H}}_4 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \emptyset_{2,1} & I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \emptyset_{3,1} & \emptyset_{3,2} & I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \emptyset_{4,1} & \emptyset_{4,2} & \emptyset_{4,3} & I_{6 \times 6} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_4 \end{bmatrix} \dots \quad (4.98)$$

olarak bulunur. Jakobyen ifadesi modelleme bölümünde verilmekteydi, bias terimi

ise uzaysal bias ivmesi $\vec{\vec{a}}_i$ ile uzuv artık vektörleri $\vec{b}_i$ 'nin hesap edilmesiyle,

$$\begin{aligned} a_1 &= \begin{bmatrix} \vec{w}_0 \times \vec{w}_1 \\ \vec{w}_0 \times (\vec{w}_0 \times \vec{l}_{0,1}) \end{bmatrix} & b_1 &= \begin{bmatrix} \vec{w}_1 \times \mathfrak{T}_1 \vec{w}_1 \\ m_1 \cdot \vec{w}_1 \times (\vec{w}_1 \times \vec{l}_{1,c}) \end{bmatrix} \\ a_2 &= \begin{bmatrix} \vec{w}_1 \times \vec{w}_2 \\ \vec{w}_1 \times (\vec{w}_1 \times \vec{l}_{1,2}) \end{bmatrix} & b_2 &= \begin{bmatrix} \vec{w}_2 \times \mathfrak{T}_2 \vec{w}_2 \\ m_2 \cdot \vec{w}_2 \times (\vec{w}_2 \times \vec{l}_{2,c}) \end{bmatrix} \\ a_3 &= \begin{bmatrix} \vec{w}_2 \times \vec{w}_3 \\ \vec{w}_2 \times (\vec{w}_2 \times \vec{l}_{2,3}) \end{bmatrix} & b_3 &= \begin{bmatrix} \vec{w}_3 \times \mathfrak{T}_3 \vec{w}_3 \\ m_3 \cdot \vec{w}_3 \times (\vec{w}_3 \times \vec{l}_{3,c}) \end{bmatrix} \\ a_4 &= \begin{bmatrix} \vec{w}_3 \times \vec{w}_4 \\ \vec{w}_3 \times (\vec{w}_3 \times \vec{l}_{3,4}) \end{bmatrix} & b_4 &= \begin{bmatrix} \vec{w}_4 \times \mathfrak{T}_4 \vec{w}_4 \\ m_4 \cdot \vec{w}_4 \times (\vec{w}_4 \times \vec{l}_{4,c}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.99)$$

$$\begin{aligned}
\vec{C} = & \begin{bmatrix} \vec{H}_1 & \vec{0} & \vec{0} & \vec{0} \\ \vec{0} & \vec{H}_2 & \vec{0} & \vec{0} \\ \vec{0} & \vec{0} & \vec{H}_3 & \vec{0} \\ \vec{0} & \vec{0} & \vec{0} & \vec{H}_4 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \emptyset_{2,1} & I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \emptyset_{3,1} & \emptyset_{3,2} & I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \emptyset_{4,1} & \emptyset_{4,2} & \emptyset_{4,3} & I_{6 \times 6} \end{bmatrix}^T \dots \\
& \dots \left\{ \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \emptyset_{2,1} & I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \emptyset_{3,1} & \emptyset_{3,2} & I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \emptyset_{4,1} & \emptyset_{4,2} & \emptyset_{4,3} & I_{6 \times 6} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \vec{a}_1 \\ \vec{a}_2 \\ \vec{a}_3 \\ \vec{a}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{b}_1 \\ \vec{b}_2 \\ \vec{b}_3 \\ \vec{b}_4 \end{bmatrix} \right\} \\
& \quad \quad \quad (4.100)
\end{aligned}$$

bulunur. Hesaplanan ifadelerin, (4.84) ile (4.88) denklemlerinde yerine konmasıyla manipülatörün ileri ve ters kinetik denklemleri elde edilir. Manipülatörün kinetik modeline ilişkin hesapları tamamlamadan evvel bir hususa açıklık getirmek elzemdir. Manipülatörün uzuvlarına etkiyen yerçekimi ilk eklemin bias terimi üzerinden sisteme etkitilir. Böylece her uzuvda yerçekiminin etkisi gözlemlenir.

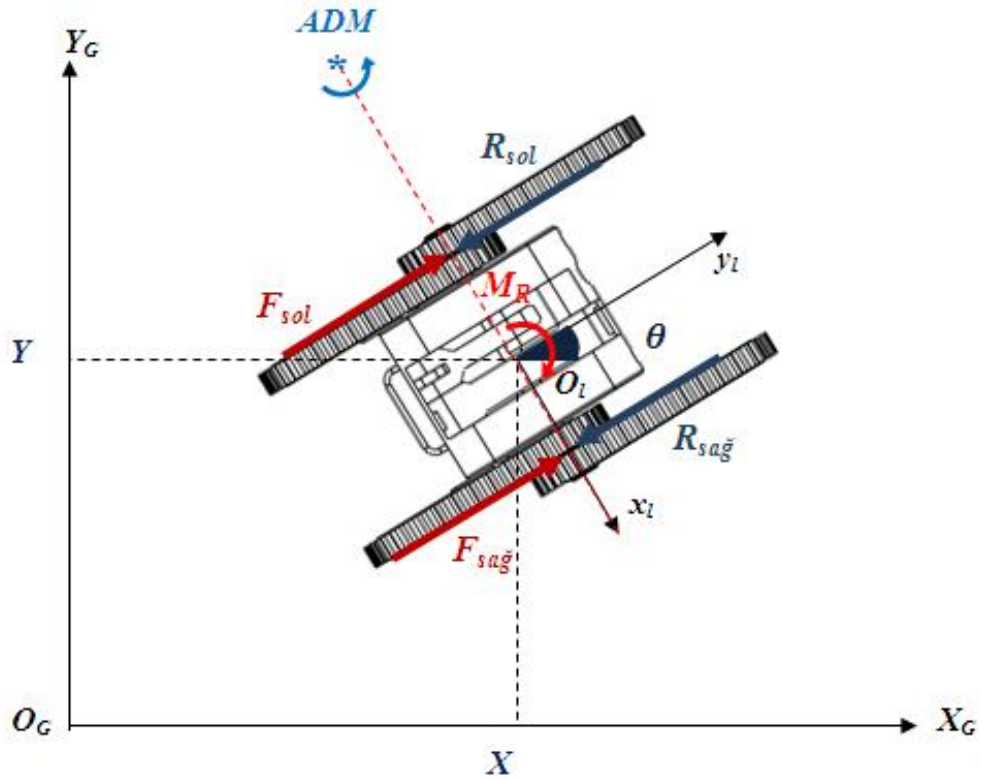
4.2.2 Mobil platformun kinetik modeli

Bu alt bölümde Şekil 4.10'da verilmekte olan mobil platformun paletli kipteki düzlemsel hareketi için kinetik analizi yapılacaktır. Kinetik model kinematik modellenin oluşturulmasındaki kabullere ilave olarak,

- i. Palet boyunca normal basınç dağılımının eş,
- ii. Yanal kayma sürtünme katsayısı μ_l sabit,
- iii. Paletlerin özdeş,

olduğu varsayımlarına dayanılarak çıkarılacaktır. Bu varsayımlar altında mobil platforma ait kinetik model Şekil 4.14'te verilmektedir.

Şekil 4.14'de verilen kinetik modelde mobil platformun üzerine, paletlerin yer ile sürtünmesinden kaynaklanan $R_{\#}$ sürtünme kuvveti, elektrik motorlarından sağlanan $F_{\#}$ tahrik kuvveti ve kendi etrafında döndüğünde eylemsizlik ile sürtünmeden dolayı hareketin ters yönünde etkiyen M_R direnç momenti etkimektedir. Platformun yönlendirilmesi de paletlere farklı etkitilen tahrik kuvvetlerinin kütle merkezi etrafında oluşturduğu dönme momentinin yanal dönme dirençlerini yenmesi ile gerçekleşmektedir. Bu arada platform düşük hızlarda seyrettiğinden ötürü merkezkaç kuvvetinden kaynaklanan kütle merkezindeki etkiler ihmal edilebilir boyuttur.



Şekil 4.14: Mobil platformun düzlemsel hareketteki kinetik modeli

Platform üzerinde etkitilen tahrik kuvvetlerinin bilindiği farz edilerek hareketin basitleştirilmiş kinematik analizi yapılacak olursa,

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = F_{sağ} + F_{sol} - R_{top,yuvarlanma} \quad (4.101)$$

$$\mathfrak{I}_z \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{D}{2} (F_{sağ} - F_{sol}) - M_R \quad (4.102)$$

yerel eksen takımına göre hareket denklemleri bulunur. Hareket denklemleri motorlara etkiyen torklar cinsinden yazılacak olursa,

$$F_{sağ} = \frac{\tau_{sağ}}{r} \left\{ \begin{array}{l} m \frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{1}{r} (\tau_{sağ} + \tau_{sol}) - R_{toplama} \end{array} \right. \quad (4.103)$$

$$F_{sol} = \frac{\tau_{sol}}{r} \left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{I}_z \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{D}{2r} (\tau_{sağ} - \tau_{sol}) - M_R \end{array} \right. \quad (4.104)$$

elde edilir. Bu ifadeler genel eksen takımına göre,

$$m \ddot{X} = \frac{1}{r} (\tau_{sağ} + \tau_{sol}) \cdot \cos \theta - R_{top,yuvarlanma} \cdot \cos \theta \quad (4.105)$$

$$m \ddot{Y} = \frac{1}{r} (\tau_{sağ} + \tau_{sol}) \cdot \sin \theta - R_{top,yuvarlanma} \cdot \sin \theta \quad (4.106)$$

$$\mathfrak{I}_z \cdot \ddot{\theta} = \frac{D}{2r} (\tau_{sağ} - \tau_{sol}) - M_R \quad (4.107)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu ifadelerde sürtünmelerinden kaynaklanan direnç kuvveti ile momenti,

$$\begin{aligned} R_{toplaml,yuvarlanma} &= R_{sağ} + R_{sol} = \frac{W}{2} \cdot \boldsymbol{\mu_r} \cdot sgn(V_R) + \frac{W}{2} \cdot \boldsymbol{\mu_r} \cdot sgn(V_L) \\ &= \frac{m \cdot g}{2} \cdot \boldsymbol{\mu_r} \cdot sgn\left(V_y + \dot{\theta} \cdot \frac{D}{2}\right) + \frac{m \cdot g}{2} \cdot \boldsymbol{\mu_r} \cdot sgn\left(V_y - \dot{\theta} \cdot \frac{D}{2}\right) \end{aligned} \quad (4.108)$$

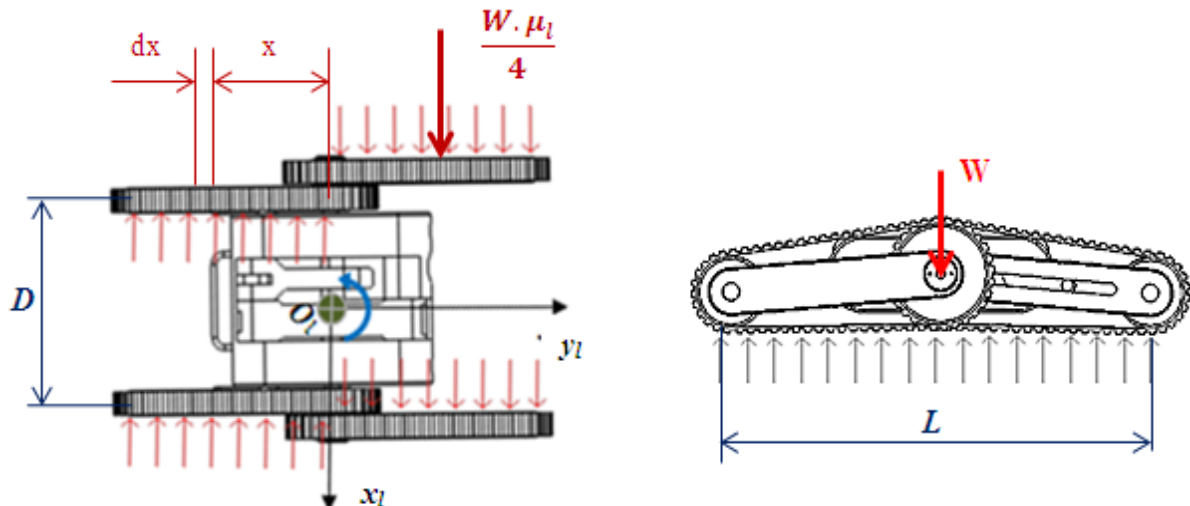
$$M_{R,kayma} = 4 \cdot \frac{W \cdot \mu_l}{2l} \int_0^{l/2} x \cdot dx = \frac{W \cdot l \cdot \mu_l}{4} \quad (4.109)$$

denklemleriyle ifade edilir. Denklemlerdeki μ_i kayma sürtünmesi Tablo 4.1'den öğrenilebilir.

Çizelge 4.1: Paletlerin çeşitli yüzeyler üzerindeki yanal kayma sürtünmesi değerleri.

Track Material	Coefficient of Lateral Resistance μ_t		
	Concrete	Hard Ground (not paved)	Grass
Steel	0.50–0.51	0.55–0.58	0.87–1.11
Rubber	0.90–0.91	0.65–0.66	0.67–1.14

Paletlere etkiyen direnç momenti dağılımı ile ağırlığından dolayı normal doğrultuda etkiyen homojen basınç dağılımı Şekil 4.15’te verilmektedir.



Şekil 4.15: Paletlerdeki dönme direnci M_R ve normal basınç dağılımı

Bulunan hareket denklemleri (4.92) ve (4.93) için mobil platformun uzaysal bir çalışma ortamındaki düzlemsel hareketi için uzaysal operatör cebirine göre ifade edilecek olan kinetik modeline önceki bölümündeki adımlar takip edilerek ulaşılabacaktır.

Bunun için öncelikle bileşenleri *sıfır* veya *m* indis olarak belirtilmekte olan platformun kütle matrisi ifadesi,

$$\hat{l}_{0,c} = \begin{bmatrix} 0 & -c/2 & b/2 \\ c/2 & 0 & -a/2 \\ -b/2 & a/2 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow M_m = \begin{bmatrix} \mathfrak{T}_0 & m_0 \cdot \hat{l}_{0,c} \\ -m_0 \cdot \hat{l}_{0,c} & I_{3 \times 3} \cdot m_0 \end{bmatrix} \quad (4.110)$$

olarak bulunur. Uzaysal bias ivmesi $\vec{\ddot{a}}_0$ ile uzuv artık vektörleri $\vec{b}_0$ ise

$$a_0 = \begin{bmatrix} \vec{0} \\ \vec{g} \end{bmatrix}, \quad b_0 = \begin{bmatrix} \vec{w}_0 \times \mathfrak{T}_0 \vec{w}_0 \\ m_0 \cdot \vec{w}_0 \times (\vec{w}_0 \times \vec{l}_{0,c}) \end{bmatrix} \quad (4.111)$$

şeklinde hesaplanır. Bulunan ifadeler uzaysal ivme ifadesinde;

$$\begin{aligned} \vec{\ddot{V}}_m &= \vec{\ddot{H}}_0 \cdot \ddot{\theta}_0 + \vec{\ddot{a}}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{y}_0 \\ \ddot{\theta}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{0} \\ \vec{g} \end{bmatrix} = \dots \\ &= [0 \quad 0 \quad \ddot{\theta}_0 \quad \ddot{x}_0 \quad \ddot{y}_0 \quad g]^T \end{aligned} \quad (4.112)$$

yerleştirilip uzaysal kuvvet denkleminde yerine konulursa,

$$\vec{\ddot{F}}_m = \phi^T_{1,0} \cdot \vec{\ddot{F}}_1 + M_m \cdot \vec{\ddot{V}}_m + \vec{b}_0 \quad (4.113)$$

bulunur. Bu denklem vasıtasıyla da mobil platformun sırasıyla verilmekte olan ileri ve ters kinetik denklemleri elde edilir. Buna göre ileri kinetik denklem,

$$\begin{aligned} \tau_m &= H^T \cdot \vec{\ddot{F}}_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\tau}_m \\ \vec{f}_m \end{bmatrix} = \dots \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & \hat{l}_{0,1} \\ O_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\tau}_1 \\ \vec{f}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathfrak{T}_0 & m_0 \cdot \hat{l}_{0,c} \\ -m_0 \cdot \hat{l}_{0,c} & I_{3 \times 3} \cdot m_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\vec{w}}_0 \\ \dot{\vec{v}}_0 \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. + \begin{bmatrix} \vec{w}_0 \times \mathfrak{T}_0 \vec{w}_0 \\ m_0 \cdot \vec{w}_0 \times (\vec{w}_0 \times \vec{l}_{0,c}) \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (4.114)$$

ters kinetik denklem ise,

$$\ddot{\theta}_0 = \begin{bmatrix} \dot{\vec{w}}_0 \\ \dot{\vec{v}}_0 \end{bmatrix} = \mathcal{M}_m^{-1} \{ \tau_m - C_0 - \mathcal{J}^T \cdot \vec{\ddot{F}}_1 \}, \quad \mathcal{M}_m = H^T \cdot M_m \quad (4.115)$$

ifadelerinden hesaplanır.

4.2.3 Mobil manipülatör kinetik modeli

Manipülatör ve mobil platform için çıkarılan kinetik modeller aralarındaki uzuv vektörü kullanılarak elde edilen yayılım matrisi aracılığıyla birleştirilecek olursa mobil manipülatöre ait kinetik model elde edilir.

Buna göre ileri ve ters kinetik modeli,

$$\underset{\sim}{\tau} = \mathcal{M} \cdot \ddot{\underset{\sim}{\theta}} + \underset{\sim}{C} + \mathcal{M}_m \cdot \ddot{\underset{\sim}{V}}_m + \mathcal{J}^T \cdot \ddot{\underset{\sim}{F}}_t \quad (4.116)$$

$$\ddot{\underset{\sim}{\theta}} = \mathcal{M}^{-1} \cdot \{ \underset{\sim}{\tau} - \underset{\sim}{C} - \mathcal{M}_m \cdot \ddot{\underset{\sim}{V}}_m - \mathcal{J}^T \cdot \ddot{\underset{\sim}{F}}_t \} \quad (4.117)$$

denklemleri ile ifade edilir. Denklemlerdeki matrisler hatırlanacak olursa,

$$\mathcal{M}_m = H^T \cdot \phi^T \cdot M \cdot \phi \cdot \phi_m \quad (4.118)$$

$$\mathcal{M} = H^T \cdot \phi^T \cdot M \cdot \phi \cdot H \quad (4.119)$$

$$\underset{\sim}{C} = H^T \cdot \phi^T \cdot (M \cdot \phi \cdot \underset{\sim}{a} + \underset{\sim}{b}) \quad (4.120)$$

idi. Bunların bileşenleri,

$$M_{30 \times 30} = \begin{bmatrix} M_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_4 \end{bmatrix} \quad (4.121)$$

$$\underset{\sim}{\phi}_m = [\underset{\sim}{\phi}_{1,0} \quad 0_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 6}]^T \quad (4.122)$$

$$\underset{\sim}{\phi}_{30 \times 30} = \begin{bmatrix} I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \underset{\sim}{\phi}_{1,0} & I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \underset{\sim}{\phi}_{2,0} & \underset{\sim}{\phi}_{2,1} & I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \underset{\sim}{\phi}_{3,0} & \underset{\sim}{\phi}_{3,1} & \underset{\sim}{\phi}_{3,2} & I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ \underset{\sim}{\phi}_{4,0} & \underset{\sim}{\phi}_{4,1} & \underset{\sim}{\phi}_{4,2} & \underset{\sim}{\phi}_{4,3} & I_{6 \times 6} \end{bmatrix}, \underset{\sim}{a} = \begin{bmatrix} \vec{a}_0 \\ \vec{a}_1 \\ \vec{a}_2 \\ \vec{a}_3 \\ \vec{a}_4 \end{bmatrix}, \underset{\sim}{b} = \begin{bmatrix} \vec{b}_0 \\ \vec{b}_1 \\ \vec{b}_2 \\ \vec{b}_3 \\ \vec{b}_4 \end{bmatrix} \quad (4.123)$$

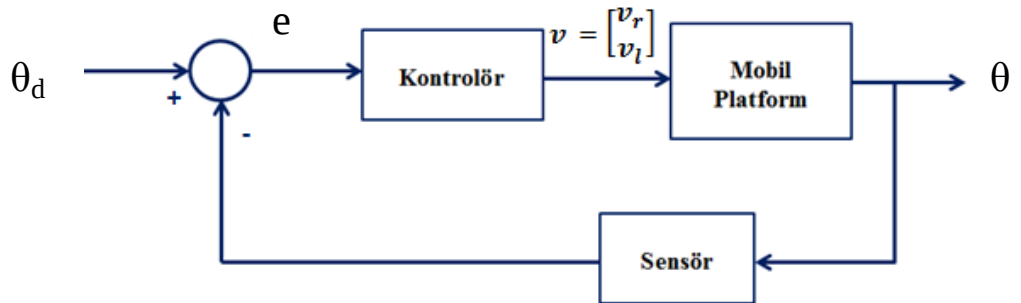
şeklindeidir. Bulunan matrisler Matlab/Symbolic Toolbox veya Matlab/Mupad yardımıyla hesaplanacağından açık biçimleri tekrar buraya konulmamıştır.

5. HAREKET KONTROLÜ VE BENZEŞİMİ

Bu bölümde robotun platform kısmının kinematik tabanlı hareket kontrolüne ve Recurdyn programı ile benzeşimine değinilecektir. Kontrol teorisinde bilindiği üzere transfer fonksiyonuna bağlı olarak geliştirilmiş klasik kontrol algoritmaları, durum uzayı modeline bağlı olarak geliştirilen modern kontrol algoritmaları ve modele dayalı olmayan kayan kipli ve bulanık mantık vb. gibi algoritmalar mevcuttur. Platform kontrolünde modele dayalı olmayan PID kontrol algoritması sıklıkla kullanılmasından ötürü tercih edilmiş, benzeşim programının arayüzündeki Matlab muadili Colink aracında geliştirilerek platformun modeli üzerine etkitilmiştir. Tasarlanan PID kontrollörde P terimi hatanın doğrudan kontrol işareti üzerine etkimesini sağlarken, I terimi o ana kadar yapılan toplam hatayı kontrol işaretine etkitererek geçmiş hakkında da bilgi sahibi olmasını sağlamakta, D terimi ise hatadaki değişim hızını kontrol işaretine etkitererek ilerisi hakkında öngörüde bulunmasını sağlamaktadır.

Kullanılmakta olan kontrolöre ilişkin PID kontrol algoritması denklem 5.1’de verilmekte olup, parametreleri Ziegler-Nichols metodunda kontrollörün I ve D katsayılarının sıfıra atanıp P katsayısını tedricen artırılarak osilasyona gittiği andaki P değeri ve frekansı kullanılarak belirlenmiştir.

Referans

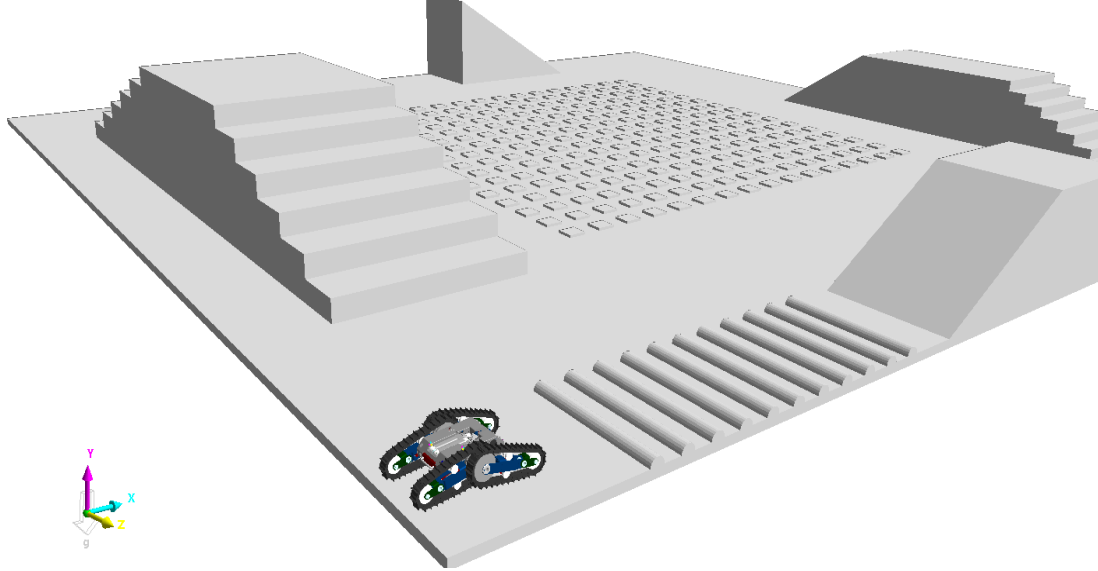


Şekil 5.1 : Mobil platform kontrol sistemi

Bunun neticesinde bulunan değerler $K_p=12.2$, $T_i=3$ ve $T_d=0,7$ olarak hesaplanmıştır.

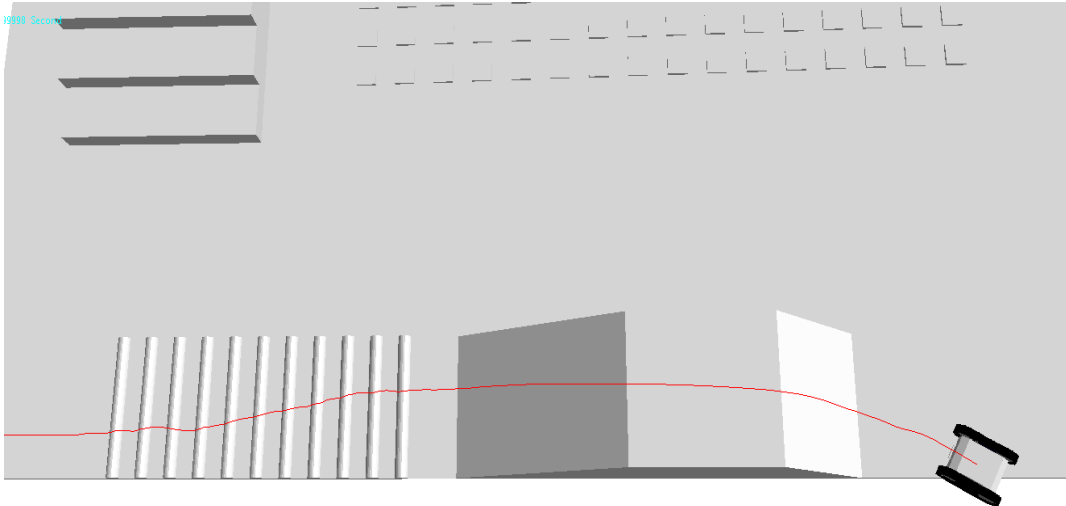
$$u(t) = K_p \cdot \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt + T_d \cdot \frac{d}{dt} e(t) \right\} \quad (5.1)$$

Mobil platformun hareket kontrolüne ilişkin blok şeması Şekil 5.1’de gösterilmekte, şemadaki hata referans yörüngesi ile o anki pozisyon arasındaki farktan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.2 : Recurdyn benzeşim ortamındaki test sahasında mobil manipölator

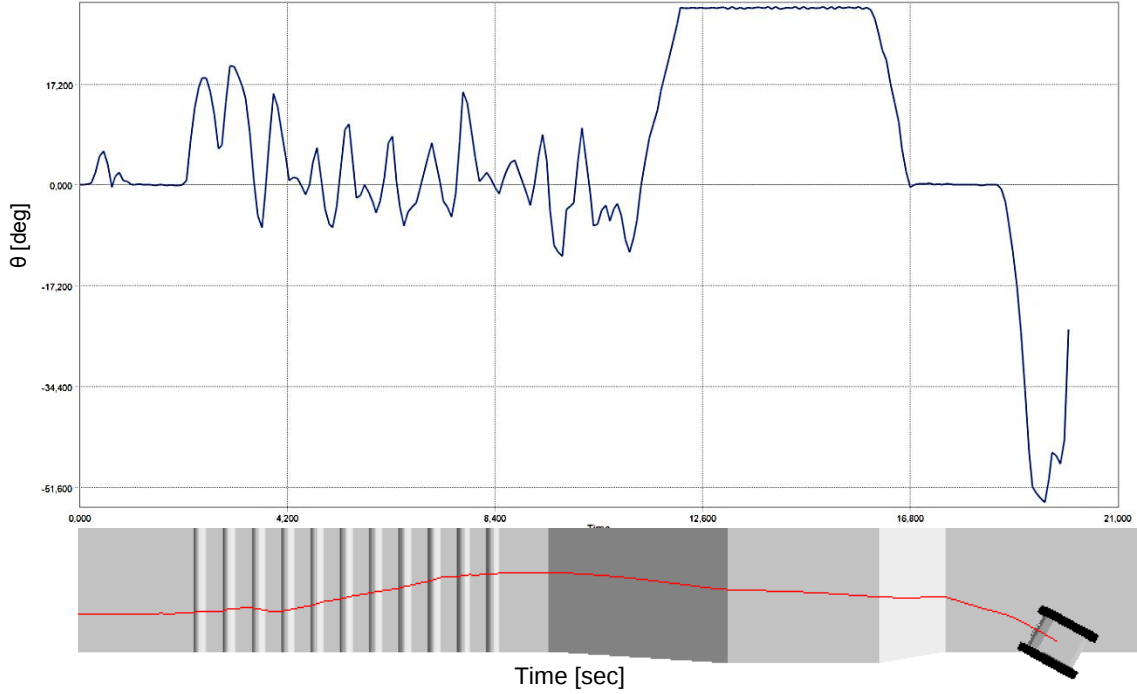
Şekil 5.2’de verilmekte olan test ortamında tanımlanan yörünge için mobil platformun kinematik tabanlı hareket kontrolünde izlemekte olduğu yol düz bir çizgi olarak tanımlanmıştır. Lakin burada platformun parçalı palet yapısı, ihtiva ettiği süspansiyonlar doğrusal olmayan yapısı çözüm süresini uzattığından ötürü daha basit yapıda Şekil 5.3’teki gibi platform kullanılmak zorunda olunmuştur.



Şekil 5.3 : Kontrolörsüz platformun tanımlanan doğrusal hareket için yörüngesi

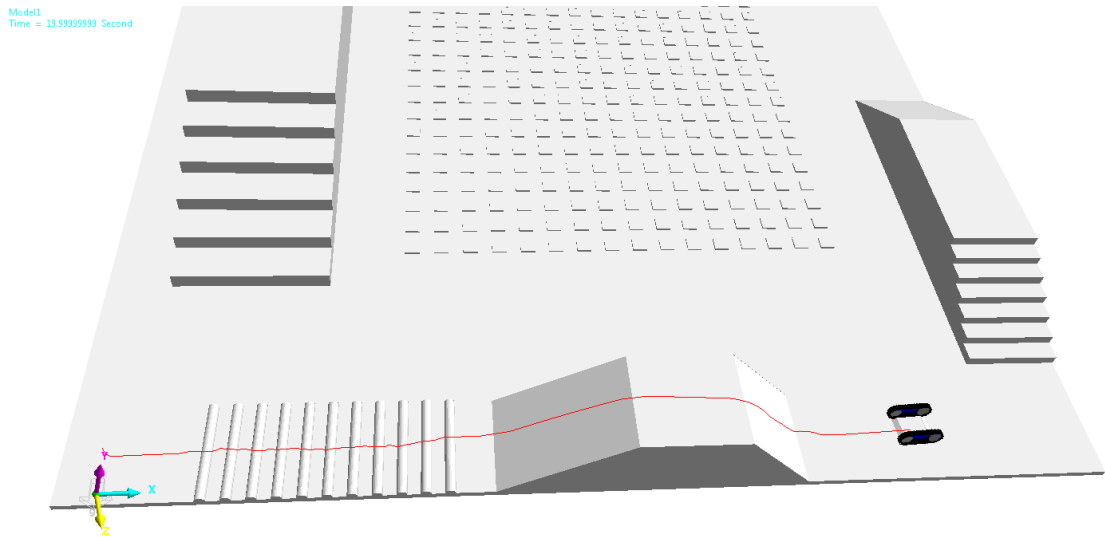
Platformun doğrusal hareket için izlediği yol için kontrol uygulanmazsa Şekil 5.3’teki bir yörünge takip etmekte, 35° ile -52° derece arasında de kontrol edilmemesi durumunda yoldan gelen bozucu etkiler arasında dönme açısı değerleri alıp

tanımlanan doğrusal yörüngeden çıkmaktadır (bkz.Şekil 5.4). Yoldan çıkmaması için tanımlanan yörüngeden ters kinematik denklemlerle paletleri tahrik eden motorlara hız bilgisi girilmesi dolayısıyla bunun için de dönme açısının kontrol edilmesi gerekmektedir.



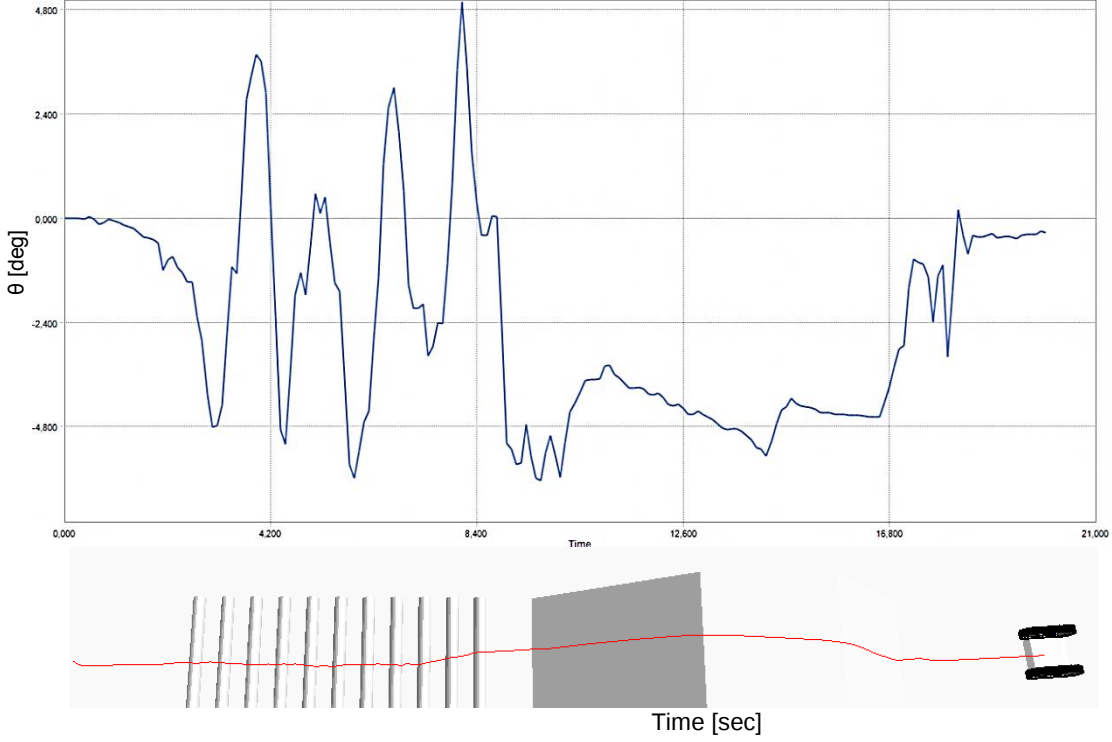
Şekil 5.4 : Kontrolörsüz mobil platform için dönme açısı değişimi

Öte yandan tasarlanan pid kontrolörün mobil platforma kinematik tabanlı yörünge kontrolü –yörünge olarak doğrusal yörünge tanımlı- yapmak amacıyla etkilmesi durumunda izlediği yörünge doğrusal harekete $\pm 5^\circ$ derece hata ile yakınsamakta bu da daha etkili kontrolörün tasarlanmasını gerekli olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.5 : Pid kontrolörlü platformun doğrusal hareket için takip ettiği yörünge

Tanımlanan doğrusal yörünge için dönme açısına ilişkin grafik ve simülasyon ortamında yoldan gelen bozucular etkisinde takip ettiği yörünge Şekil 5.6’da verilmektedir.



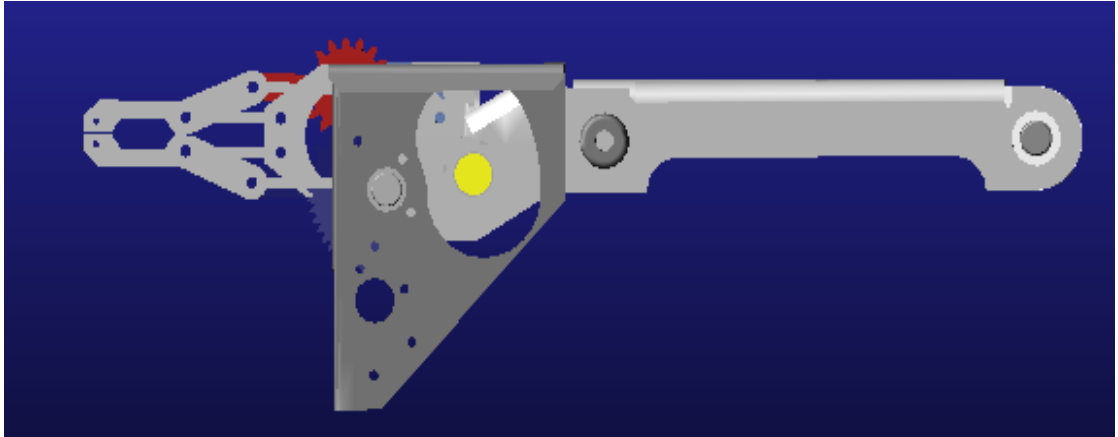
Şekil 5.6 : P1d kontrolörlü mobil platform için dönme açısı değişimi

Mobil manipülatörün manipülatör ve platform kısımları daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere benzeşim için ilgili modüllerin tek bir program çatısı altında temin edilememesinden kaynaklanmaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılmakta olan bu tez çalışmasında girizgah kısmında belirtildiği üzere her türlü arazide hareket kabiliyetine sahip mevcut akademik ve ticari amaçlı versiyonlarına göre özgün bir paletli mobil manipülatör tasarımı yapılmış, uzaysal operatör cebrine göre dinamik modeli kurulmuştur.

Robot üzerindeki manipülatörüm Şekil 6.1.a'daki konumundan Şekil 6.1.b'deki konumuna gitmesi durumunda uc noktasının yapmış olduğu hareketteki ait açısal hız ve ivme ifadelerinden faydalanılarak diğer uzuvlara ilişkin değerler benzeşim programından ölçülen ile UOC göre hesaplanan büyüklükleri ile karşılaştırılacaktır.



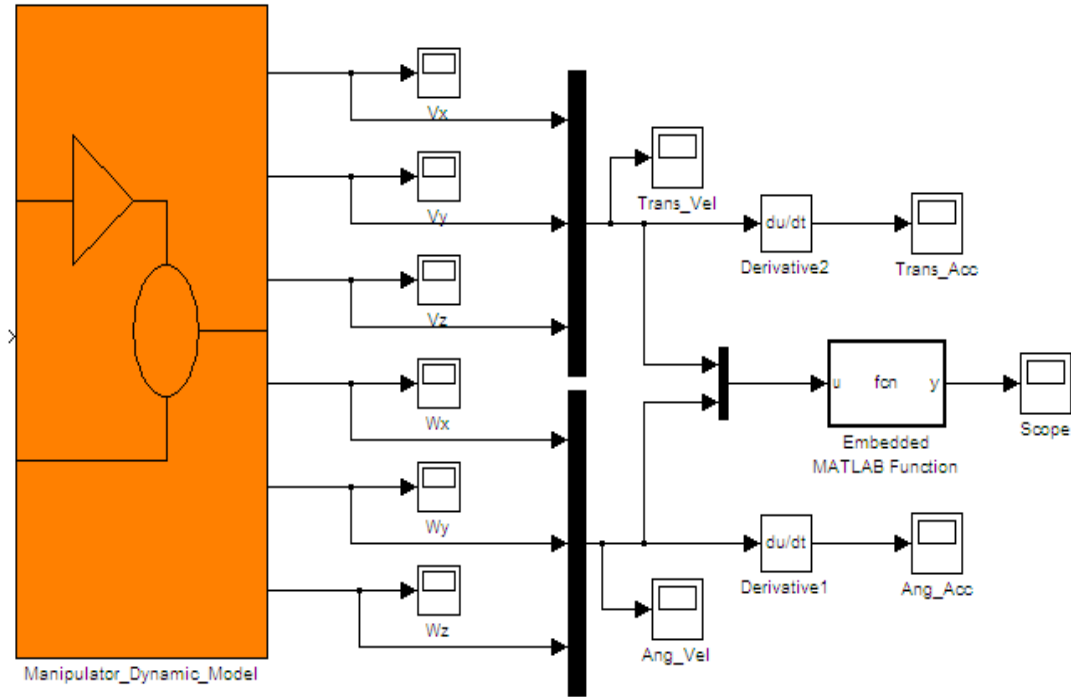
(a)



(b)

Şekil 6.1 : Durgun haldeki platformdaki manipülatör için tanımlanan hareket : (a) İlk konum. (b) Son konum.

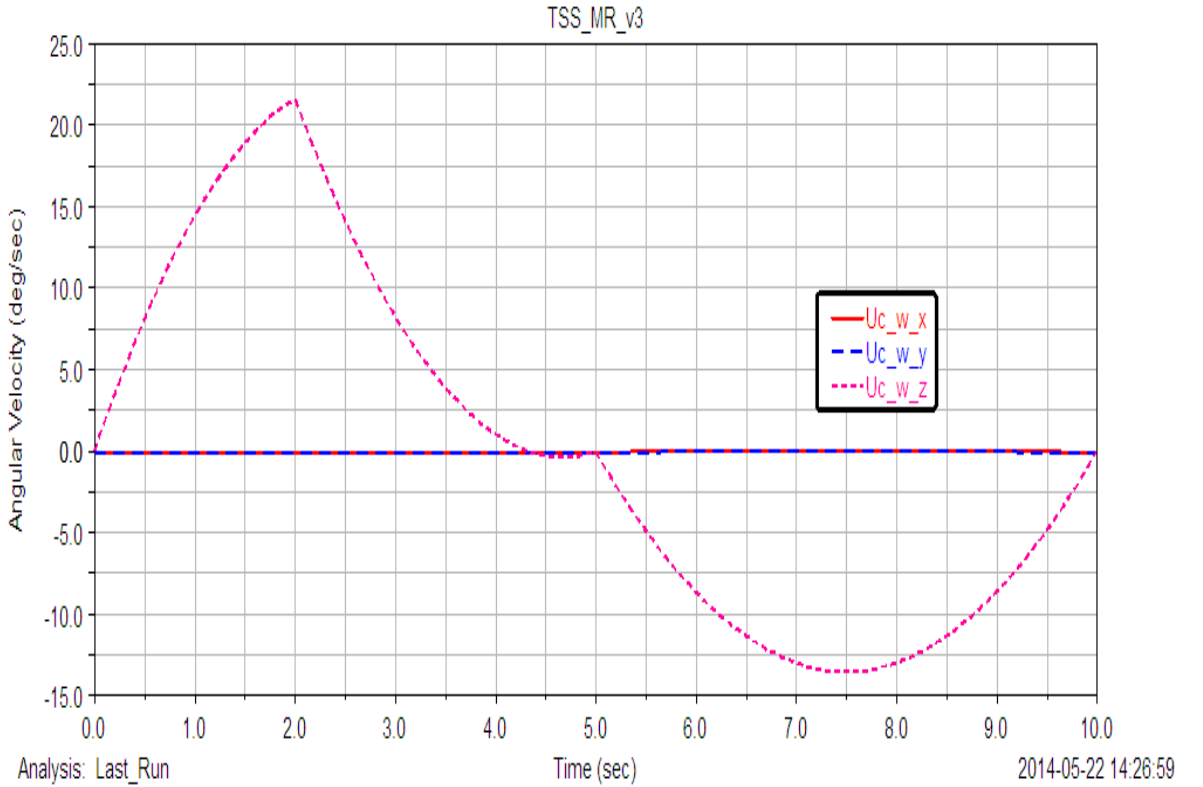
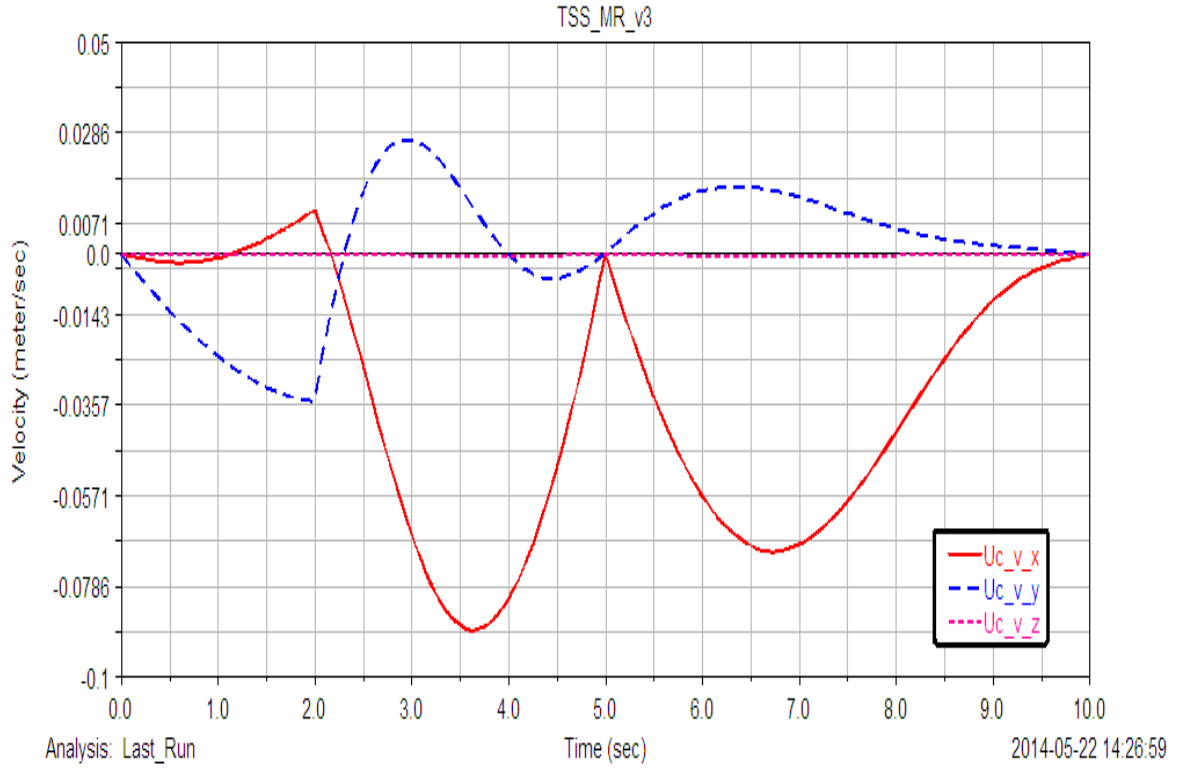
UOC ile kurulan dinamik model Matlab/Simulink programında Şekil 6.2’de verilmekte olan basit blok diyagramında gömülü Matlab fonksiyon kutucuğu içine kodlanmış, platform üzerindeki manipülatörün Şekil 6.1’de verilmekte olan ilk konumundan son konumuna hareketi esnasındaki platformdan kaynaklanan dinamik etkileşimlerin göz ardı edildiği durum için Msc Adam Benzeşim programından yararlanarak uç noktasına uzaysal hız girişi alınmıştır. Böylece Euler Lagrange denklemlerini kullanarak enerji tabanlı sonuç üreten benzeşim programı ile UOC kullanarak sonuç üreten dinamik modelin uç noktasına aynı uzaysal hız girilmesi durumundaki sonuçları iki farklı yöntemle elde etmek mümkün olacak, sonuçlar irdelenebilecektir.



Şekil 6.2 : Ouc ile hesaplanan uzuv hız/ivmelerini gözlemlemek amacıyla oluşturulan simulink blok diyagramı

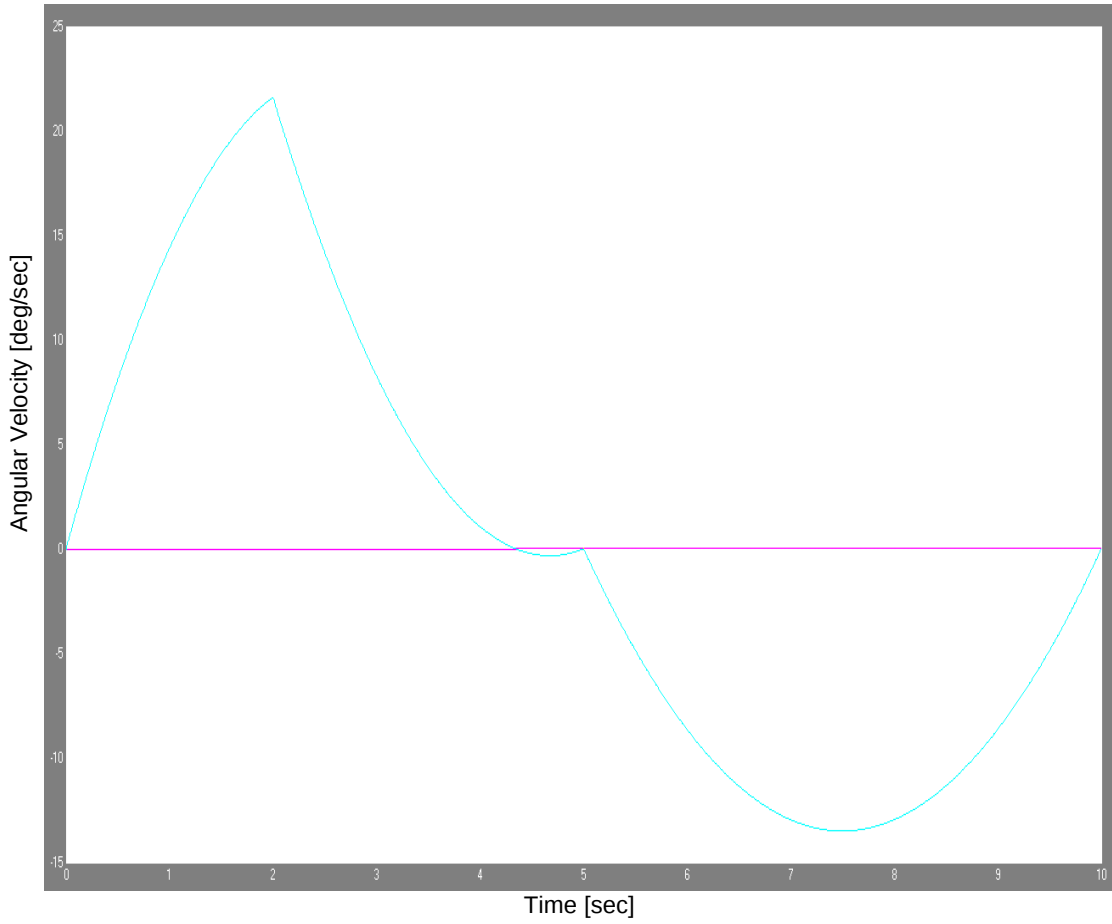
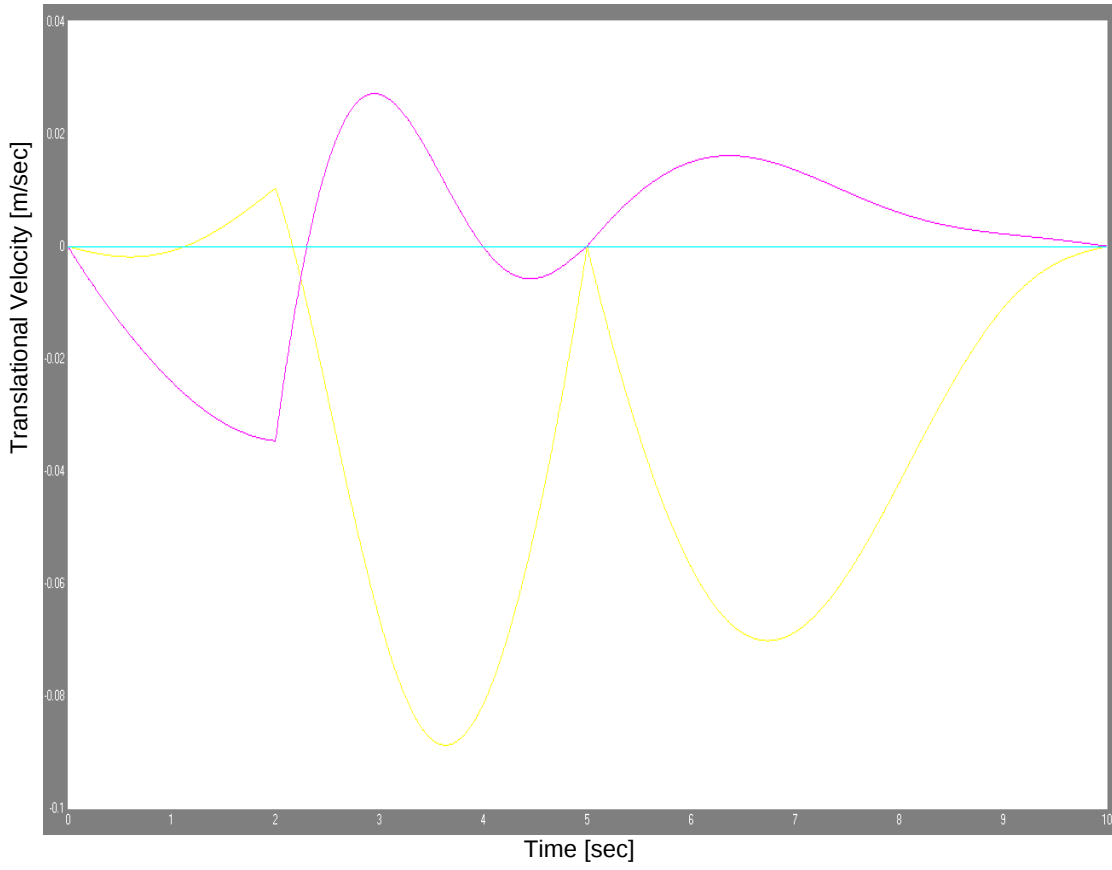
Modelde kullanılacak simulink blok diyagramı benzeşim programı ile uzuvlardaki hız ve ivmeleri hesaplamak için kullanılan Matlab programında yazılan algoritma arasından arayüz oluşturmakta uç noktasının yaptığı harekete ait uzaysal hız verileri 0.005 sn örnekleme aralıklarıyla aktarılmaktadır. Bu örnekleme aralığında alınan ve aktarılan verilerin Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’de grafikleri verilmektedir.

Buna göre benzeşim programından girilen uzaysal hızın ölçülen değerleri Şekil 6.3’de verilmekte, bu değerlerin Matlab/Simulink arayüzünde gözlem bloğundan okunan değerleri örnekleme neticesinde veri kaybı olmadığını göstermektedir.



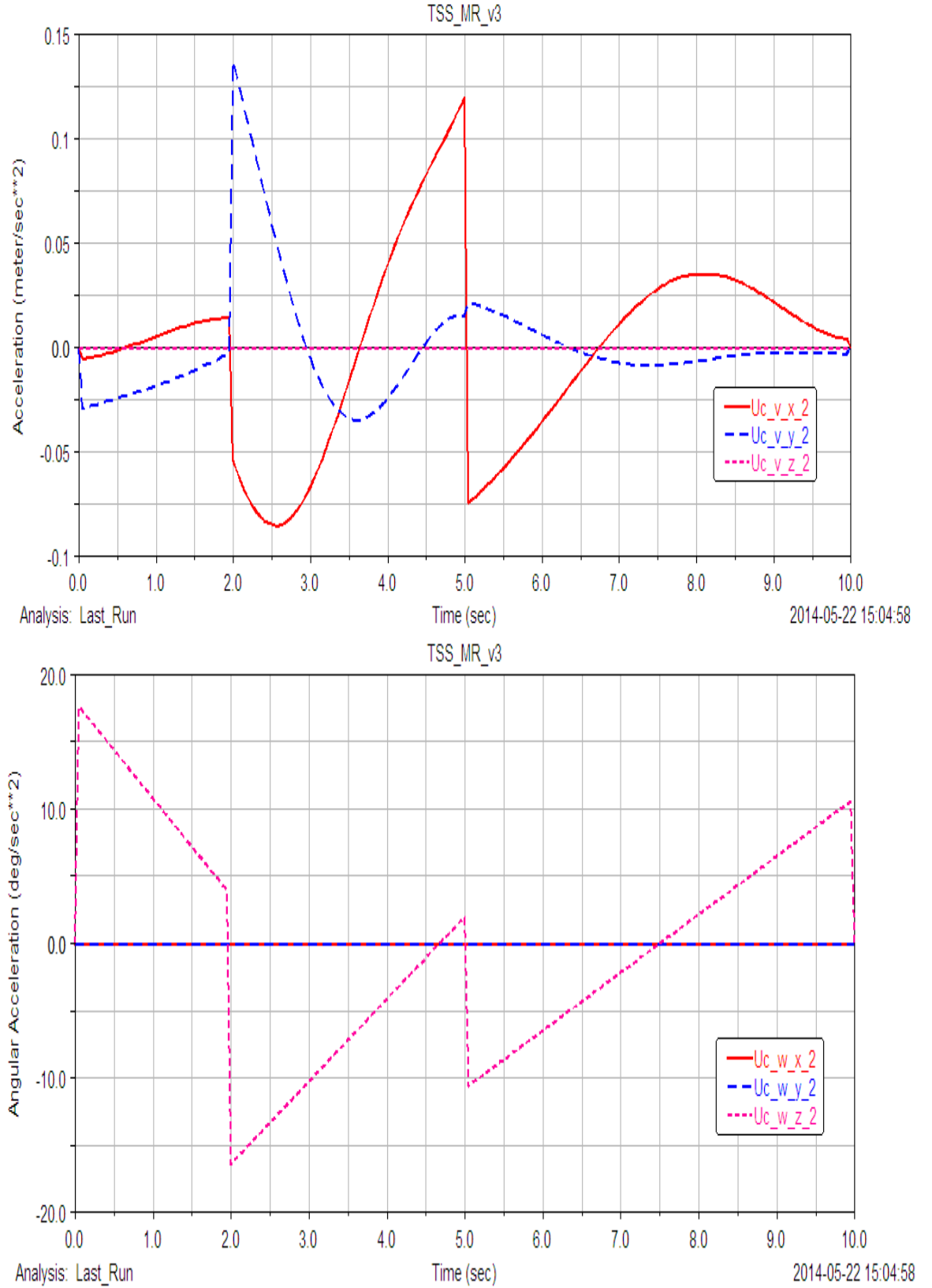
Şekil 6.3 : Msc adamsda manipölätör uç noktasına ait ölçölen uzaysal hız

Benzer sonucun, yani veri kaybı olmaksızın değerlerin iletilmesinin, Msc Adams benzeşim programında uç noktası için ölçölen ivme değerlerinin Simulink programında okunması neticesinde de Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'daki grafiklerde verildiği üzere gözlemlenmektedir.



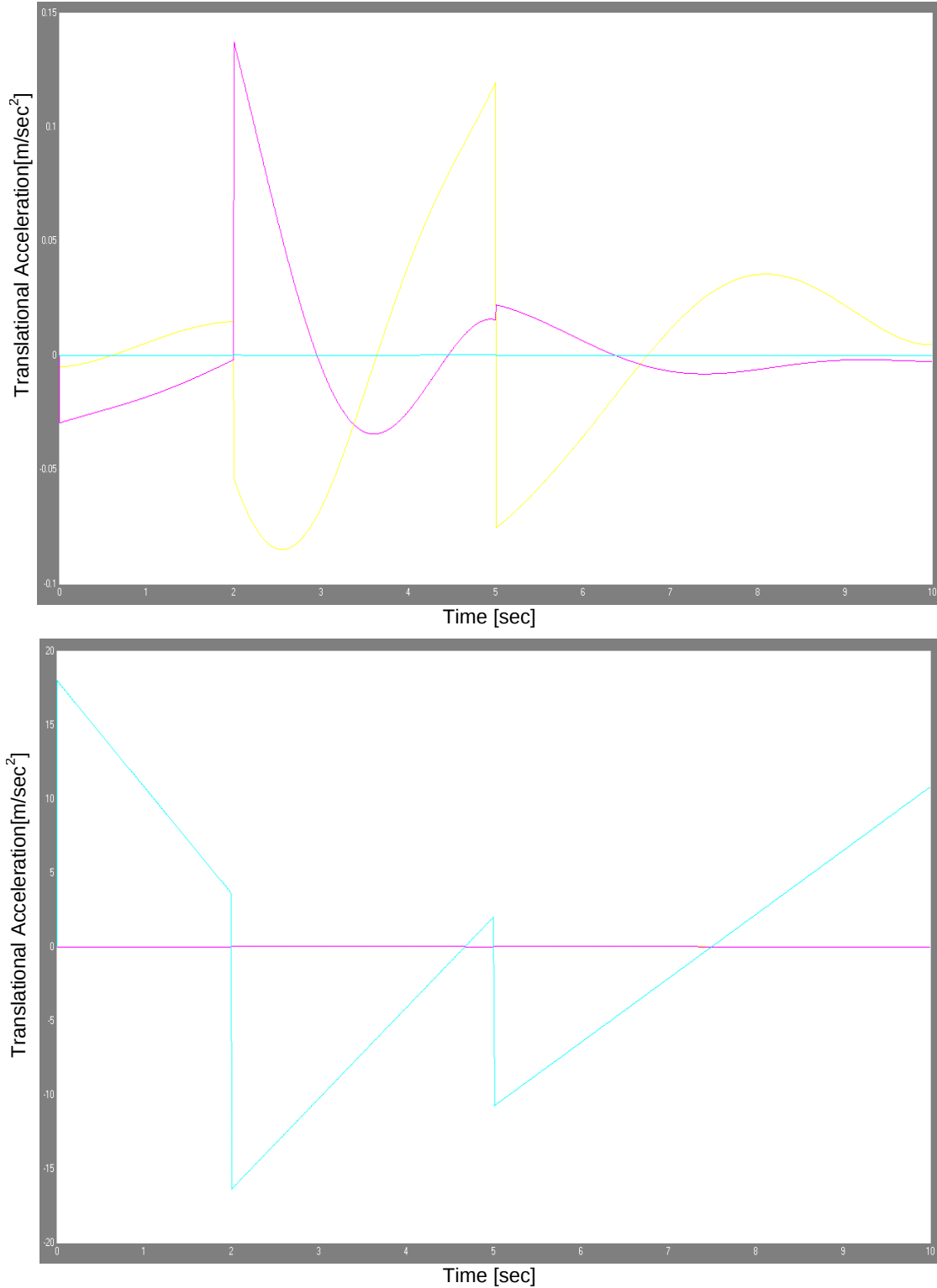
Şekil 6.4 : Simulinkde manipölatör uç noktasına ait uzaysal hız girişi

Benzeşim programından uç noktası için ölçülen uzaysal çizgisel ve açısal ivme değerleri Şekil 6.5'te olduğu gibi ölçülmekte bu değerler kinetik ifadelerdeki tork değerlerinin elde edilmesi için kullanılmaktadır.



Şekil 6.5 : Msc adamsda manipülör uç noktasına ait ölçülen uzaysal ivme

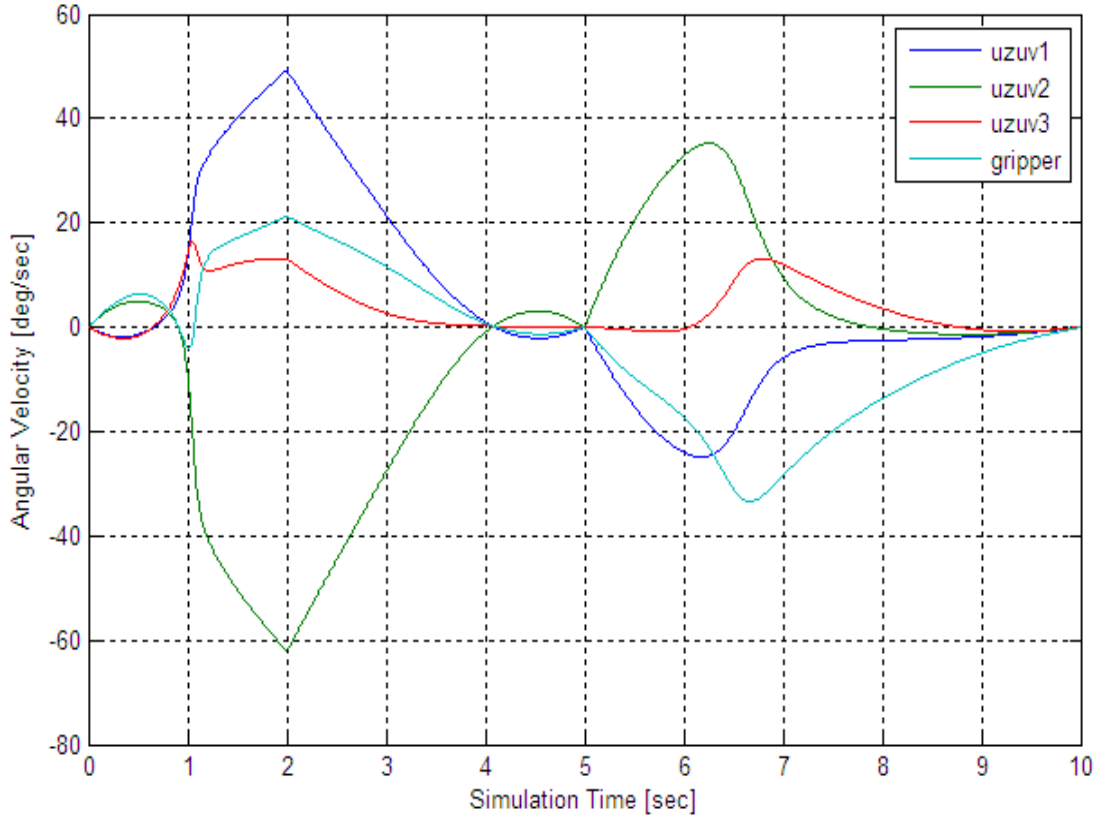
Bu değerlerin Matlab/Simulink programındaki karşılığı ise şekil 6.6'da verilmekte olup ileri kinetik denklemlerdeki veri girişi olacaktır.



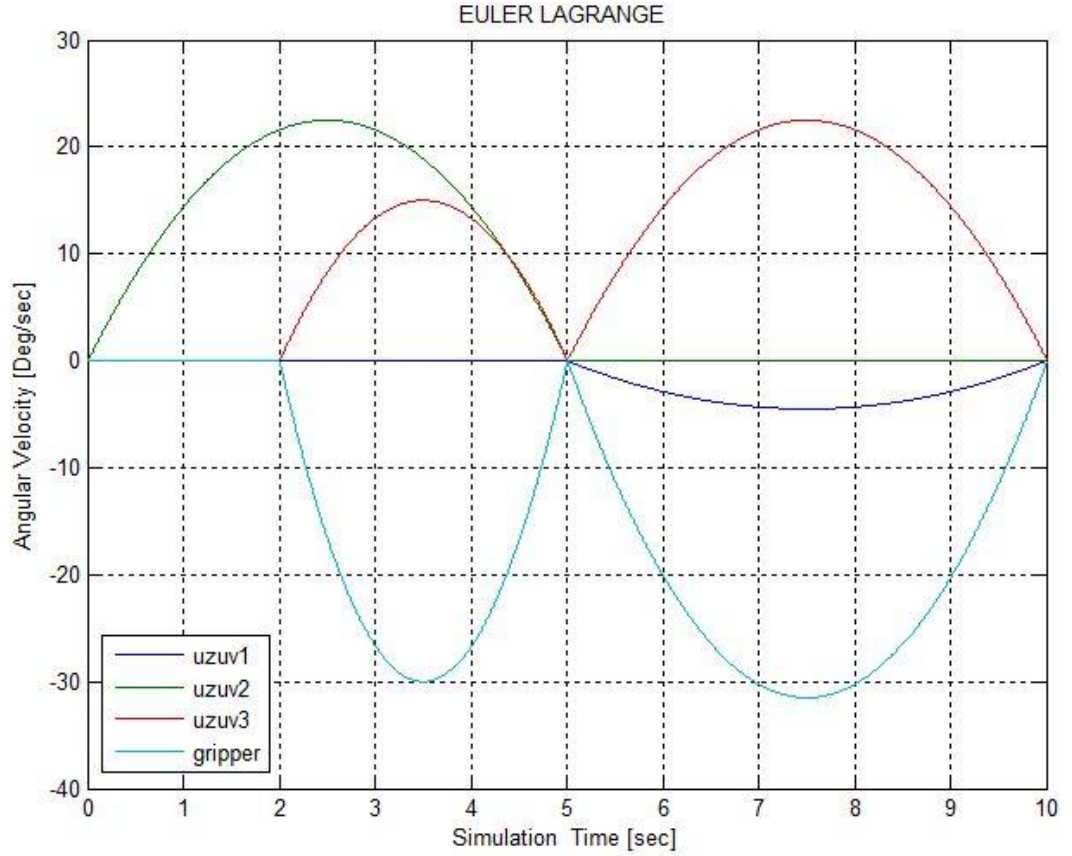
şekil 6.6 : Simulinkde manipulatör uç noktasına ait uzaysal ivme girişi

Benzeşim programından elde edilen giriş değerleri için manipulatörün ters kinematik hesabı UOC kullanılarak yapılacak olursa uzuvların hesaplanan hız değerleri şekil 6.7'deki grafikte verildiği gibi çıkmaktadır.

UZAYSAL OPERATOR CEBRİ

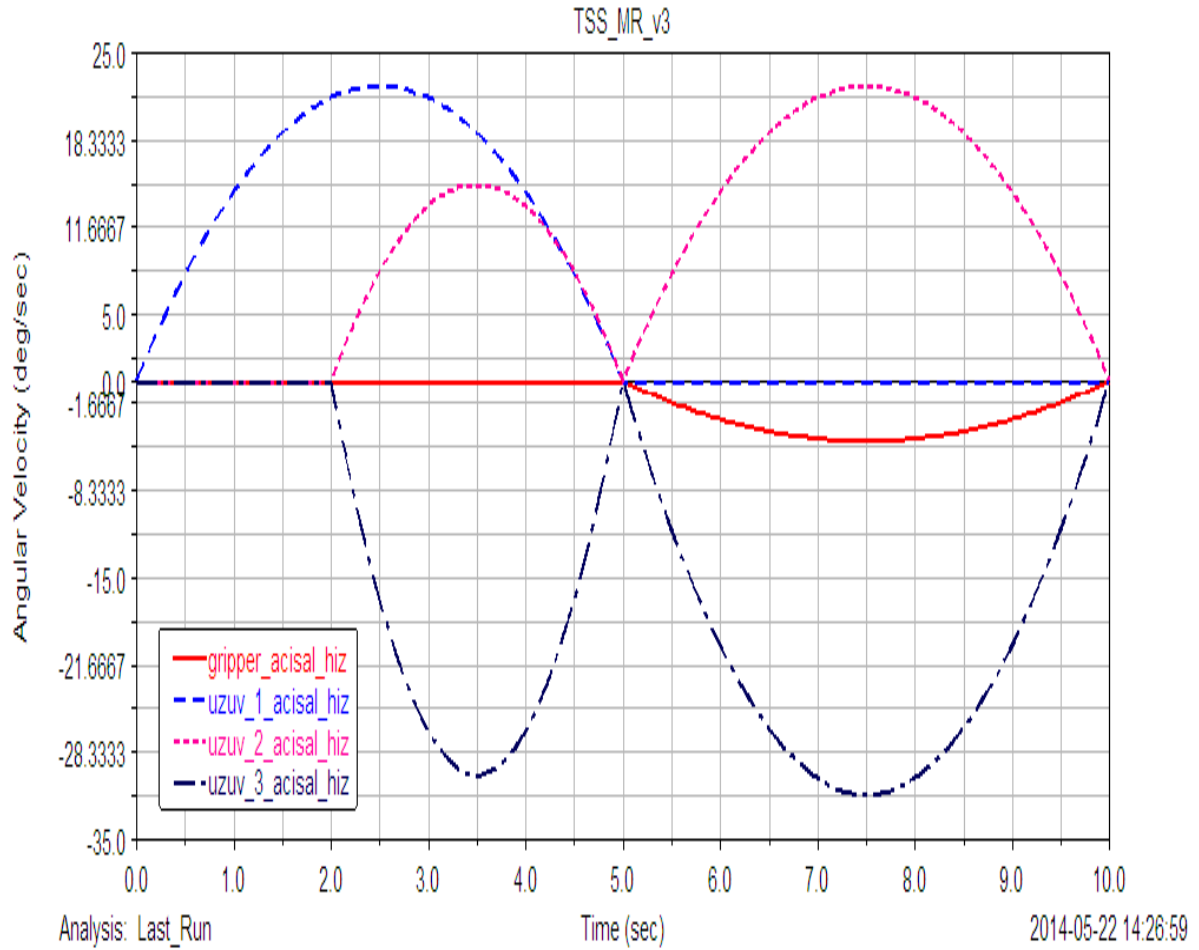


Şekil 6.7 : Uoc ile hesaplanan uzuv açısai hızları



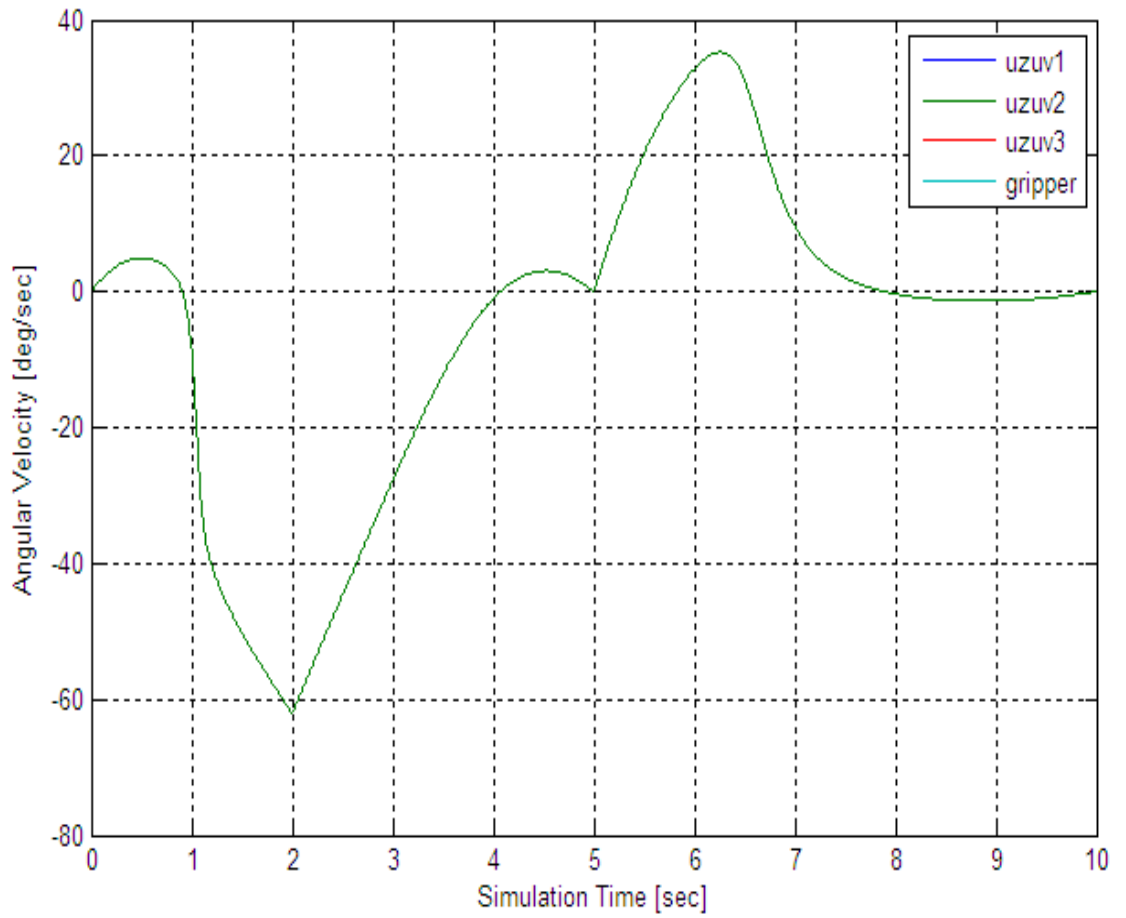
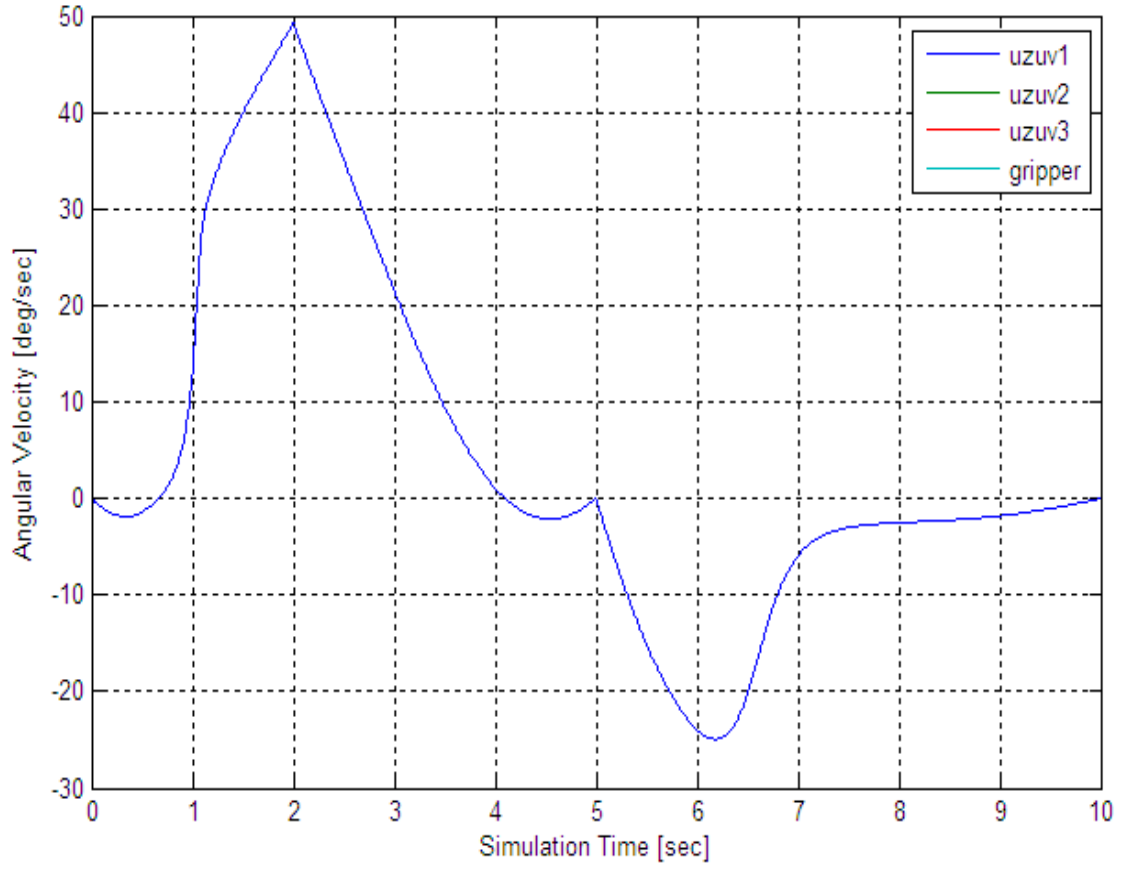
Şekil 6.8 : Euler lagrange ile hesaplanan uzuv açısai hızları

Halbuki beklenen sonuçlar Euler Lagrange ile hesaplanan veya benzeşim programında uzuvlar üzerinden ölçülen Şekil 6.8 veya Şekil 6.9'daki gibi olmalıdır. Hatalı sonuc elde edilmesindeki ana etken uzuv sayısı altıdan az olan açık zincirli sistemlerde Jakobyen matrisinin sözde tersini elde etmek için yapılan işlem adımlarında Matlab programının tekil matrislerle karşılaştığı durumda başarılı hesap yöntemleri sunamayışıdır. Bu sorunu gidermek için uzuvlardan birine öteleme eklemek veya matrisi ayarlamak gereklidir.

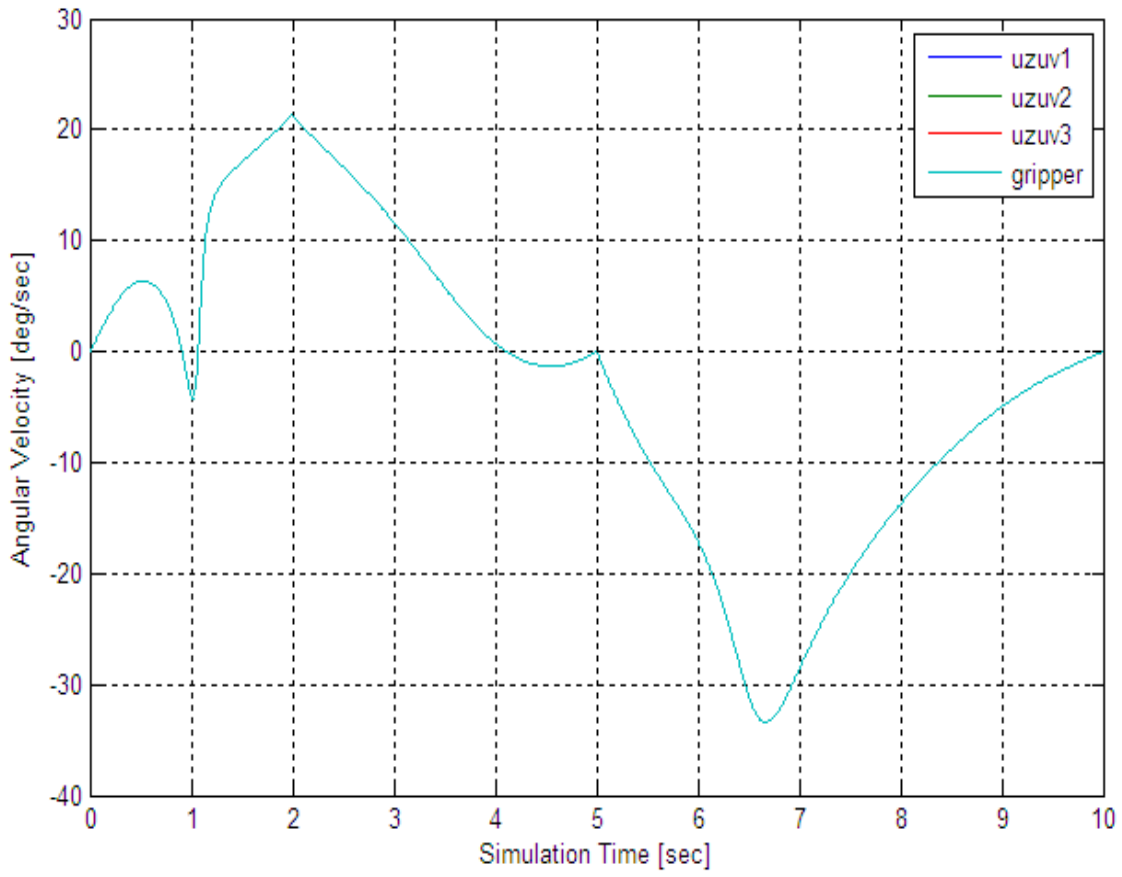
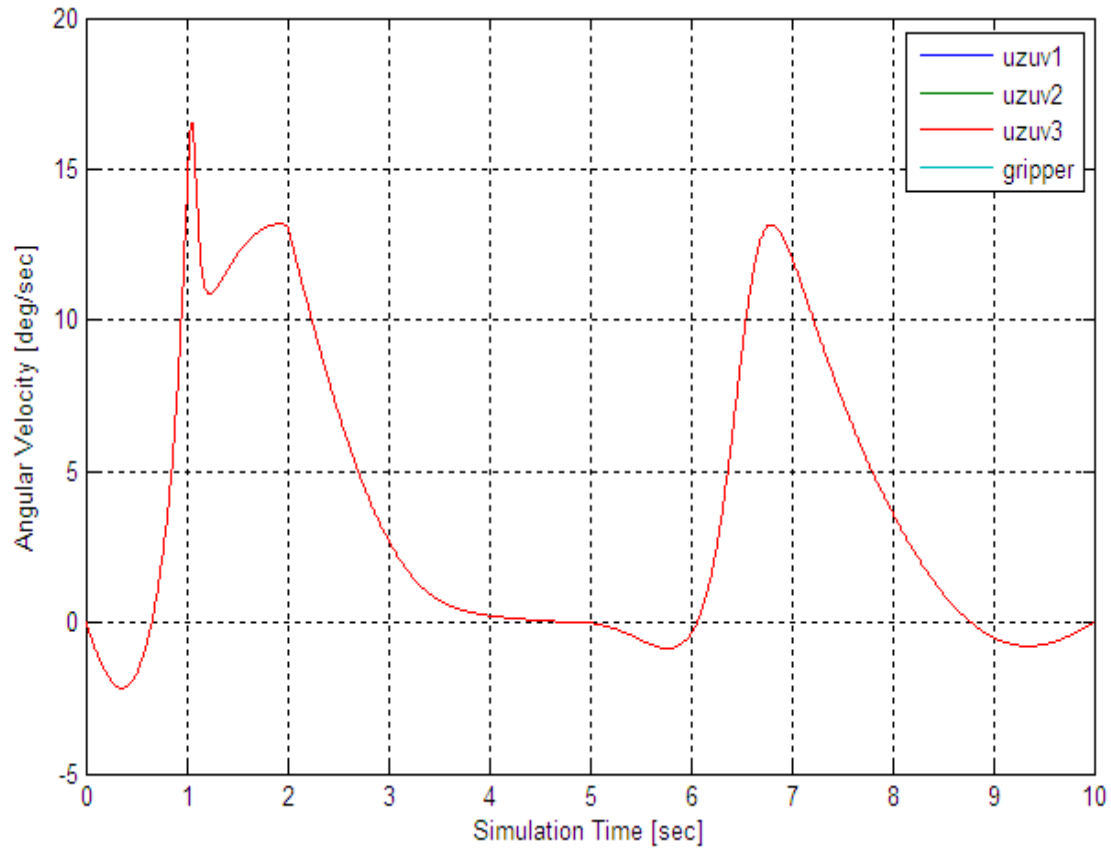


Şekil 6.9 : Msc adams programında ölçülen uzuv açısai hızları

Hesaplanan sonuçların anlaşılabilirliği açısından uzuvlardaki açısai hız değeri ayrı ayrı sırasıyla Şekil 6.10 ile Şekil 6.11'deki gibi gösterilebilir. Benzer nedenle açısai ivme değeri de sırasıyla Şekil 6.13 ve 6.14'deki gibi gösterilebilir. Buna göre UOC ile manipölörün ters kinematiğinin hesaplanmasıyla elde edilen açısai hız değeri sırasıyla uzuv-1 ve uzuv-2 için Şekil 6.10'da verilmekte olup devamında ise uzuv-3 ve uzuv-4 için hesaplanan açısai hız değeri Şekil 6.11'de verilmektedir.



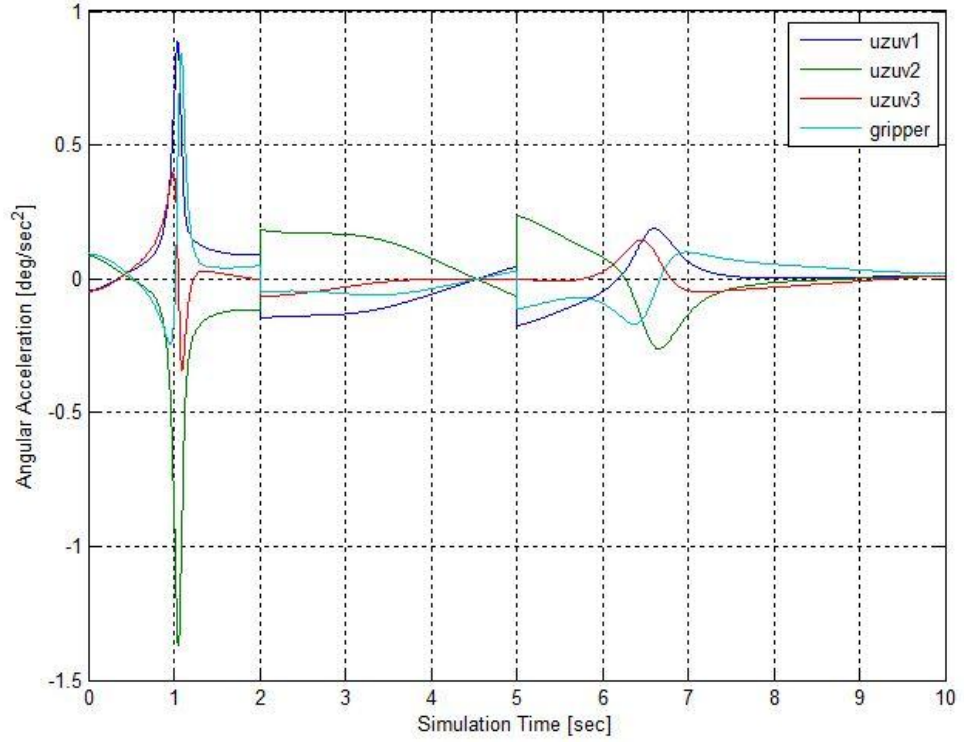
Şekil 6.10 : Uzuv-1 ve uzuv-2 için hesaplanan açısal hızlar



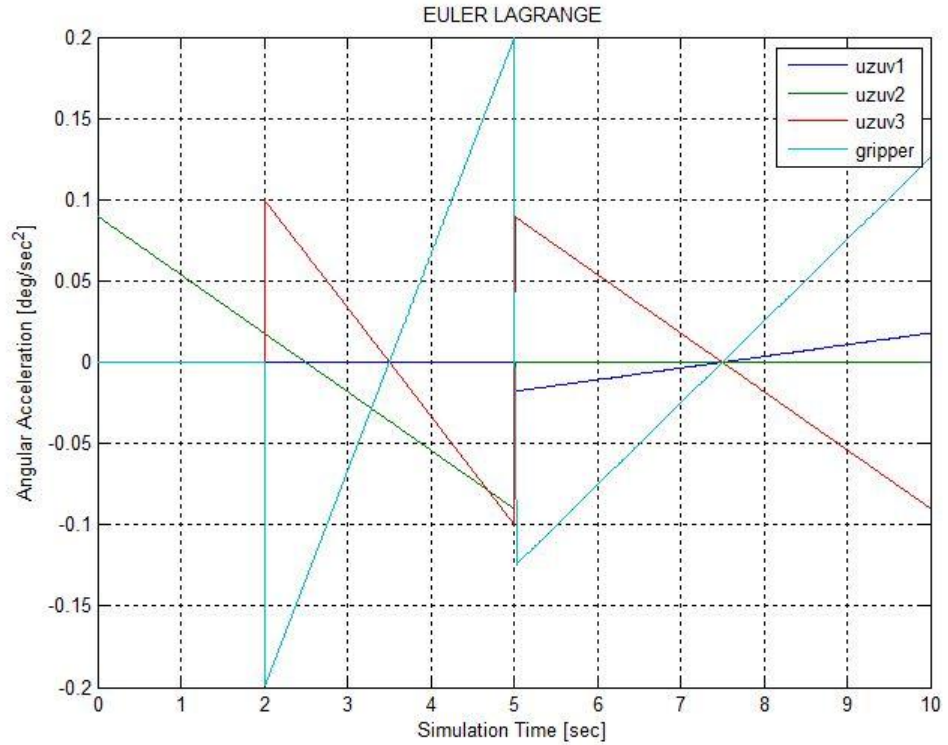
Şekil 6.11 : UzuV-3 ve uzuV-4 için hesaplanan açısal hızlar

Jakobyen matrisindeki tekillikten kaynaklanan probleme neticesinde UOC kullanılarak manipülatörün ters kinetik algoritması ile Şekil 6.12'deki gibi hesaplanan açısal ivme değerleri, Şekil 6.13'deki gibi beklenen ve Şekil 6.16'deki gibi ölçülen ivme değerlerinden farklı çıkmaktadır.

UZAYSAL OPERATOR CEBRİ

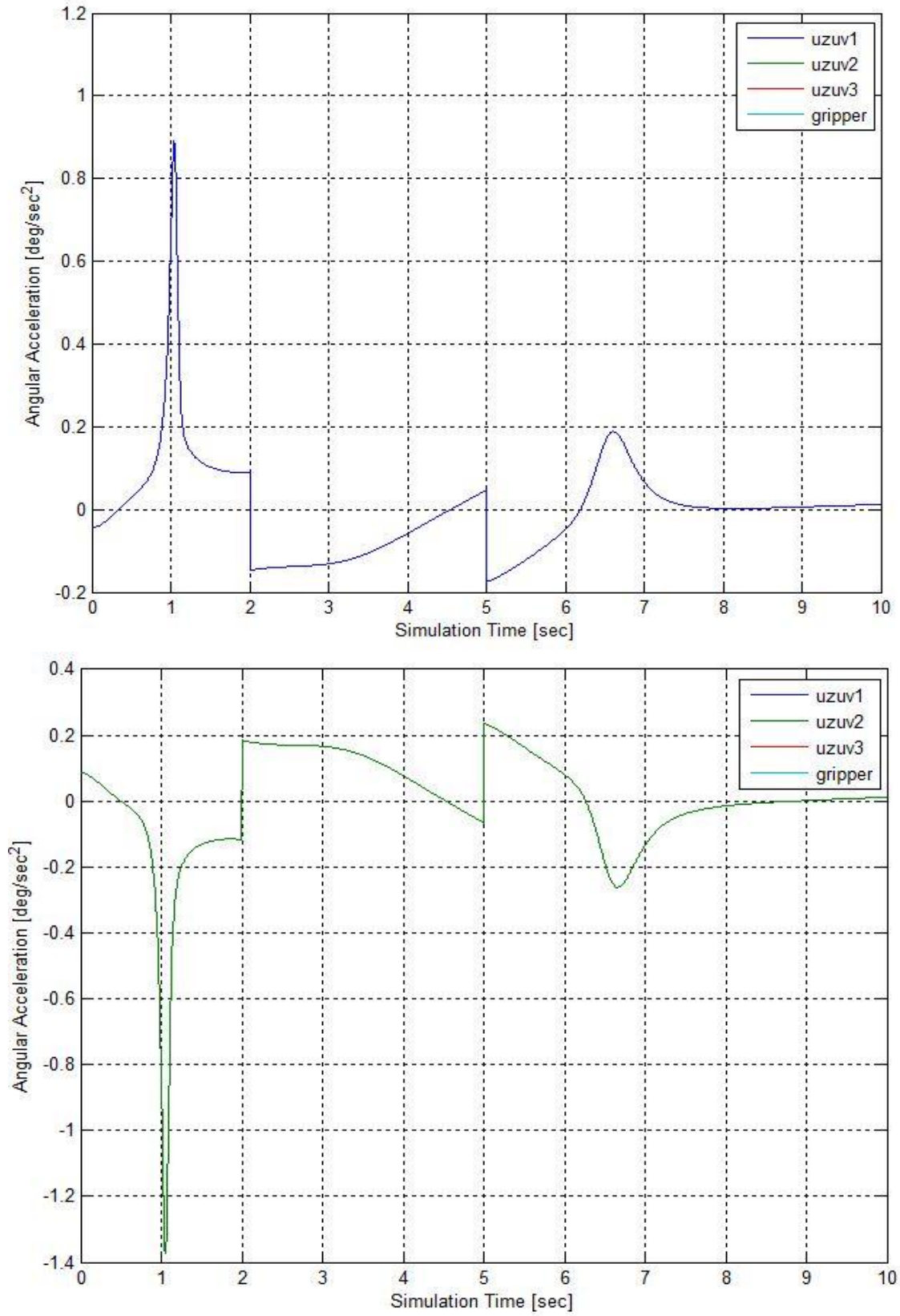


Şekil 6.12 : Uoc ile hesaplanan uzuv açısal ivmeler



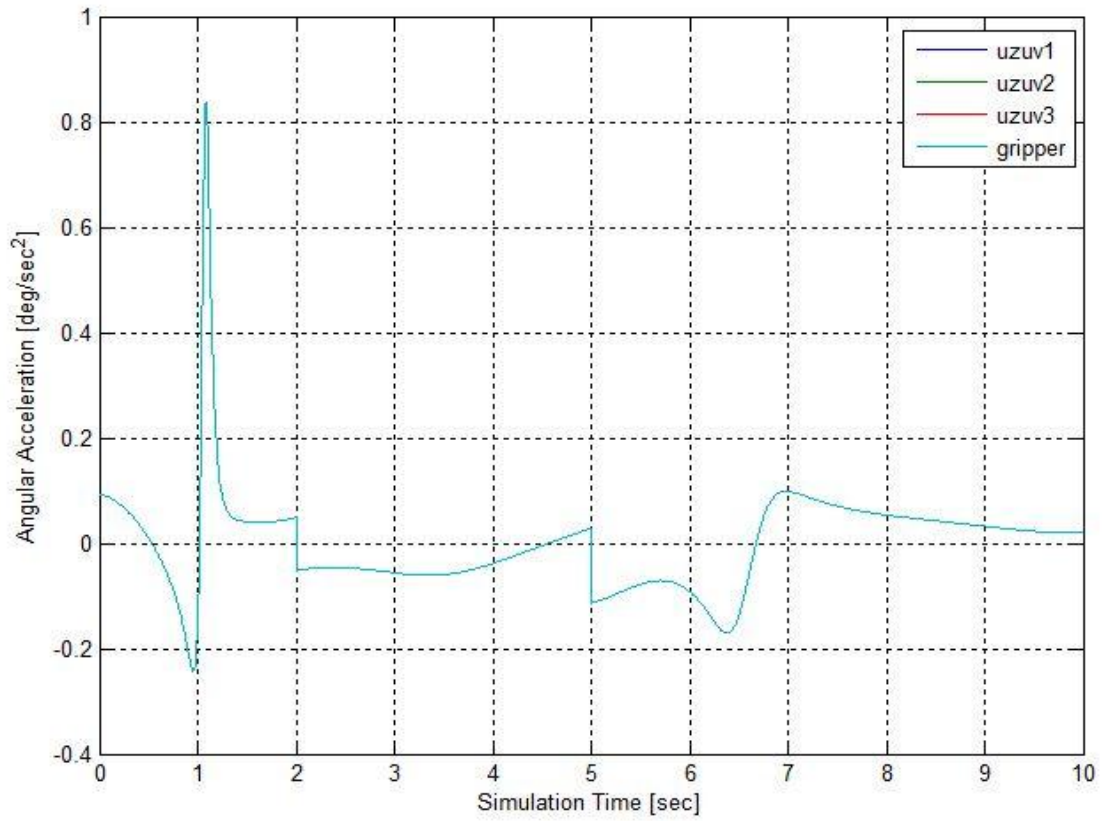
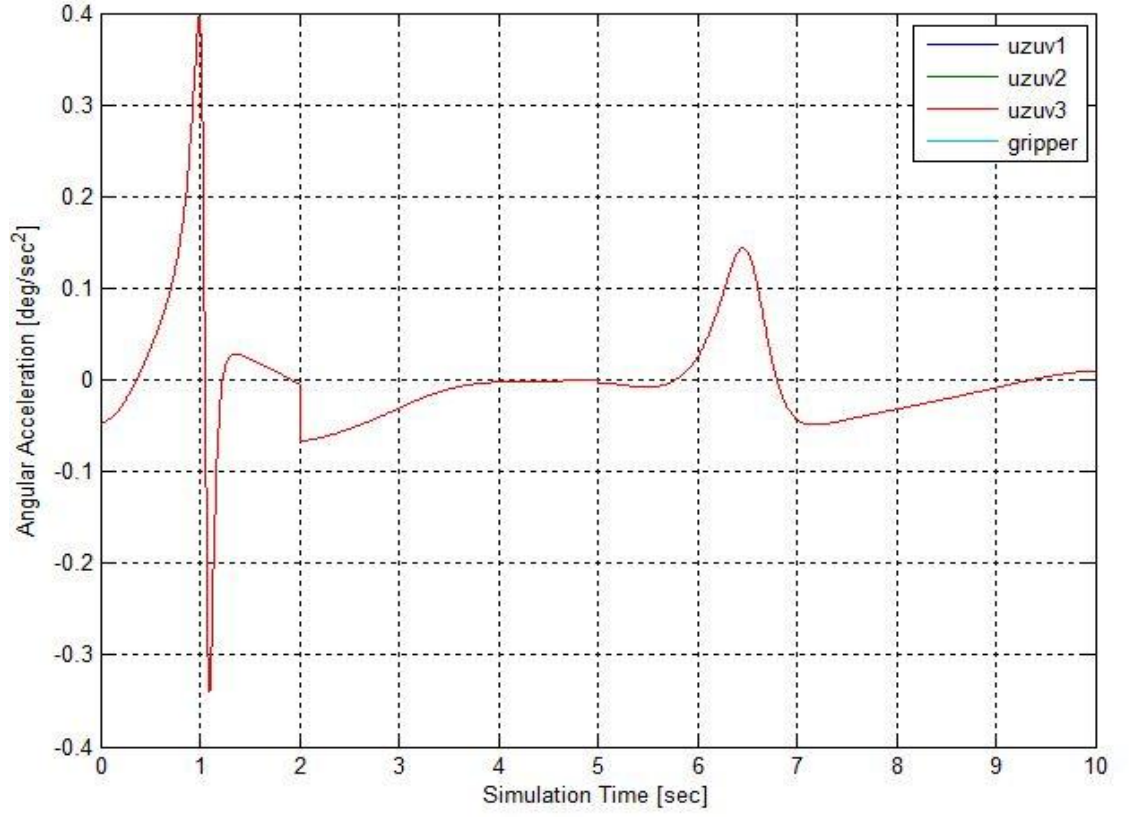
Şekil 6.13 : Euler lagrange ile hesaplanan uzuv açısal ivmeleri

UOC ile manipölatorün ters kinetiğinin hesaplanmasıyla elde edilen açısai ivme değeri sırasıyla uzuv-1 ve uzuv-2 için Şekil 6.14’de verilmektedir.

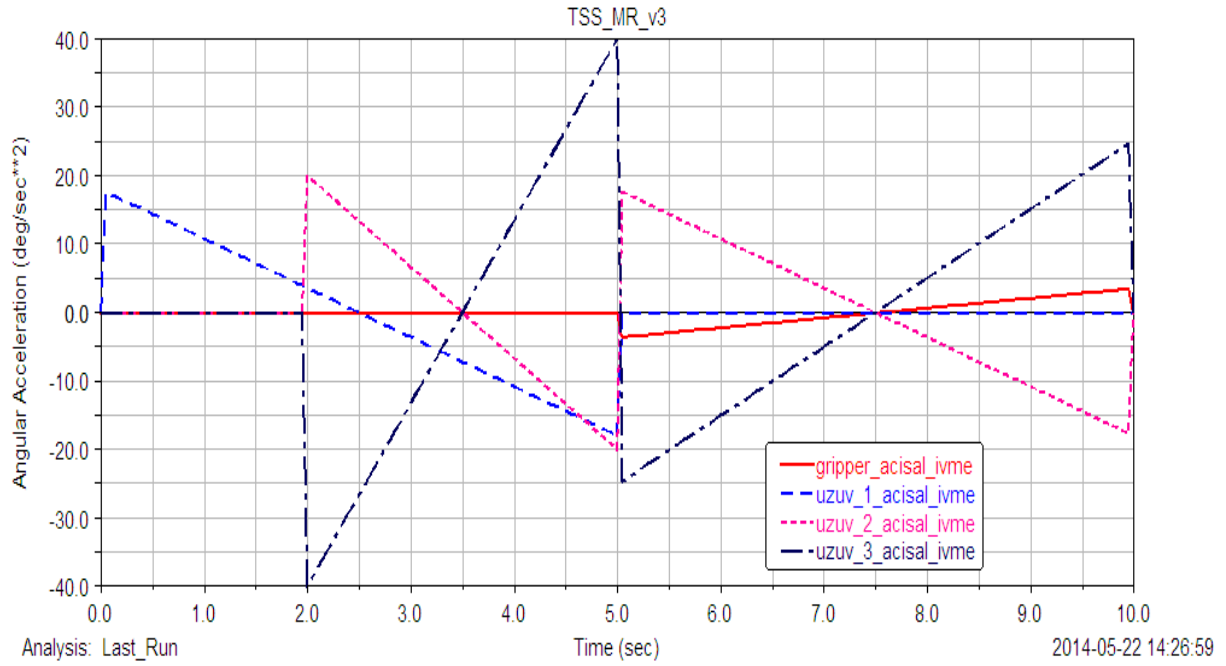


Şekil 6.14 : Uzuv-1 ve uzuv-2 için hesaplanan açısai ivmeler

Benzer şekilde uzuv-3 ve uzuv-4 için hesaplanan açısal ivme değerleri ise Şekil 6.15’de verilmektedir.



Şekil 6.15 : Uzu-3 ve uzu-4 için hesaplanan açısal ivmeler



Şekil 6.16 : Msc adams programında ölçülen uzuv açısai ivmeleri

Robota ait UOC tabanlı dinamik modele ilişkin sonuçlar bu şekilde bulunurken diğer safhalarda ise mekatronik tasarıma odaklanılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen tasarımın mukavemeti ve mekaniği çeşitli benzeşim programlarıyla kontrol edildikten sonra geometrisi katı modelleme programında son şeklini almakta, kinematik tabanlı hareket kontrolünü gerçekleştirmek için tasarlanan pid kontrolör ile elektronik ortamda hazırlanan test düzeneğinde yeterliliği ölçülmektedir. Sonraki safhada ise mekanik tasarım aşamasını tanımlanan hareket kiplerini gerçekleştirebilmesi için elektriksel ve elektronik bileşenlerin seçimi safhası takip etmekte uygun eyleyici, sensör ve kontrol kartlarının belirlenmesi ile yarı otonom robot son şeklini almaktadır.

Her tasarımda olduğu gibi karşılaşılan başlıca zorluk yeni bir ürünün üretim sürecindeki, uygun malzeme ve parça tedariği ile imalat ve lojistik aşamalarındaki belirsizliklerden kaynaklanmakta, bu amaçla tasarım süreci istenildiği gibi neticelendirilememektedir. Bundan ötürü araçta mekanik açıdan basitleştirmelere gidilme gereği duyulmuş, donanımsal olarak ise olabildiğince hazır parçaların kullanılması zorunlu hal almıştır. Misal olarak eyleyicileri sürmek için bütünleşik devre kartlarının olmayışı, güç sistemindeki enerji kaynağından kaynaklanan yük ve akım problemleri, istenilen diş sayısına ve ölçüsüne sahip dişlilerin temininden veyahut imalatından kaynaklanan sorunlar vs. gibi. Bilahare yapılacak çalışmalarda

bunların hareket kabiliyetinde kısıtlamalara neden olmasından, orijinal tasarımdan da feragat edilmesine sebep açmasından ötürü giderilmesi zorunludur.

Ayrıca benzer sorunlarla ticari benzeşim ve katı modelleme programlarında da karşılaşılmakta bundan ötürü sistem üzerinde sadeleştirilme yapılmaktadır. Esasen bunlar programlar arası dosya formatından, sistemin parçalı palet gibi organlarının yüksek seviyeli doğrusal olmayan yapısından ve programın üzerinde yürütüldüğü sistemin donanımdan kaynaklanan yazılımsal ve donanımsal sorunlar olup yazılımsal olarak gerçekleştirilmesi arzulanan uzaysal operatör cebri modelinin kodlanması, kullanılan enerji tabanlı çözümler yerine yüksek seviyeli dillerde geometrik tabanlı çözümler geliştirilmesi, daha kaliteli donımın temini, benzer firma tarafından sunulan modelleme ve analiz programlarının kullanılması halinde giderilmesi muhtemeldir.

Anlatılmakta olan bu çalışmada daha çok mekanik odaklı çözüm arandığından sistemin kontrolü üzerine yeterli ve yeni uğraşı yapılamamış mevcut klasik teorilerden hareketle çözüm sunulmuş, dinamik açıdan ise robotlarda nispeten yeni bir cebir konu edinilmiştir. Dolayısıyla yapılan çalışma üzerine gerek kontrol tekniği gerekse mekanizma tekniği açısından araştırma yapılması, sistemin hareketli uzuvlarının artırdığı karmaşıklığı daha etkin çözebilecek algorimatların ve hibrid kontrol sistemlerinin geliştirilmesi, mevcut benzeşim programlarının çoklu sistemler ve yüksek mertebeli doğrusal olmayan sistemler için zayıf kalmasından ötürü elzemdir. Misal olarak, hareket kontrolünde pid kontrol yerine uyarlamalı pd kontrol denemek ve sonuçlarını gözlemlemek, takip edilen yörüngenin bulanık mantık tabanlı optimizasyon algorimatları betimlenerek daha kısa sürede takibi veyahut yoldan gelen bozucu etkilere karşı mekanik çözüm olarak sunulan süspansiyon sisteminin iyileştirilmesi yerine kalman filtresi kullanmak vb. birçok çalışma daha etkin bir mobil manipülatör tasarımı için gereklidir.

Genel hatlarıyla sunulmaya çalışılan bu tezin imalatıyla beraber mobil manipülatör dinamiği ve mobil robot modellenmesi hususlarında akademik seviyede yapılacak olan yeni araştırmalara fırsatlar sağlaması, çoğaltılmasıyla beraber arama, keşif vb. görevleri yerine getirebilen ticari versiyonlarının pazarlanarak ülke ekonomisine katkı sağlaması yapılan çalışmayı nihai hedefine ulaştıracaktır.

7. KAYNAKLAR

- [1] **Kayapınar, A. Tarık**, “*Mobil Manipölatör Dinamiğinin Modellenmesi ve Simülasyonu*” Yüksek Lisans Tezi, 2000
- [2] **Bekker, M.G.**, *Theory of Land Locomotion*, University of Michigan Press, 1956
- [3] **Wong, J.Y., Chiang, C.F.**, “*A General Theory for Skid-Steering of Tracked Vehicles on Firm Ground*”, in *Proc. Institution of Mechanical Engineers*, Part D, *Journal of Automobile Engineering*, vol.215, no.D3, 2001.
- [4] **Yeşiloğlu, S.M.**, High Performance Dynamical Modeling of Complex Topology Systems, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [5] **Dal, M.**, Holonomik Olmayan Kısıtlara Sahip Mobil Robot Modellemesi, Simülasyonu ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [6] **Rodriguez, G., Kreutz-Delgado, K. and Jain, A.**, A Spatial Operator Algebra for Manipulator Modeling and Control, *The International Journal of Robotics Research*, 10, 371-381, 1991.
- [7] **Rodriguez, G., Jain, A. and Kreutz-Delgado, K.**, Spatial Operator Algebra for Multibody System Dynamics, *The Journal of the Astronautical Sciences*, 40, 27 50,1992.
- [8] **Zhixiang,T., Hongtao, W.**, Spatial Operator Algebra for Free-Floating Space Robot Modeling and Simulation, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010.
- [9] **Ben-Tzvi,P.**, Hybrid Mobile Robot System: Interchanging Locomotion and Manipulation, PhD Thessis, University of Toronto, 2008
- [10] **Zhao,H., Duan,X.,Yang,G.**,Kinematics and Dynamics Modeling of a Small Mobile Robot with Tracked Locomotion Mode, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* , 2010, China
- [11] **Ben-Tzvi,P., Goldenberg,A.**,Design and Analysis of a Hybrid Mobile Robot Mechanism With Compounded Locomotion and Manipulation Capability, *Transactions of the ASME*, Vol. 130, JULY 2008

- [12] **Arslan,S.**, Dört Tekerlekten Tahrik Edilen Yanal Kayma ile Yönlendirilen Bir Mobil Robotun Tasarımı ve Dayanıklı Hareket Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [13] **Moosavian, S. Ali A., Kalantari, A., Semsarilar, H., Aboosaeedan, E., Mihankhah, E.**, Resquake: Teleoperative Rescue Robot, Journal of Mechanical Design, Vol.131, August 2009
- [14] **Takahashi, K., Kurisu, M., Sarata, S.**, Tracing Control for a Tracked Vehicle Based on a Virtual Wheeled Mobile Robot, ISARC,2006
- [15] **Longoria, Raul G., Dar, T.**, Estimativ Traction Coefficient of Friction for Small Scale Robotic Tracked Vehicles, Proceedings of ASME 2010 Dynamics Systems and Control Conference, September 2010.
- [16] **Morales, J., Martinez, J.**, Power Consumption Modelling of Skid-Steer Tracked Mobile Robots on Rigid Terrain, IEEE Transactions on Robotics Vol.25 No.5, October 2009.
- [17] **Guo,Y., Song, A., Zhang, H.**, Research on Centroid Position for Stairs Climbing Stability of Search and Rescue Robot, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol.7 No.4, 2010.
- [18] **Martinez, J.,Mandow,A., Morales, J., Pedraza,S.**, Kinematic Modelling of Tracked Vehicles by Experimental Identification, Proc. of the 5th IFAC International Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control App., 2003.
- [19] **Liu, Y., Liu, G.**, Kinematics and Interaction Analysis for Tracked Mobile Manipulators, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007.
- [20] **Liu, Y., Liu, G.**, Modelling of Tracked Mobile Manipulators with Consideration of Track-Terrain and Vehicle-Manipulator Interactions, Robotics and Autonomous Systems, Elsevier, 2009.
- [21] **Taşdemir, Ç.**, Arduino, Dikeyksen Yayınevi, 2011
- [22] **Devrim Ç.**, Bilgisayar Kontrollü Robotik, Dikey Eksen Yayıncılık, 2011
- [23] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi>, alındığı tarih: 17.04.2014.
- [24] <http://www.today-archive.colostate.edu/index.asp?url=display_story&story_id=1001034>, alındığı tarih: 15.03.2014.
- [25] <http://www.robotiksistem.com/mobil_robot_cesitleri.html>, alındığı tarih: 11.02.2014.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mustafa Tolga Yavuz
Doğum Yeri: İstanbul
Adres: Ortaköy, İstanbul
E-Posta: mtolgayavuz@hotmail.com
Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi
Makina Mühendisliği
2006-2011
Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği
2011-2014

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

2014 MSC Simulating Reality Contest - Top 10 Winner